

能動人工耳介

Active artificial pinnae

公文誠, 野田佳孝, 魚住守治

Makoto KUMON, Yoshitaka NODA and Shuji UOZUMI

熊本大学

Kumamoto University

kumon@gpo.kumamoto-u.ac.jp

Abstract

This paper proposes an active artificial pinna that is able to change the form imitating animals do in order to localize the sound source. The shape of the proposed pinna provides directivity to the sound source that locates in front of the pinna, and it has an ability to steer the direction by the active motion. A kinematic model to control the pinna is also proposed in this paper. In order to clarify the characteristics of the proposed pinna with respect to auditory functions, its directivity and the effect on the frequency response by the deformation were studied with the developed device.

1 はじめに

音源の位置や方向を認識する音源定位と呼ばれる機能は、音情報を利用して環境を認識する上で基本的な情報を与える重要な聴覚機能の一つである。人間や動物の音源定位では、特徴量の一部に到来音に対する身体の伝達特性を利用していると言われるが、このような特徴量は特に耳に近い上体の寄与が大きい。例えば定位感のある音再生を目指すなどの応用が考えられ、これらの影響を頭部伝達関数としてモデル化する様々な研究が精力的に行われている。耳介は頭部伝達関数に寄与する身体器官の一つであり、前方方向への指向性を高めるとともに、音源方向に対する方向依存性フィルタとしての働きがある。人間の場合、耳介の影響は周波数領域においてノッチ周波数が音源の上下方向の関数となっていることが知られている [Shaw, 1968]。耳が二つに限られる場合、両耳間時間差のように両耳間の音信号の差に基づく特徴量では、両耳から等距離にある正中面内の音源を区別することが出来ないことが多く、耳介

ノッチの周波数は音源定位にとって重要な特徴量の一つであると考えられる。

この原理を利用し、2つのマイクロホンのみで構成されるバイノーラル聴覚において音源定位能をロボットで実現する試みが報告されている。下田ら [Shimoda, 2006] は、十分な周波数成分を含む音信号に対し、複数の周波数帯域での耳介ノッチ周波数モデルを用いて音源方向を与える逆モデルを求め、フィードバック系を構成することで音源にロボット頭部を制御するサーボ系を提案した。Hörnstein [Hörnstein, 2006] は両耳の耳介周波数特性の差に基づいて、音源の上下の情報を得て頭部を制御している。Finger [Finger, 2010] は、両耳間周波数特性差が音源水平方向の関数となることを示し、同一の耳介周波数特性を持つ左右の耳介を用いて上下方向の音源定位が可能であることを示している。このような特性は耳介形状に依存するため、著者らは耳介形状について、耳介ノッチを所望のものに近づける方法について検討している [Kumon, 2009]。

ところで、人間や猫などは頭部を動かすことで音源定位能が向上することが知られている。例えば、猫頭部を固定すると水平方向の音源定位における分解能が劣化することが報告されて [Populin, 1998] おり、身体動作を伴う能動的な音源定位が重要であることが示唆される。ロボットによる音源定位においても、同様に能動的な作用を考えることは有用であると考えられ、実際、佐々木ら [Sasaki, 2009] は移動ロボットによってマイクロホンアレイとロボットの移動による三角測量を基礎とした音源定位手法を提案している。戸嶋ら [Toshima, 2006] は能動的なダミーヘッドによって、テレオペレーションにおける操作者の定位能向上に成功している。

しかしながら、このような身体動作は、エゴノイズと呼ばれるロボット自身の駆動に伴う騒音や、身体動作によるマイクの配位変化に伴う集音環境の大きな変化を生じるなど、特有の難しさを生む可能性もある。そこで、本研究では頭部の一部だけが動作することで、エゴノイズの影響

を抑制し、音響特性の変動を限定的にすることを考える。具体的には猫や犬の耳介のように前方に指向性のある形状を考え、頭部は動かずにこの耳介の形状のみが変化する機構を考察した。指向性によって、対象音信号を選択的に得ることが出来る一方、耳介を対象音方向に向けることで、様々な方向の到来音の受聴も可能になると期待されるので、動きのない耳介に比べて優位性があると考えられる。しかし、形状変化に伴う周波数特性の変化は複雑になる可能性が予想される。原理上は数値的にこの特性を求めることが可能であるが、耳介形状の正確なデータを得ることや耳介表面での反射を厳密にモデル化することは難しいため、現実的には実際の装置に基づく検証が必要である。このような観点から、本稿では、能動的に形状を変化可能な耳介を実際に制作し、計測によってその特性を明らかにすることを目的とする。

本稿の構成は以下の通りである。第2節で耳介ノッチによる音源定位について説明し、その後、実際に制作した能動人工耳介の構造および機構を考察する(第3節)。また、聴覚における耳介の特性として周波数特性と指向性を調べたので、これを第4節で説明し、提案耳介の性質を明らかにし、最後にまとめを述べる(第5節)。

2 耳介

2.1 耳介ノッチ

耳介は古くから「集音器」として前方からの到来音に対して指向性を与える器官として認識されてきた[Batteau, 1967]。これに加え、耳介表面が複雑な凹凸形状を持つため、耳への入射音が反射や回折することで、耳介は複雑な周波数特性を持つフィルタとして作用することが知られており、音源位置推定に効果があると指摘されている。特に耳介の周波数特性には音源の方向に応じてゲインが鋭く低減する周波数帯が存在し、この特徴は耳介ノッチ(Pinna Notch)と呼ばれている。人間の耳介の場合、およそ4kHzより高い周波数帯域で耳介ノッチ認められている[Butler, 1984]。実際に、Shaw[Shaw, 1968]らは人間の耳介における周波数特性を測定し、耳介ノッチの周波数が音源方向の関数になっていること、この周波数を計測することが出来れば、音源方向を求めることが出来る可能性があることを示した。耳介ノッチの生じるメカニズムについて、Lopez-Poveda[Lopez-Poveda, 1996]は回折と反射を考慮して、簡単な一次反射の音波の加え合わせによる物理モデルを提案し、簡略化された形状の耳介モデルにおいて、耳介ノッチの周波数がモデルによるものと良く一致することを示している。ロボットで耳介ノッチの利用を目的とした研究に[Hörnstein, 2006]や[Shimoda, 2006]がある。一例としてFig.1にShimodaら[Shimoda, 2006]の用いた耳介での周波数応答の例を示す。

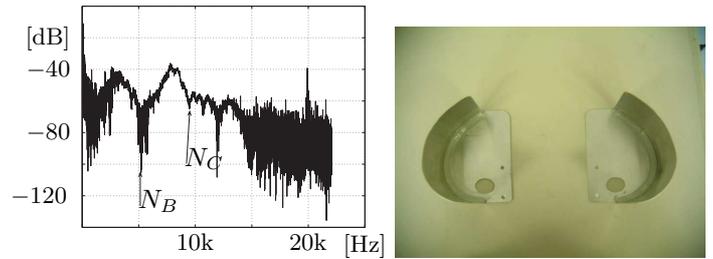


Figure 1: 耳介ノッチの例 (Shimodaらによる [Shimoda, 2006])

周波数応答 (左図) およびロボット用耳介 (右図)

2.2 動物の耳介

人間の耳介は耳介筋の発達が限定的なので、通常はほとんど動かさないが、他の多くの動物は耳介の向きを随意的に動かすことが出来、選択的な集音効果を得ていると言われている。これらの動物の耳介そのものは皮膚と軟骨等から成り、耳介の運動は頭部の複数の耳介筋が複合的に作用することで生じる。猫の場合、頭部および首からの筋肉によって[Ellsworth, 1902] ほぼ180度にわたって耳介の向きを変えることが可能で、その形状から開口部方向に指向性がある[Rice, 1992]。動物が音源定位に際し、耳介の向きを変えていることがPopulin[Populin, 1998]によって報告されている。

そこで、このような耳介をロボットで実現することを考え、以下ではその設計と動作、特性について考える。

3 能動人工耳介

本稿では、動物にならって方向と形状を変化可能な耳介を提案する。ここで、耳介がマイクロホンを覆うように設置されることから、耳介そのものの駆動機構は静穏性の高い必要があるため、耳介そのものは受動的な機構とし、ワイヤで耳介を牽引する方式とする。これにより、騒音源となるモータとマイクロホンを十分に離れた配置とすることが出来る。

3.1 構造

実際に制作した能動耳介の外観とその概略をFig.2に示す。皮膚に相当する部分はシリコンゴムで製作し、開口部にアクリルの骨材が三角形の形状を成すよう埋め込まれており、耳介形状を支持している。上部の骨材の左右それぞれには駆動用ワイヤが結び付けられ、これらのワイヤは耳介の前方の取り付け穴(図中A点)を経て、プーリを介して耳介下部に設置されたモータで駆動される。シリコンゴムに弾性があるため、モータはワイヤを牽引する方向にのみ駆動力を発揮すれば十分である。予備実験においてワイヤを牽引した際、最大の変位を得る時に約1kgfの力で前方に引く必要があった(Fig.2最上段右図)。シリコンゴ

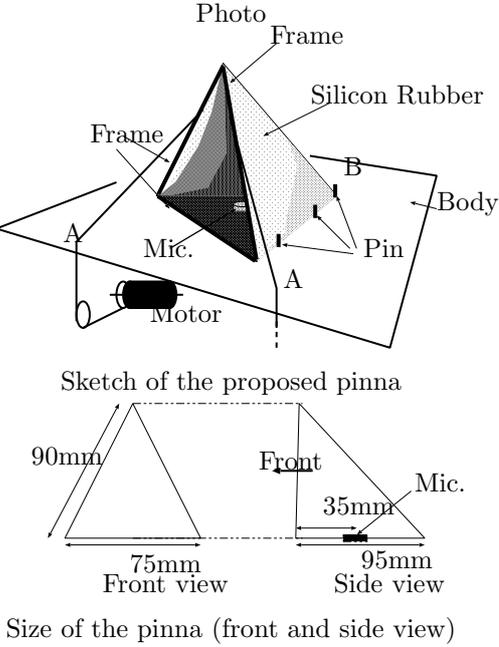
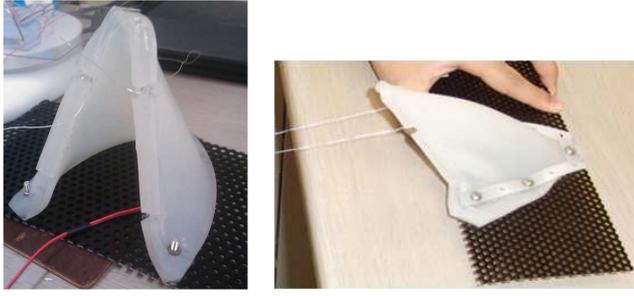


Figure 2: Active artificial pinna: photo and sketch

ムは耳介を固定する板にピン止めされており、耳介後端の固定点(図中B点)を中心に耳介を固定する板が水平面で受動回転する構造になっている。

ワイヤは適当に減速されたステッピングモータ(オリエンタルモータ社)からのトルクで駆動され、モータの駆動信号はドライバから指令パルス信号として与える。モータの回転角は二相パルス信号を制御用プロセッサ(SH7145)でカウントすることで求める。マイクロホンからの音信号と制御用プロセッサからの信号はホストとする計算機(PC)で処理され、制御用プロセッサへ指令パルス値へとフィードバックされる構成とする(Fig.3).

3.2 運動学モデル

提案する耳介はワイヤ長を制御することで、水平回転および前後方向の2自由度の運動が可能である。ここでは耳介の参照点を耳介頂点に取り、ワイヤ長と参照点間の運動学的関係を導く。

今、原点がFig.2のB点に対応し、X軸を前方、Z軸を上方に取る右手系としてFig.4(a)に示す座標系を考える。耳介の下端固定部を Q, Q' 、耳介とワイヤの取り付け点を R, R' とし、ワイヤは S, S' を通してモータに接続してい

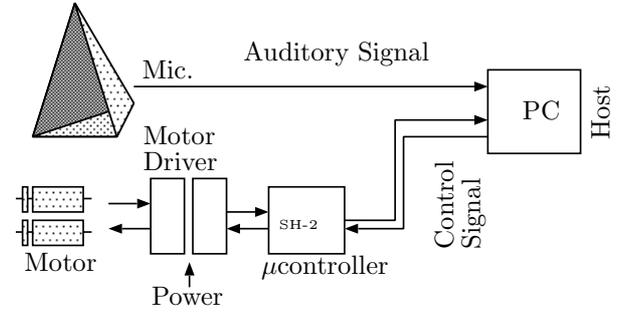


Figure 3: Control system

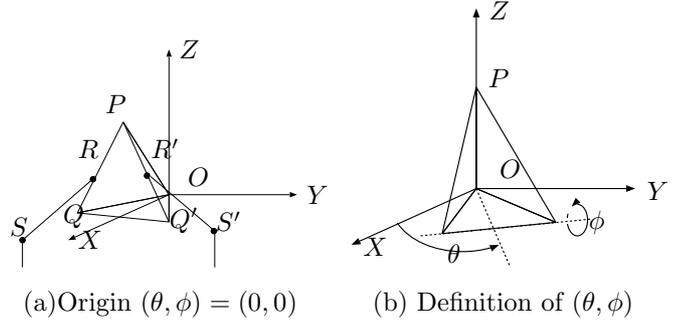


Figure 4: Kinematic model

るものとする。耳介の姿勢をZ軸まわりの回転角 θ とY軸に平行で耳介開口部を通るX-Y平面内の軸まわりの角度 ϕ で表わすこととする(Fig.4(b))。耳介頂点の参照点を P と表し、 $\theta = \phi = 0$ の時の P の座標を $(r, 0, a)^T$ と記述する。姿勢 (θ, ϕ) の時 P の座標は

$$P = R_z(\theta) \left[R_y(\phi) \left\{ \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ a \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} + \begin{pmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right] = \begin{pmatrix} -a \cos \theta \sin \phi + r \cos \theta \\ a \sin \phi \sin \theta - r \sin \theta \\ a \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

である。ここで R_Z, R_Y はそれぞれZ軸とY軸まわりの回転変換を表す。

さて、 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ における点 Q の座標を $(r, d, 0)^T$ とすると、Z軸まわりの回転によって $(r \cos \theta + d \sin \theta, -r \sin \theta + d \cos \theta, 0)^T$ へと移される。PQの長さは $\sqrt{a^2 + d^2}$ で、QRの長さを b とすると、Rの座標は

$$R = OQ + \frac{b}{\sqrt{a^2 + d^2}} QP = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & -\cos \theta \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & \sin \theta \sin \phi \\ 0 & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ d - \frac{bd}{\sqrt{a^2 + d^2}} \\ -\frac{ab}{\sqrt{a^2 + d^2}} \end{pmatrix}$$

となる。

SからRへのベクトルを l とすると

$$l^2 = (\sin \phi, \cos \theta, \sin \theta, \sin \phi \sin \theta, \sin \phi \cos \theta)c + c_0 \quad (2)$$

と書ける. ここで c, c_0 は定数ベクトルと定数を表す. R' についても同様に (2) に相当する関係を得ることが出来るので, l, l' の長さが与えられた時, このモデルから得られる関係を連立して ϕ, θ を求める. 実際には非線形方程式になるため数値的に求めることになるが, $|\theta| \ll 1, |\phi| \ll 1$ が成立すれば (2) は θ, ϕ について一次になるので, l, l' の二つを観測することで姿勢の近似値を得ることが出来る.

また l の長さ ($|l|$ と表す), θ, ϕ が与えられた時

$$\frac{d}{dt}|l| = \frac{1}{2|l|} J^T(\theta, \phi) \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

の関係が得られる. これは ϕ, θ の運動を与えた時に, ワイヤ長をどのように変化させれば良いかを与える逆運動学モデルとなっている. ここで

$$J(\theta, \phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & 0 & \cos \phi \sin \theta & \cos \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & \sin \phi \cos \theta & -\sin \phi \sin \theta \end{pmatrix} c$$

である.

以上 (2) および (3) によって耳介とワイヤ長さの間の運動学モデルが得られた.

4 特性

前節までで説明した耳介について, 聴覚上の特性を調べる. ここでは, 耳介の大きな効用である耳介ノッチと集音効果に相当する性質を調べることにした. なお, 耳介ノッチは音源の上下方向に対する関数として周波数特性を考慮することが多いが, 本稿では対象とする耳介の形状変化に注目しているので, 前節の ϕ の変化に伴う影響を考える. 他方の自由度 θ については姿勢を一定に保ったまま水平面内での指向性について調べ, 耳介の集音効果について着目した.

4.1 測定方法

4.1.1 周波数特性

周波数特性の測定は以下の手順で行った. TSP[Suzuki, 1992]信号を駆動信号とし, Fig.5 に示すように耳介のマイクロホンと耳介近傍のマイクロホンでこれらの信号を受聴した. なお, TSP 信号を受聴した信号は十分な周波数成分を含むと考えられるので, 耳介での信号と耳介近傍での信号の間の特性をクロススペクトル法で求めたものを耳介の周波数特性と考えた. これは収録環境の特性を除去することを期待したもので, 具体的な計算は MATLAB の `tfestimate` により 4096 点毎のオーバーラップを伴う 8192 点の FFT で行った.

実験ではスピーカと耳介間は 1m, 耳介近傍のマイクは耳介開口部 20cm 前方に設置した. 耳介は 頂点 P が開口部下端から後方 3cm, 真上, 前方 2cm, 同 5cm の 4 通り (

ϕ の 21.5 度, 0 度, -14.1 度, -37.7 度に対応) を測定し, それぞれの姿勢において TSP 応答を 9 回計測している. 信号は 44100Hz でサンプリングし増幅したものを収録しているため, 特性はアンプ等の特性を含んだものになっている.

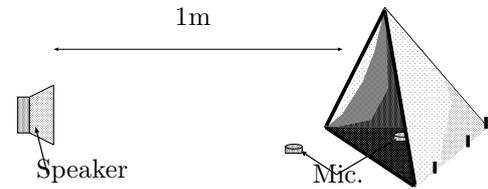


Figure 5: Impulse response measurement

4.1.2 指向性

次に水平方向の特性として指向性について調べた. ここではワイヤを自然な状態にし (頂点 P が開口部下端から後方 3cm に位置, $\phi = 21.5$ 度), 先の実験と同様, 音源を耳介前方 1m に設置した. 耳介を回転台上載せ, マイクロホンを中心として耳介そのものを回転させることで, 音源との相対的な水平方向を変化させた. 計測にあたっては 11.25 度刻みで 360 度全方向からの特性を測定した. なお, 音源方向毎のゲイン特性によって指向性を考えることにした. この実験でも, 前述の実験と同様, TSP 信号を駆動信号とし, 耳介前方に設置したマイクロホンと耳介で収録した信号の間の特性によって耳介の特性とした.

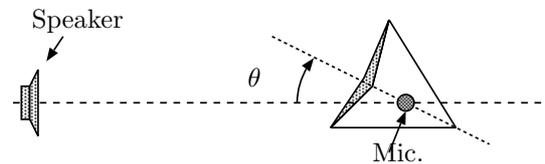


Figure 6: Directivity measurement

4.2 測定結果

4.2.1 周波数応答

Fig.7 に測定された耳介の周波数応答を示した. ゲイン特性を見ると, ϕ に依らず 1kHz 付近のなだらかなピークと 2.5kHz から 3kHz にかけてのノッチが安定して見られる. 一方 5kHz より高い周波数帯域では, 耳介変形の影響を受けてゲイン特性が変化していることが分かる. 位相については, 高周波数帯域 (数 kHz 以上) でははっきりとした構造が見られ, ϕ の変化の影響と見られる変化がある.

4.2.2 指向性

Fig.8 に耳介が回転した際のゲイン特性を示す. 図は横軸に耳介の方向, 縦軸に周波数を示したもので, 0 度が耳

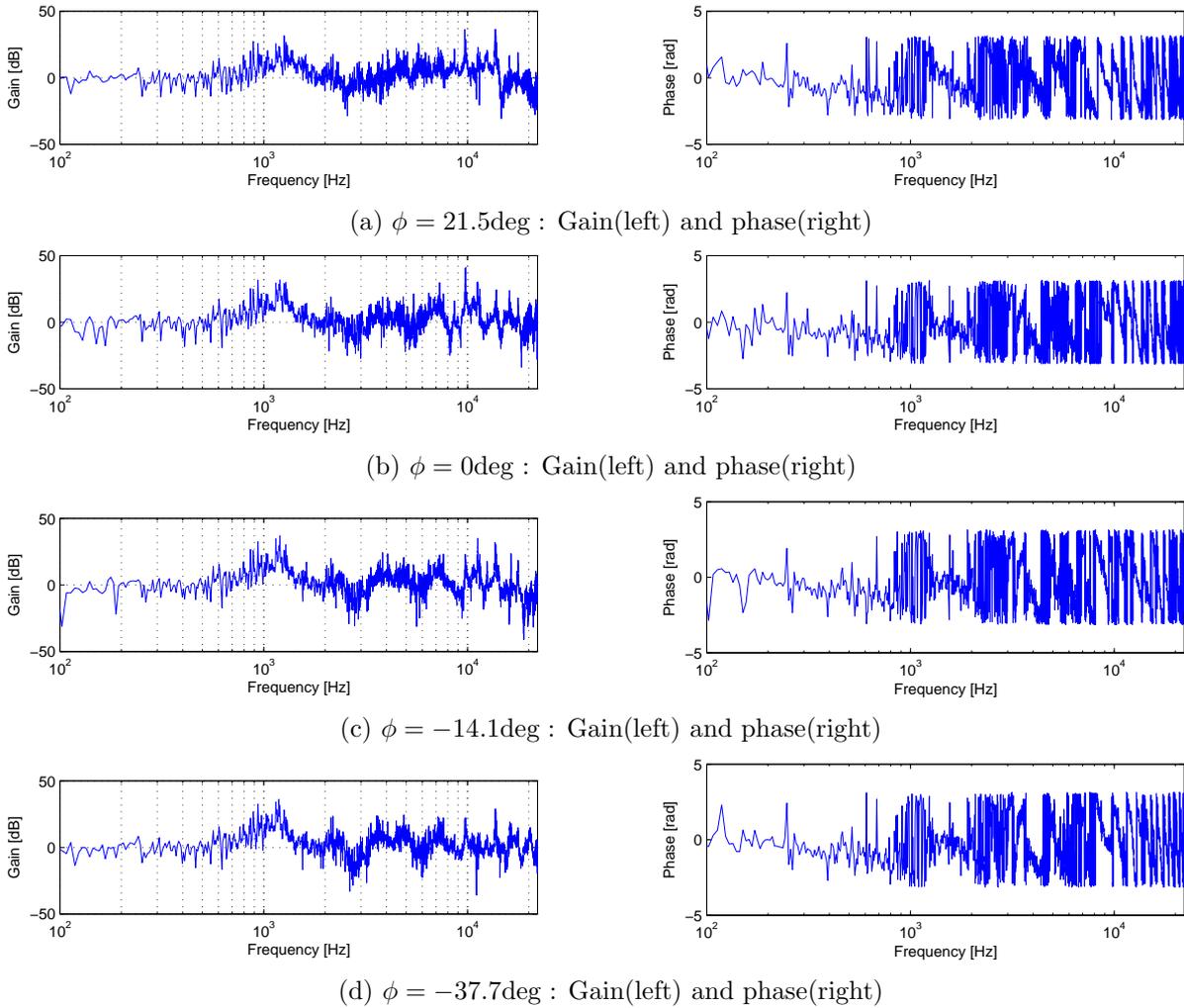


Figure 7: Frequency response of the proposed pinna

介正面方向にスピーカが位置する場合に対応し、反時計まわりを正としている。前方に対してある程度の指向性を示しており、8kHzを越える高周波数帯域ではっきりとした特性が確認される。しかし、8kHz以下では指向性は認められず、1kHz付近のピークでは音源の方向に依らず様なゲイン特性となっていた。

4.3 考察

これらの測定結果から、指向性や形状変化への依存性といった特性は主に数kHzより高い周波数帯域で見られた。周波数特性では ϕ の正負での特性変化がある程度見られたと言えるが、これは $\phi = 21.5$ 度の時、P点がマイクロホンよりも後方にあり、マイクロホンが剥き出しに近い状態になっていたのに対し、それよりも小さな ϕ ではマイクロホンが耳介壁面に覆われる状態になっていたためと考えられる。また、1kHz付近に増幅特性があり、方向や耳介形状に関係せず存在することが判った。これは耳介の効果ではあるが、音源定位の観点からはあまり望ましくない。

所望の特性が高周波数帯域に制限されるのは、波長の関係である程度仕方ないが、指向性に関する結果から低周

波域で耳介が機能していないことが想定される。これは、変形を優先するために耳介の薄くした結果、対応する周波数帯域の音波が透過している可能性がある。

5 おわりに

本稿では、能動的音信号の受聴を目指し、ワイヤ駆動により形状を変える、指向性が可変の耳介を提案し、その基本的な特性を実験によって調査し、耳介の変形を導く簡単な運動学モデルを導いた。得られた特性は、前方に対してある程度の指向性を有するものであったが、耳介の変形に伴う周波数特性の変化は高周波数帯域に限定的であった。この理由として、耳介が薄く、低周波帯域では十分な反射が得られていない可能性が考えられる。今後、耳介の厚さを変える、あるいは異った素材を用いるなどが必要となる。

また、受聴した音信号に対する応答、例えば音圧情報を手掛りに音源方向を探索する[Bernard, 2010]など、耳介を運動学モデルに基づいた耳介の駆動制御を行う。本稿で調べていないが、音源の上下に対する耳介の影響も検討する必要がある。

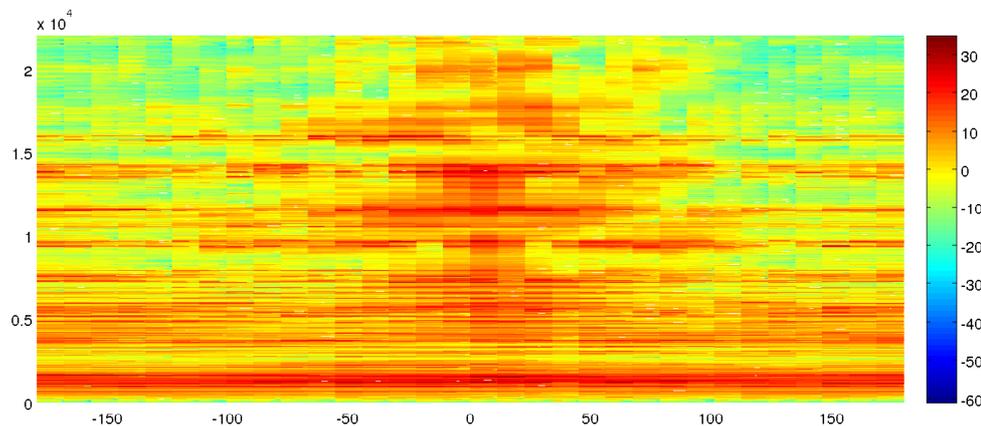


Figure 8: Directivity

参考文献

- [Shaw, 1968] Shaw, E.A.G. and Teranishi, R.: Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source, *J. of Acoust. Soc. Am.* 44 (1), 240–249, (1968).
- [Batteau, 1967] Batteau, D.W.: The role of the pinna in human localization, *Proc. of Royal Soc. of London, B* 158, 158–180, (1967)
- [Butler, 1984] Musicant, A.O. and Butler, R. A.: The influence of pinnae-based spectral cues on sound localization, *J. of Acoust. Soc. Am.* 75(4), 1195–1200, (1984).
- [Lopez-Poveda, 1996] E.A. Lopez-Poveda and R. Meddis: A physical model of sound diffraction and reflections in the human concha, *J. of Acoust. Soc. Am.* 100 (5), 3248–3259, (1996).
- [Shimoda, 2006] Shimoda, T., Nakashima, T., Kumon, M., Kohzawa, R., Mizumoto I., and Iwai, Z.: Spectral cues for robust sound localization with pinnae, *Proc. of 2006 IEEE/RSJ Int'l Conf. Intell. Robot. and Sys.*, 386–391, (2006).
- [Hörnstein, 2006] Hörnstein, J., Lopes, M., Santos-Victor, J. and Lacerda, F.: Sound localization for humanoid robots - building audio-motor maps based on the HRTF, *Proc. of IROS 2006*, 1170–1176, (2006).
- [Finger, 2010] Finger, H., Ruvolo, P., Liu, S.C., Movellan, J.: Approaches and Databases for Online Calibration of Binaural Sound Localization for Robotic Heads, *Proc. of IROS 2010*, 4340–4345, (2010).
- [Kumon, 2009] 公文誠, 石飛光章: 境界要素法を用いた音響解析による耳介形状の検討, *人工知能学会 SIG チャレンジ研究会*, 14–19, (2009).
- [Rice, 1992] J.J. Rice, B.J. May, G.A. Spirou and E.D. Young: Pinna-based spectral cues for sound localization in cat, *Hearing Research*, 58, 132–152 (1992).
- [Populin, 1998] L.C. Populin and T. C. T. Yin: Pinna movements of the cat during sound localization, *J. of Neuroscience*, 18(11), 4233–4243, (1998).
- [Sasaki, 2009] Sasaki, Y., Kagami, S., Mizoguchi, H.: Online Short-Term Multiple Sound Source Mapping for a Mobile Robot by Robust Motion Triangulation, *Advanced Robotics*, 23, 1-2, 145-164, (2009).
- [Toshima, 2006] 戸嶋巖樹, 青木茂明, 平原達也: 頭部運動を再現する改良型ダミーヘッドシステム: テレヘッド II, *日本音響学会誌*, 62, 3, 244–254, (2006).
- [Ellsworth, 1902] Ellsworth R.J. and Jennings, H. S.: *Anatomy of the cat*, Henry Holt and Co., (1902).
- [Suzuki, 1992] 鈴木陽一: 時間引き伸ばしパルス設計法に関する考察, *信学技法*, EA92–86, (1992).
- [Bernard, 2010] Bernard, M., N'Guyen, P., Pirim, P., Gas, B. and Meyer J-A.: Phonotaxis Behavior in the Artificial Rat Psikharpax, *Proceedings of ISIR 2010*, (2010).