

動的音高変化による方向提示手法設計のための基礎的調査

飯塚 陸斗^{1,a)} 大山 智弘¹ 杉山 将利² 下田 康太² 田之頭 吾音¹ 井原 圭一¹ 石橋 遼²
川口 一画^{3,b)}

概要：遠隔作業指示においては、実空間上の操作対象に対する注意誘導が必要となるが、通常のビデオ通話システムではその達成が困難である。このような課題に対して、頭部伝達関数を用いた立体音響によって注意誘導を行う手法も提案されているが、汎用的な頭部伝達関数では精度が低くなるという課題があった。そこで本研究では、空間音響を用いず、利用者の注視方向と目標角度の差分に応じて動的に変化する非空間音響を用いて注意誘導を行うシステムを提案する。提案手法では、センサを用いて利用者の注視方向を取得し、目標角度との誤差に応じてヘッドフォンから提示する聴覚情報の音高を変化させる。本研究では、システムのプロトタイプを実装し、複数の音高変化パターンで注意誘導の所要時間を調査する評価実験を行った。

1. はじめに

ビデオ通話を用いた遠隔会議は広く普及しているが、通常のビデオ通話システムでは注視や指差し等の空間的参照の伝達が困難であり、円滑なコミュニケーションの達成が困難な状況が存在する。例として、工場等で遠隔地にいる指示者が現地側にある機械等の組み立てや操作手順を指示する遠隔作業指示が挙げられる。遠隔作業指示においては、実空間上の操作対象に対する注意誘導が必要となるが、通常のビデオ通話システムではその達成が困難である。このような課題に対して、ARを用いて実空間中の指示対象物上に指差しやポインタ等の指示情報を重畳表示し、注意誘導を行う手法が提案されている [1], [2], [3]。このような手法では、視覚的情報により指示位置が一意に定まる一方で、HMD やタブレット端末等の機材が必要になること、HMD の着用やタブレットの把持が作業の妨げになる等の制約があったこのような課題に対して、視覚情報を用いず空間音響を用いて注意誘導を行う手法が提案されている [4], [5]。空間音響を用いた注意誘導では、頭部伝達関数を用いた立体音響によって疑似的に特定の方向から音が到来する状況を再現する。ただし、利用者毎に頭部伝達関数を測定することは困難であり、事前に記録された汎用的な頭部伝達関数では精度が低くなるという課題があった。

そこで本研究では、空間音響を用いず、利用者の注視

方向と目標角度の差分に応じて動的に変化する非空間音響を用いて注意誘導を行うシステムを提案する。提案手法では、センサを用いて利用者の注視方向を取得し、目標角度との誤差に応じてヘッドフォンから提示する聴覚情報の音高を変化させる。利用者は音高の変化を手掛かりに提示方向を動的に探索する。本研究では、システムのプロトタイプを実装し、複数の音高変化パターンで注意誘導の所要時間を調査する評価実験を行った。

2. 関連研究

2.1 視覚情報を用いた注意誘導

遠隔作業指示において、特定の方向に注意を誘導するための手法として、ARを用いて現地環境に視覚情報を付与し注意誘導を行う手法が提案されている。Gauglitz らのシステムでは、遠隔指示者がタブレット端末で撮影された現地側映像に指示のための図形を描画、現地側作業者はタブレット端末越しに現地側の空間に AR 表示された指示を確認することが出来る [1]。大概らのシステムでは、深度カメラを用いて現地側環境の 3D モデルを作成し遠隔指示者に VR 提示、遠隔支持者は VR 空間内で現地側環境 3D モデルに対する指差し等の動作を行う。遠隔支持者の動作は 3D アバタの動作として現地側環境に重畳され、現地側作業者は HMD 越しにそれを確認することが出来る [3]。これらのシステムでは視覚的情報により指示位置が一意に定まる一方で、タブレット端末や HMD 等の機材が必要になること、タブレットの把持や HMD の着用が作業の妨げになる等の制約があった。

¹ 筑波大学 システム情報工学研究群

² 筑波大学 情報学群

³ 筑波大学 システム情報系

a) iitsuka@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) kawaguchi@cs.tsukuba.ac.jp

2.2 空間音響を用いた注意誘導

視覚的情報を用いて注意誘導を行う手法の制約（必要機材および作業性の低下）に対して、空間音響を用いて注意誘導を行う手法が提案されている。聴覚情報を用いた注意誘導では、頭部伝達関数を用いた立体音響によって疑似的に特定の方向から音が到来する状況を再現する手法が用いられる。広田らは頭部伝達関数を用いた立体音響により空間中に聴覚的アイコンを配置し、ポインタを用いたポインティングにより選択を行うインタフェースを提案した [5]。空間音響を用いた注意誘導は、ヘッドフォンを中心とする簡易的な機材で実現可能であり、かつハンズ／アイズフリーでの注意誘導が可能になる。ただし、利用者毎に頭部伝達関数を測定することは困難であり、事前に記録された汎用的な頭部伝達関数では精度が低くなるという課題があった。

2.3 本研究の指針

視覚情報を用いた注意誘導、および空間音響を用いた注意誘導の課題を解決するため、本研究では空間音響を用いずに利用者の注視方向と目標角度の差分に応じて動的に変化する非空間音響を用いて注意誘導を行う手法を提案する。提案手法では、センサを用いて利用者の注視方向を取得し、目標角度との誤差に応じてヘッドフォンから提示する聴覚情報を動的に変化させる。動的に変化させる聴覚情報のパラメータとして、本研究では音高（周波数）を用いる。これは、音高は他の聴覚情報のパラメータ（音圧等）と比較して検知閾が小さく、約 0.2% の変化を知覚可能である [6] ためである。

なお、音高を動的に変化させ注意誘導を行う際、どのような性状で音高を変化させるか（線形変化、対数変化等）、また変化させる分解能をどの程度にすべきかの知見は存在しない。よって本研究では、システムのプロトタイプを作成して音高の変化性状および分解能の設計指針を明らかにするための基礎的調査を行う。

3. 実験

3.1 実験用システム

実験システムは Unity 2019.4.22f1 を用いて作成した。頭部方向の検出は Optitrack V120:Duo を用い、制御ソフトウェア Motive 2.2.0 から Unity へ検出した頭部方向情報を送った。そして設定した目標角度と頭部方向の差分に応じて音高を変化させた。実験システムの制御にはノートパソコン（LENOVO, ThinkPad T14 Gen 1 20S0CTO1WW, CPU: Intel Core i7-10510U 1.80GHz, メモリ: 32GB, OS: Microsoft Windows 10 Home 10.0.18363）を用いた。また、実験参加者はヘッドホン（Logicool, PRO X Gaming Headset G-PHS-003）を用いて音を聞いた。実験環境について、図 1 に示す。

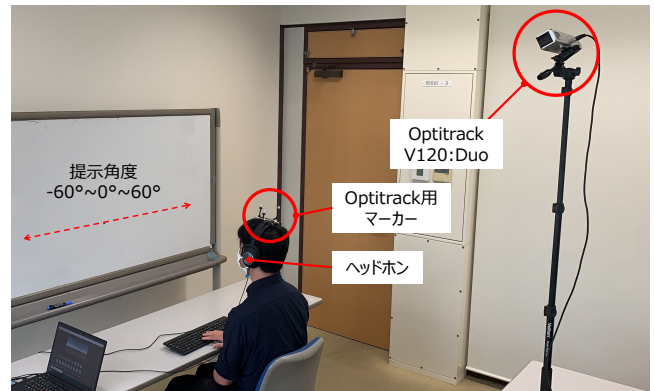


図 1 実験環境

3.2 実験条件

実験条件は変化性状と分解能の 2 要因で設定した。まず、変化性状について、比例、反比例、そして対数の 3 条件に設定した。それぞれの変化の式を下記に示す。ターゲットの角度を T 、頭部角度を t とすると、ターゲットと頭部の角度差 Δt を

$$\Delta t = |T - t|$$

と表す。

比例条件における提示した周波数を示す。

$$f(x) = \begin{cases} 1000 - (750 * \frac{\Delta t}{120}) & (\Delta t > 3) \\ 1500 & (0 \leq \Delta t \leq 3) \end{cases}$$

反比例条件における提示した周波数を示す。

$$f(x) = \begin{cases} \frac{40000}{\Delta t + 40} & (\Delta t > 3) \\ 1500 & (0 \leq \Delta t \leq 3) \end{cases}$$

対数条件における提示した周波数を示す。

$$f(x) = \begin{cases} 1000 - \log_a \Delta t & (\Delta t > 3) \\ 1500 & (0 \leq \Delta t \leq 3) \end{cases}$$

$$a = 1.0064141751348$$

Δt が 3 度以内の範囲を 1500 Hz と設定したのは、この範囲をターゲット角度に対する頭部角度の正解範囲として明示的に区別するためである。また、分解能は 1 度、5 度、15 度とした。分解能ごとに提示した周波数を図 2 に示す。

実験は参加者内配置で行った。また実験参加者は 18 人である。

3.3 実験手順

ヘッドホンから聞こえる音を基に、目標角度に頭部方向を合わせるタスクを行った。最初に正面を向き、Space を押すことでタスクが開始し、音が提示される。その後、目標角度に頭部方向を合わせ、Enter を押すことでタスクを終了する。頭部方向は水平方向のみを考慮し、目標角度は正面を 0 度、右向きを正として -60, -45, -30, -15, 0, 15,

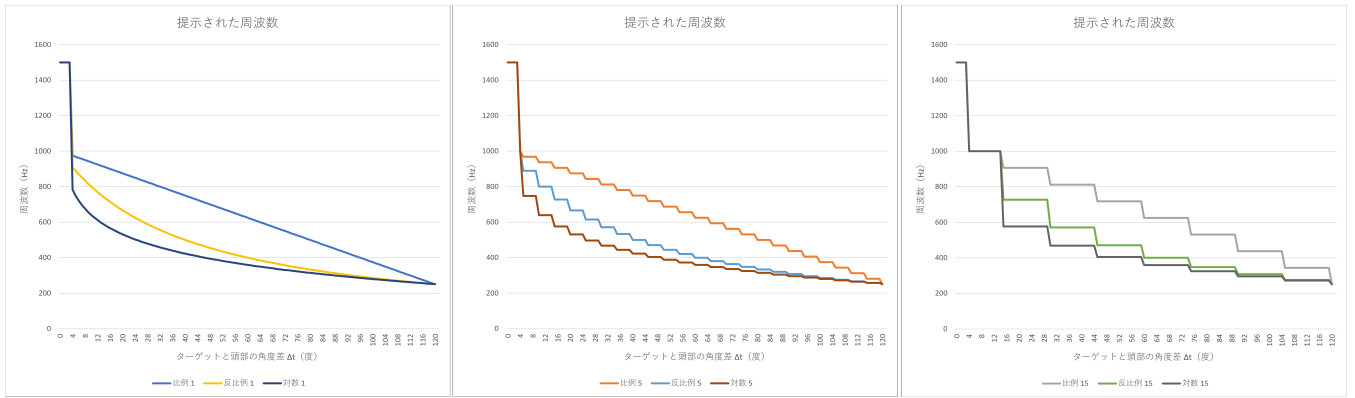


図 2 実験条件. 図は左から分解能が 1 度, 5 度, 15 度の場合であり, 図ごとにそれぞれ比例, 反比例, 対数を示している.

30, 45, 60 度の 9 つとした. 目標角度が提示される順番はランダムとした. また, 事前調査の結果より, 探索を開始する際に最初に向く方向にターゲットが存在するか否かが結果に大きく影響を与えることがわかっていたので, 各セットで実験参加者に最初に向く方向を指示した. 最初に右を向くよう指示し, 9 つの目標角度を 1 回ずつ行った後, 左を向くよう指示をして, 再度 9 つの目標角度を 1 回ずつ行った. なお, 分析にあたっては, 最初に向く方向にターゲットが存在する試行 (Correct) と存在しない試行 (wrong) を区別した. 変化性状×分解能の 9 セットを行った. 実験全体の所要時間は 1 時間程度であった.

3.4 評価項目

評価項目として, 1 試行毎に開始から終了 (Space キーを押してから Enter を押す) までの全体所要時間を記録した. また, 最初に目標角度に頭部方向が到達するまでを探索時間, 目標角度を超えてから探索を終了するまでを調整時間としてそれぞれ記録した. なお前述の通り, 分析にあたっては, 最初に頭部を向ける方向にターゲットが存在する試行 (correct) と存在しない試行 (wrong) を区別した. これらの評価項目に対して, ART (Aligned Rank Transform) を行った上で 2way-ANOVA (繰り返しありの二元配置分散分析) を行った. ANOVA の結果, 有意差があった項目に対して, 事後検定として多重比較検定を行った.

3.5 実験結果

実験結果として, 全体所要時間と探索時間, 調整時間を correct, wrong ごとにまとめたグラフを図 3,4 に示す. 各図においては, 全体所要時間と探索時間, 調整時間毎に提示角度毎の (-60 度~60 度) 結果を示す 8 個のグラフが配置されている. 個々のグラフ中では, 3 本の折れ線が変化性状を. グラフ内の左右の配置が分解能 (1 度, 5 度, 15 度) を示す. ANOVA および多重比較の結果有意差が見られた項目は限定的であった. そのため, 本実験の結果をもって

設計指針を確立する知見を得ることは困難であったが, 以下に特徴的な結果の一部を列挙する.

- 探索時間は提示角度の絶対値が小さいほど時間が短くなる傾向が見られた. これは提示角度までの移動量が小さくなることによると考えられる.
- 調整時間は提示角度の絶対値が大きいほど時間が短くなる傾向が見られた. これは提示角度までの移動量が大きい場合, 移動中の音高変化によりターゲット位置を予測することが出来るためであると考えられる.
- 分解能は一部の組み合わせにおいて主効果があり (correct の全体所要時間の提示角度 -30 度, -15 度, 30 度, wrong の全体所要時間の提示角度 30 度, 60 度など), 多重比較の結果分解能 15 度の場合に所要時間が有意に長くなる場合があった.
- 変化性状は一部の組み合わせにおいて主効果があった (wrong の全体所要時間の提示角度 60 度, correct の探索時間の提示角度 -15 度, correct の調整時間の提示角度 15 度, 60 度). 多重比較の結果はそれぞれ異なり, 特定の変化性状が一貫して優れているというような傾向は無かった.
- 探索時間は変化性状・分解能ごとの傾向が明瞭であるのに対して, 調整時間は変化性状・分解能ごとの一貫性が弱く, その影響により全体所要時間のバラつきも大きかった.
- 提示角度について, マイナス方向とプラス方向で傾向に違いがみられた.

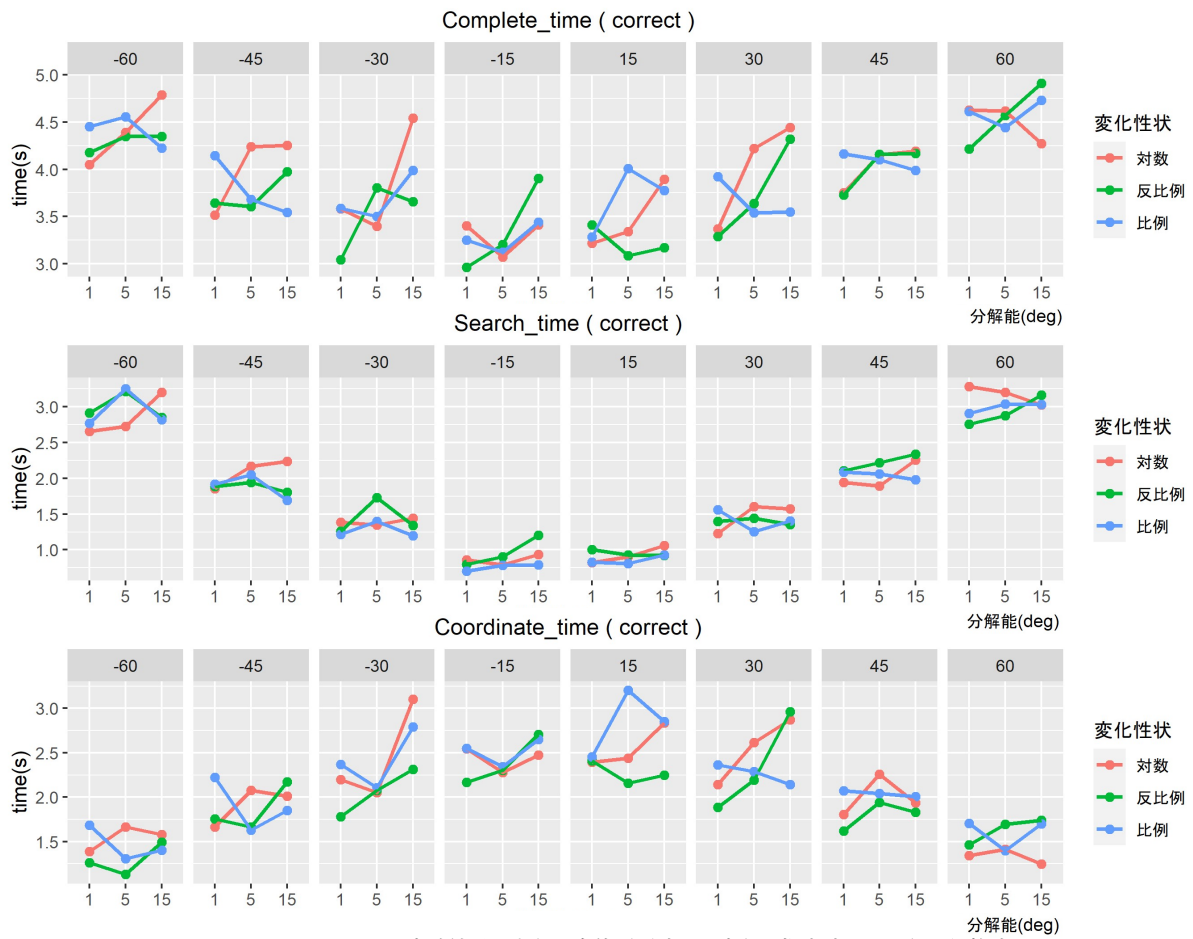


图 3 correct における実験結果. 上段: 全体所要時間, 中段: 探索時間, 下段: 調整時間

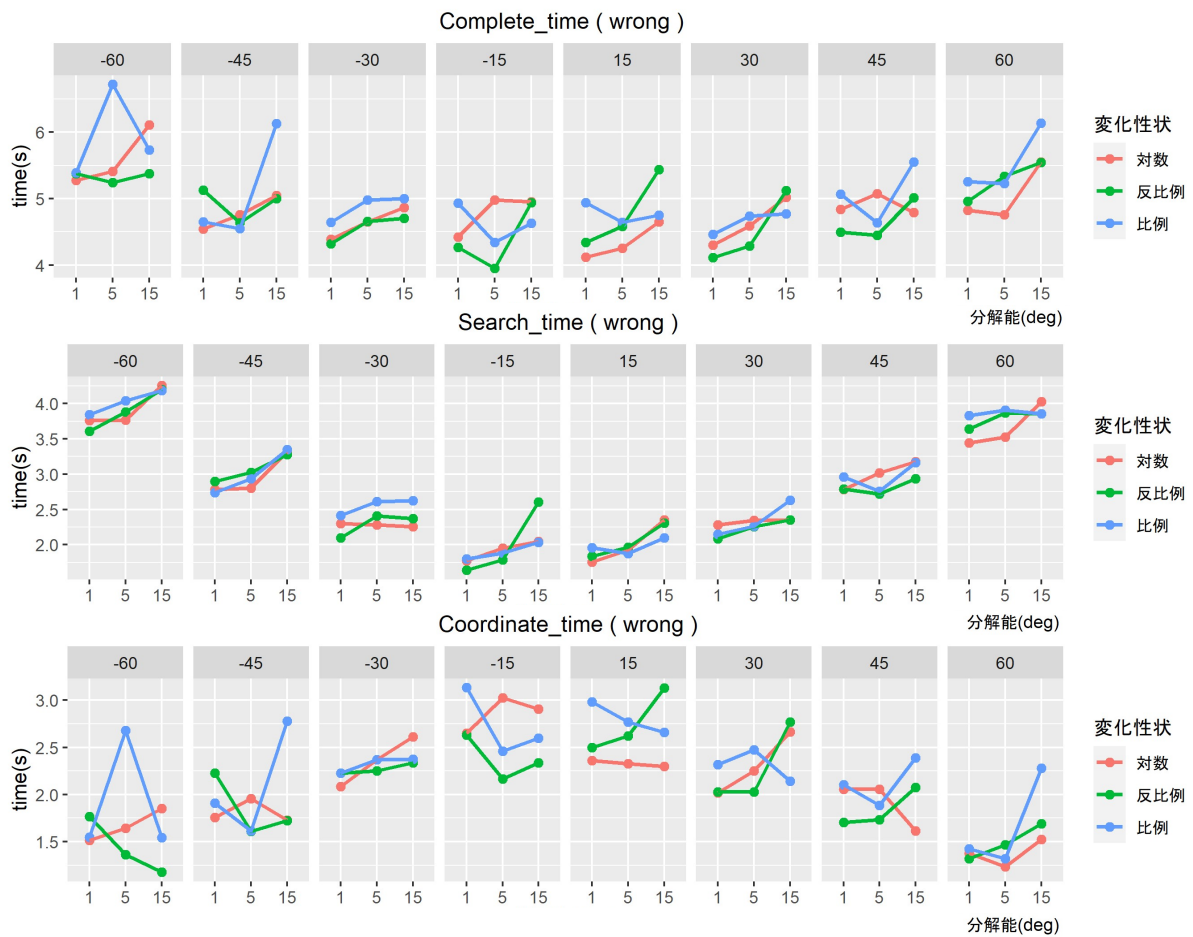


图 4 wrong における実験結果. 上段: 全体所要時間, 中段: 探索時間, 下段: 調整時間

3.6 考察と今後の課題

前節にて述べた結果のうち、調整時間において変化性状・分解能ごとの一貫性が見られなかった点については、目標角度付近での挙動を調整することにより改善される可能性がある。現在は目標角度の±3度以内を正解範囲として扱っているが、これは1mの位置で±5cm以内を誤差範囲とする設定であり、頭部角度を調整する上で難易度が高く成否のバラつきを生んでいる可能性がある。よって今後は正解範囲を±3度から拡大し難易度を下げ、成否のバラつきが緩和されるかを確認する。次に、提示角度のプラスマイナスによる傾向の違いについても、調整時間において特に顕著な差が生じている。これは、利き目や首の可動範囲の偏りなどによって頭部角度の調整精度に左右差が生じ、成否のバラつきが発生しているためである可能性があり、今後は前述の正解範囲の拡大によりプラスマイナスによる傾向の違いが緩和されるかを確認する。そして調整時間のバラつき緩和の取り組みを行った上で、再実験を行うことで、提案手法の設計指針を明らかにしていく。

なお、今回実験で扱ったのは水平方向のみであったが、注意誘導にあたっては垂直方向を組み合わせた注意誘導についても検討を行っていく予定である。また、提案する動的音高変化を用いた注意誘導手法と空間音響を用いる注意誘導手法の比較、さらには提案手法と空間音響を併用した場合の効果の検証を行っていく予定である。

4. おわりに

本研究では、空間音響を用いずに、利用者の注視方向と目標角度の差分に応じて動的に変化する非空間音響を用いて注意誘導を行う手法を提案した。本稿では、システムのプロトタイプを作成して音高の変化性状および分解能の設計指針を明らかにするための基礎的調査を行った。実験結果からは、特に調整時間において傾向にバラつきが生じており本実験の結果をもって設計指針を確立する知見を得ることは困難であった。今後はバラつき緩和のため正解範囲の調整を行った上で再実験を行い、提案手法の設計指針を明らかにしていく。

謝辞 本研究はJSPS科研費20K19839の助成を受けた。

参考文献

- [1] Steffen Gauglitz, Benjamin Nuernberger, Matthew Turk, and Tobias Höllerer. World-stabilized annotations and virtual scene navigation for remote collaboration. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, p. 449–459, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [2] 巻洵有哉, 小林達也, 加藤晴久, 柳原広昌. HMD キャリブレーションとオンサイト学習によるハンズフリー遠隔作業支援 AR システム. 情報処理学会研究報告, No. 2, feb 2015.
- [3] 大槻麻衣, 山口央士朗, 今田昇吾, 葛岡英明, 鈴木雄介. 遠隔

作業指示における身体動作と視線提示の効果. 情報処理学会研究報告, No. 5, mar 2018.

- [4] Simon Holland, David R. Morse, and Henrik Gedenryd. Audiogps: Spatial audio navigation with a minimal attention interface. *Personal Ubiquitous Comput.*, Vol. 6, No. 4, p. 253–259, jan 2002.
- [5] 広田光一, 廣瀬通孝. ウェアラブルのための聴覚定位によるインタラクション手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 1, pp. 156–165, jan 2003.
- [6] 大串健吾. 聴覚心理学概論, 1995.