



首の触知覚を用いたナビゲーションシステムの提案

Proposal of a Navigation System Using Haptic Perception on the Neck

山崎勇祐¹⁾²⁾, 白井暁彦²⁾

1) 東京工業大学工学院情報通信系

2) GREE VR Studio Laboratory, グリー株式会社

概要: 首掛け形状触覚装置は装着が容易で装着者の行動を妨げないため日常的な使用を目的とした力触覚ディスプレイに適している。しかし方向や距離のような複雑な情報を伝えるには、従来手法では多数の振動子を用いて方向提示を実現する例が提案されているが、アクチュエータの接触状態などに左右されることは容易に想像でき利用シーンが限定される弱点がある。そこで本研究では、ネックストラップの紐に接続された 2 対のアクチュエータに入力する信号波形を変調して提示することで距離・方向提示を行うナビゲーションシステムを提案する。システムに適した変調モデルの検証のため、非対称刺激の分別可能な閾値を検証したところ、位相差は 125msec 以上、振幅差は 6G 以上であれば 88 % 以上の確率で分別可能なことが分かった。また振幅変調および包絡線変調の 2 つのモデルを用いてユーザ実験を行ったところ、振幅変調モデルの方が短い時間で不可視対象へ到着できることが分かった。

キーワード: 力触覚ナビゲーション、首触覚、Hapbeat、ウェアラブル、方向・距離

1. モチベーション

首掛け型デバイスは装着が容易で負荷が少ないため日常的な利用に適しており、また装着者の動きを妨げないため、首への力触覚提示により効果的な情報提示が実現することで、従来の情報提示手法を妨げることなく入力可能な知覚情報を拡大することができ、新たな応用が期待される。Bove、Ivanenko らによって首側面に振動を加えることで、立位姿勢、歩行速度、歩行経路に影響を及ぼすことが知られている [1, 2]。また Reza が小型振動子をアレイ状に配列した首輪型装置を発明している [5]。従来の触覚ナビゲーション手法では小型振動子がアレイ状に配置された装置を用い、振動の位置、ON/OFF の周期、持続時間、振幅、周波数といったパラメータを調整することで情報提示を行ない細かな情報を伝えることが可能だが [4]、装置自体に多数の振動子が必要で身体に押し付け続ける必要があることから装着負荷が高く、日常的な利用には向かない。また Kelly によって首の空間分解能はおおよそその刺激位置の特定が可能な程度であることが示されているため [3]、知覚特性の面でも従来手法は首に提示するにあたり最適であるとは言えない。そこで我々は振動の振幅、位相、周波数を動的に変調させる事で特定の対象 (以後、対象と略す) への方向と位置を伝えるアルゴリズムを提案する。その有効性の検証のため、本研究では実験 1 にて首の触知覚における分別可能な振動の位相差および強度差を検証し、実験 2 にて 2 つの変調モデルを用いて触覚情報のみを頼りに不可視対象に辿り着かせる実験を行い、その到達時間を測定した。

2. 提案手法

プレイヤーと対象の位置関係を示した図 1 左の方位角 θ および距離 d を変数として、正弦波の包絡線の位相差 (方向) と周波数 (距離) を変調する包絡線変調モデル (Envelope Modulation、以後 EM と略す) および正弦波の左右の振幅差 (方向) と全体の振幅 (距離) を変調する振幅変調モデル (Amplitude modulation、以後 AM と略す) の 2 種類を提案する。EM の位相差および AM の振幅差は人の聴覚特性を参考にしており、EM の周波数変調はソナー、AM の振幅変調は音の距離減衰を参考にしており、その波形変化の様子を図 1 右に示す。一般式を下記式に示し、具体的な式は実験の章にて記す。

$$F_M(d, \theta, t) = A_D(d, t)A_{\theta_{L,R}}(\theta, t)f_{Base}(t) \\ (-\pi < \theta < \pi, 0 \leq d, 0 \leq t)$$

ここで、 $A_D(d, t)$ は距離 d によって振幅や包絡線周波数などを変調する関数、 $A_{\theta_{L,R}}(\theta, t)$ は方位角 θ によって左右の提示波形の振幅、位相遅れ、包絡線周波数などを変調する関数、 $f_{Base}(t)$ は変調される正弦波 (この周波数をベース周波数と呼ぶ) である。

3. 実験 1 : 首両側面への非対称刺激の分別実験

本実験では前述の変調モデルで利用する首両側面への非対称刺激の分別可能な閾値 (以後、分別能) を検証するため、図 2 に記すパラメータの組み合わせからなる信号波形を用いて調査した。包絡線位相差分別実験 (以後、実験 1E) は波形 56 通り各 3 回ずつの計 168 回、振幅差分別実験 (以後、実験 1A) は波形 24 通り (40Hz の 5:5、160Hz の 5:6

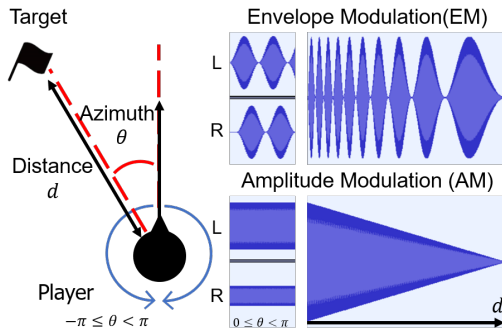


図 1 左：システムで使用する方位角 θ と距離 d
右：提案モデルの θ, d に基づく変調例

は各 2 回ずつ) 各 3 回ずつの計 72 回試行された。実験中各試行において提示波形は再生時に 1 秒間かけてフェードインし、9 秒間再生され続けた後停止された。参加者は 19-30 代の男性 8 名、20 代の女性 1 名の計 9 名であった。

Stimulus order	Vibration type	Envelope phase delay	
		1Hz	3Hz
R2L	1-40Hz	1/2T	500 167
L2R	1-160Hz	3/8T	375 125
	3-40Hz	1/4T	250 83
	3-160Hz	1/8T	125 42
		1/16T	63 21
		1/32T	31 10
		0T	0 0

T = periodic time of the envelope (msec)

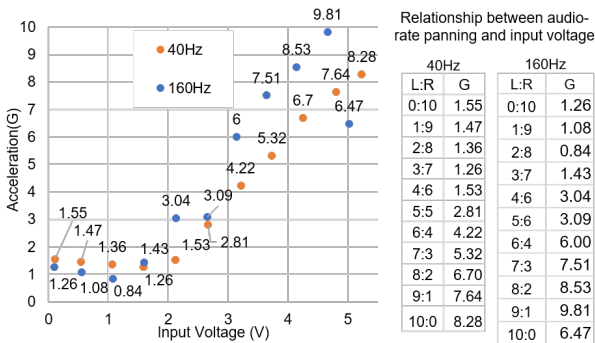
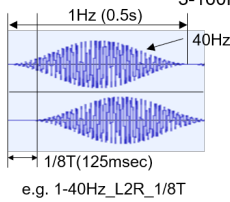


図 2 実験 1 で使用する波形のパラメーター一覧
(上) 左右の包絡線位相差 (下) 左右の振幅差

3.1 装置構成

システム構成図を図 3 上に示す。本研究では力触覚提示装置として、ネックレス型力触覚ディスプレイ Hapbeat-Duo を用いた。これは筆者が過去に提案したモータと糸による張力変動型力触覚提示機構 [6] を応用したネックレス型装置で、首の両側面に独立した力触覚提示を行う事が可能である。音源出力には USB DAC (FIO-BTR3-B, FiiO Electronics) を用いた。加速度測定にはアナログ 3 軸加速度センサ (MMA7361LC) を用いて 3 軸の RMS 値 (重力加速度 G) を導出しそれらを加算して求めた。実験プログラムは Unreal Engine 4 を用いて作成し、乱数の生成、振

動信号の提示、回答、実験結果の記録を行った。

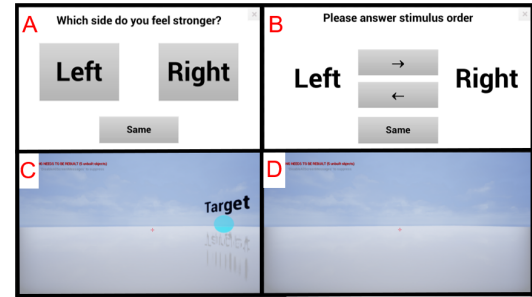
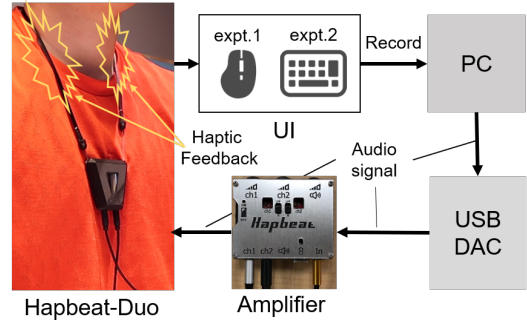


図 3 (上) システム構成 (下) 実験中の UI

3.2 実験 1 手順

始めに参加者に Hapbeat-Duo を装着させ次の事項を実験で提示する波形の 1 例を再生しながら口頭で説明した：(1) 振幅差検証の際には強く振動が感じられた方のボタンを押し、等しく感じられたら same ボタンを押すこと。(2) 包絡線位相差検証の際には先に感じられた側から反対側に向かう矢印のボタンを押す。左右の振動に区別がつかない場合、Same を押す。(例：左側で先に感じたら→ボタンを選択する。左右同時もしくは交互に感じたら場合 same ボタンを選択する。) 次に図 3 下 A,B に示す実験形式で試行毎の回答後にその正否を表示することで、知覚された提示波形に対する正解を学習させた。その後参加者ごとに実験 1A, 1E いずれかから始め、終了後もう片方の実験に連続して移行した。本番中は聴覚による影響を抑制するため、ヘッドホンからホワイトノイズを流し、音量は参加者に不快にならない程度の音量になるよう調整させた。実験開始後は終了まで参加者に実験の進行を任せた。

3.3 実験 1 結果

図 4 に実験結果を示す。実験 1A について、40Hz の 5:5 では same、それ以外では左右振動が強い方を回答できていれば正解となる。7:3 以上のパンニング比、すなわち首両側面での加速度が 6G 以上異なる場合、正答率が 90 % を超えることが分かった。また回答時間が 1.47 秒から 2.10 秒程度であり、始め 1 秒間がフェードイン中であることを考慮すると、知覚してから 1 秒程度の短期間で分別できていることが分かる。実験 1E について、1/2T および 0 の時は Same、それ以外は左右の正しい方向を選択できていれば正解となる。包絡線周波数が 1Hz の場合において、位相差が 3/8T から 1/8T の場合はいずれも正答率が 87 % 以上であった。特に位相差が 1/4T (250msec) の際は回答時間が他の位相

差の場合より1秒ほど短かった。包絡線周波数が3Hzの場合に左右の位相差を分別できた場合の正答率が高くて50%程度であった。

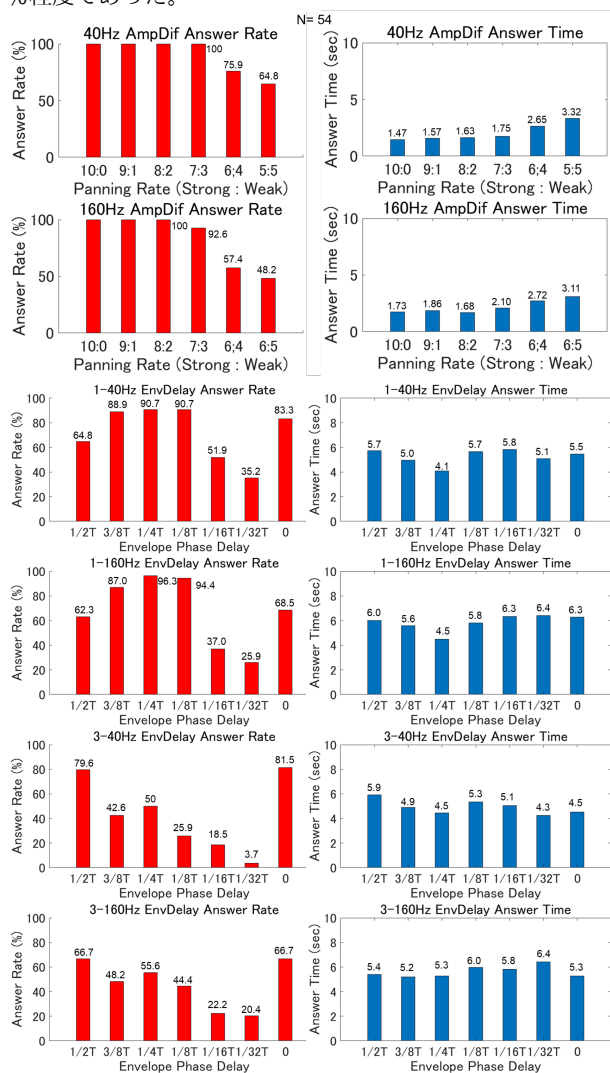


図4 実験1結果 (左) 回答率 (右) 回答時間

3.4 実験1考察

実験1Aに関して、正答率および回答時間からパニング比が7:3と6:4、すなわち左右の加速度差が3Gから6Gの間に分別可能な閾値がある可能性が高い。しかし、40Hzと160Hzで正答率に差があることから、加速度だけではなく皮膚の変位量によって分別能が左右されている可能性がある。実験1Eに関して、位相差が3/8Tから1/8T(1/2Tおよび0との位相差が125msec以上)の場合とそれ以外とで大きく正答率が異なっていることから、125msecから63msecの間に分別能が存在している可能性が高い。また、位相差が短くなる包絡線周波数が3Hzの際に正答率が下がるのは予想通りであったが、1Hzの際に正答率が良かった125msecの位相差と同様の3/8Tの場合でも正答率が50%ほどと分別できていないことから、時間差だけでなく包絡線周波数そのものによる影響がある可能性があるため、位相差と時間差が分別可能な閾値にどのような関係があるかを調査す

る必要がある。

4. 実験2:提案ナビゲーションシステムの評価

本実験では包絡線変調 (Envelope Modulation, EM)、振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) の2種類のモデルを使用し対象への到着時間を測定することでモデルの有用性を評価した。参加者は実験1の被験者に含まれる20代男性3名、20代女性1名の計4人で行われ、実験1終了後小休止を挟み実験2を行った。

4.1 モデル式および各パラメータ

本実験ではAMとEMについて下記式を用いた。

$$AM(d, \theta, t) = A_1(d) C_3(C_4 \pm C_5 |\sin \theta|) \sin \omega t$$

$$EM(d, \theta, t) = C_6 \sin(A_1(d) C_7 t \pm C_8 \theta) \sin \omega t$$

$$A_1(d) = \left(C_1 - \frac{d}{C_2} \right)$$

$$C_1 = 0.6, C_2 = 600, C_3 = 1.2, C_4 = 0.4, C_5 = 1.0, C_6 = 1.3, C_7 = 0.25, C_8 = 0.5$$

C_5 および C_8 の符号の正負により、首両側面に提示される振動が個別に変調される。 ω は対象がプレイヤーの前方にあるときに $80\pi t$ (40Hz)、後方に場合に $320\pi t$ (160Hz) とし、ベース周波数によって前後の区別を可能とした。実際に被験者に伝達される加速度の大きさは、EMにおいて40Hz=3.97G、160Hz=8.3G (いずれも最大振幅時) であり、AMにおいては40Hz (前側) 0.43から9.89G、160Hz (後ろ側) 1.21から13.88G程度である。また各試行開始時の対象までの距離は常に3mであり、プレイヤーの速さは2.4m/s、回転速度は50(deg/s)であった。

4.2 実験2手順

最初に2つの振動パターンについて、対象を表示した状態 (図3下C) で (1) 操作方法 (左右の矢印ボタンで旋回、上下の矢印ボタンで前後移動) (2) 対象がプレイヤーの前方にある場合は40Hz、後方では160Hzが提示されること (3) 真正面もしくは真後ろにある場合左右の振動が等しくなること、について口頭で説明を行い、被験者が理解した時点 (約3分程度) で実験に移った。実験中は図3下Dに示すよう対象を非表示にした状態で対象を探そう伝えた。その他システム構成、装着物は実験1と同様である。被験者はAMもしくはEMから開始し、24回の試行後続けてもう片方のモデルでの実験を行った。対象の設置位置の距離は毎回同じ値 (3m) とし、予め作成しておいたランダム配列により、初期配置 (θ) を決定した。EMとAMでは同じランダム配列を用いているため、配置の順番による影響は無視できる。

4.3 実験2結果

実験結果を図5に示す。図中のTotalTimeは各試行を終えるまでに要した時間、NearTimeは対象まで1m以内に近づくまでに要した時間を示す。いずれの被験者の場合もAMの方が明らかにEMよりも短い到達時間で到着していた。

4.4 実験2考察

安定して20秒未満で到達できていたAMに比べ、EMは試行毎の到達時間のばらつきが激しい結果となった。ピ

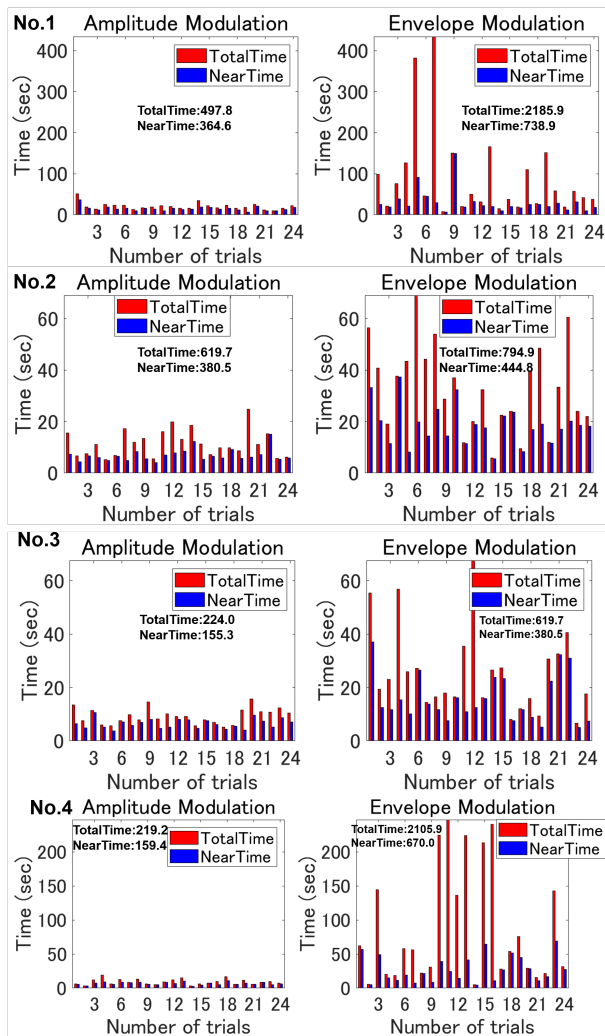


図5 実験2結果

デオ分析により、EMの場合対象に近づくほど包絡線周波数が高くなり、左右分別が困難になったことが想像できる。これは実験1で包絡線周波数が1Hzの方が3Hzよりも正答率が良いこと、実験2の結果でのTotalTimeとNearTimeの差が非常に大きい、すなわち1m以内まではスムーズにたどり着けるが、その後場所を特定するまでに時間がかかる試行が複数回現れることから説明できる。また複数の被験者が、EMの方が難しく、特に対象に近づくにつれ方向が分からなくなる、とコメントしている。よってEMだけを距離や方向によってAMとEMを動的に切り替える、もしくは併用するのが効果的であると考えられる。また実験前の仮説では試行回数が増えるにつれ学習し、到達時間が短くなることが予想されたが、そのような傾向を見られなかった。この理由として始めの短時間のチュートリアルで十分に学習できたことが考えられ、直感的な提示手法であることが言える。

5. 結論

本研究では首の触知覚を用いたナビゲーションシステムの提案を行うため、まず実験1にて首両側面への非対称刺激の分別能を検証し、実験2にて振幅差および包絡線位相

差に焦点を置いた2つの変調モデルを用いてナビゲーションへの応用性を到達時間をもって検証した。結果、今回の9名の実験参加者はいずれも位相差は125msec以上、振幅差は6G以上かつ包絡線周波数が1Hzであるときに87%以上の確率で分別可能なことが分かった。またナビゲーション実験ではAMモデルは上手く機能したが、EMモデルは詳細な位置の特定には不向きであることが判明した。包絡線周波数が低い状態であれば十分に左右の分別が可能であるため、AMでは表現できない状態（例えば対象までの距離が非常に遠く、全体の振幅が小さ過ぎて左右の分別が行えないなど）において互いに補完できる可能性は大きい。一方でいずれの参加者も3分程の説明により触覚情報だけで対象に到着できたため、本手法は直感的で分かりやすい情報提示であるといえるだろう。今回の結果を元に、今後はより詳細な分別能の検証や効果的な変調モデルを検証していく。またVR環境での活用を想定した場合に、HCIの操作による移動と自己の歩行動作を伴った移動とでは対象へのアプローチが大きく異なり、最適な変調モデルが異なる可能性があるため、両者の場合についての比較検証も併せて行っていく。

参考文献

- [1] Marco Bove, Manuela Diverio, Thierry Pozzo, and Marco Schieppati. Neck muscle vibration disrupts steering of locomotion. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 91, No. 2, pp. 581–588, 2001.
- [2] Yuri P Ivanenko, Renato Grasso, and Francesco Lacquaniti. Neck muscle vibration makes walking humans accelerate in the direction of gaze. *The Journal of physiology*, Vol. 525, No. 3, pp. 803–814, 2000.
- [3] Kelly Morrow, Daniel Wilbern, Reza Taghavi, and Mounia Ziat. The effects of duration and frequency on the perception of vibrotactile stimulation on the neck. In *2016 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 41–46. IEEE, 2016.
- [4] Simon Schätzle and Bernhard Weber. Towards vibrotactile direction and distance information for virtual reality and workstations for blind people. In *International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction*, pp. 148–160. Springer, 2015.
- [5] Reza Taghavi. Tactile communication device for the neck, January 6 2015. US Patent 8,926,330.
- [6] Yusuke Yamazaki, Hironori Mitake, and Shoichi Hasegawa. Tension-based wearable vibroacoustic device for music appreciation. In *International conference on human haptic sensing and touch enabled computer applications*, pp. 273–283. Springer, 2016.