

頭部への振動刺激を用いた方向情報提示手法に関する実験研究

松岡 和宏^{*1} 鶴田 将之^{*1} 石井 裕剛^{*1} 下田 宏^{*1} 吉川 榮和^{*1}

An Experimental Study on Directional Information Presentation Techniques using Vibrotactile Stimulation to the Head

Kazuhiro Matsuoka^{*1} Masayuki Tsuruta^{*1} Hirotake Ishii^{*1} Hiroshi Shimoda^{*1} Hidekazu Yoshikawa^{*1}

Abstract – In this study, two techniques have been proposed for presenting high-resolution directional information using vibrotactile stimulation to the head by plural vibrating motors. One is two-motor technique that presents directional information by vibrating two motors simultaneously and the other is single motor technique that presents directional information by vibrating only one motor depending on the presented direction. In order to evaluate and compare these techniques, a prototype navigation system which employs 8 small vibration motors has been developed and some laboratory experiments with subjects have been conducted. As the results, it was found that the presented direction can be recognized by the single motor technique more quickly and accurately than that by the two-motor technique independent of the number of the directional division.

Keywords : Vibrotactile Stimulation, Vibration motor, Sense of direction, Stimulation on the head

1. はじめに

近年、コンピュータの小型化が進み、ウェアラブルコンピュータと呼ばれる装着可能な情報端末が注目されている^[1]。また、計算機技術や位置計測技術の急速な発展を受け、自身の現在地点や目的地までの方向、距離といった空間情報をリアルタイムに取得できるシステムが急速に普及している。これらのことから現在、空間情報や建造物への注釈情報などの仮想情報を人間に提示するための、装着可能なまたは手軽に携帯できるシステムの開発が進められている。

現在開発されているこのようなシステムは、その多くが視覚によって情報を提示するものである。視覚は、一度に大量の情報を、人間にとって最も自然な形で認識させられる。そのため、情報提示の手法に関する研究や開発は視覚を用いるものが中心となってきた^{[2][3]}。

しかし、視覚的に情報を提示する方法にはその応用先により問題もある。例えば、ナビゲーションシステムを使用する場合、システムから与えられる情報と現実空間における周囲環境の情報を照らし合わせながら移動する必要がある。人間は周囲の環境からの情報収集の大部分を視覚に頼っているため、提示された情報への注意量が多くなると、本来得られるはずの周囲環境の情報が認識できなくなる。こういった本来の視界を損なう問題は、ナビゲーションシステムにおいては身の危険にもつながりうる。

一方で、現在では人間の他の感覚を用いた仮想情報提示に関する研究も活発になっている。特に触覚は、視覚に比べて一度に提示できる情報量は少ないが、提示された情報に対する注意量も少なく済み、ユーザの周囲環境からの情報取得を阻害しない。また、触覚はユーザの状態によらず常時認知可能であるため、ユーザに注意を喚起させることができる。さらに聴覚や嗅覚に比べ、周囲の環境によって情報提示が阻害されることが少ないなどという利点がある。このため、例えば装着可能な情報端末から、自分の進むべき方向のような情報量が少なく済み情報を得たい場合などは、視覚や聴覚よりも触覚を用いる方が適している。

触覚により空間情報を提示する研究として次のようなものがなされている。Robert W. Lindemanらは軍隊において兵士に何らかの情報を伝えるという軍事利用目的で、Tacta ArmBandを開発している^[4]。これは腕部に装着して振動刺激を提示するものである。またErin Piatetskiらは腕部と腰部に対して方向情報を提示する実験を行っている^[5]。この実験は腕部には 3×3 、腰部には 4×4 個の振動モータを装着して振動するモータの列を順にずらすことで、上下左右の方向情報を提示するものである。塚田らは振動刺激を用いたナビゲーションシステムとして、ActiveBeltという腰部装着型の方向情報提示デバイスを開発している^[6]。これは8個の振動モータを用いてユーザの周囲8方向を提示するものである。

しかし、腰部や腕部は触覚刺激に対して鈍感な部位

^{*1}: 京都大学大学院 エネルギー科学研究科

^{*1}: Graduate School of Energy Science, Kyoto University

である^[7]。また全方向の方向情報を提示する場合には、腕部では直感的な理解が難しいと考えられる。

これに対し、頭部は触覚刺激に敏感な部位である^[7]。さらに、中心軸が人間の体の中心であるため、全方向の方向情報を直感的に認識できる。よって、方向情報を頭部に対して提示することで正確な情報の認識が期待できる。

頭部への振動刺激を用いた空間情報提示の既存研究としては、乙部らが行った農作業時に視界を妨げない情報提示機構の研究^[8]が挙げられる。しかしこの研究は2つの振動モータを用いて左右2方向の方向情報を提示するものであり、頭部に対して全方向の空間情報を提示する研究は行われていない。人に空間情報を提示する場合、その多くは未知の情報であるため、全方向からの情報取得が重要となる。特に、危険察知のシステムであれば必須である。

そこで本研究では、頭の向きの変化に追従した方向情報を、振動刺激を用いて頭部へ提示する手法を提案する。また、頭部に方向情報を提示した場合の方向分解能と、適切な情報提示の手法を調べることを目的とする。

2. 頭部への方向情報提示手法の提案

本研究では少数の振動モータを頭部周囲に固定して用いる手法を提案する。ここでは基本的に振動するモータのある方向が提示された方向を示すとする。こうすることで、単純に1つのモータを振動させるだけで振動モータの個数分の方位を提示することが可能となる。振動モータの個数は、人間の方位感覚から、前後左右の4個、またはさらにその間の方向を含めた8個が妥当である。4個より少なければ、全方向を提示するのは容易ではないし、8個より多いと、配線が複雑になったり装着が容易でなくなる。

振動モータの数より多くの方位数を提示する場合には、その方位数を4個ないし8個の振動モータで提示する工夫が必要である。以下にそのための2つの手法を提案する。

2.1 複数モータ振動方式

本研究で一昨年度行った振動触覚刺激を用いた空間情報提示に関する基礎実験研究において、頭部へ振動触覚刺激を与えた場合、人間は2段階の振動の強弱を正しく認識できるという知見が得られた。これを応用した手法が複数モータ振動方式である。

複数モータ振動方式は、同時に2つのモータを振動させることによって提示する方位数を増やす手法である。振動モータのある方向を提示する場合には、その方向にある振動モータ1つだけを振動させる。振動モータがない方向を提示する場合には、その方向を挟

む2つの振動モータを、振動の強さを変えて同時に振動させる。このとき提示する方向に、より近い側のモータを強く振動させるようにする。例として図1に8個の振動モータによる方向提示の様子を示す。

複数モータ振動方式では、常にいずれかのモータが振動しているため、大まかな情報取得は常時可能である。しかし前述のように、頭部へ振動触覚刺激を与えた場合、正確に認識できる振動の強弱は2段階であるため、それ以上の振動の強弱の変化を必要とする方位数を提示した場合には、振動の強弱の変化を認識できないおそれがある。少数のモータで細かい方向を提示する場合には、より細かな振動の強さの変化が必要のため、この欠点は顕著になると予想される。

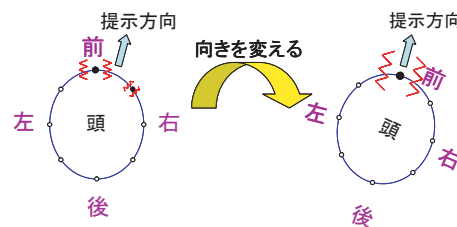


図1 複数モータ振動方式
Fig.1 Two-motor technique

2.2 単一モータ振動方式

これに対して、振動の強さを固定して1つのモータのみで方向情報を提示する手法が単一モータ振動方式である。単一モータ振動方式では、振動モータのある方向が提示方向と重なった場合にのみ、モータを振動させる。例として図2に8個の振動モータによる方向提示の様子を示す。

単一モータ振動方式は、デジタル的に方向情報を提示する。このため複数モータ振動方式に比べ、提示された方向がはっきりと認識できると期待される。しかし、振動モータのない方向を提示した場合には、頭の向きを変えて提示方向を探索しないと全く情報が得られないため、方向情報の取得までに時間がかかるおそれがある。モータの数が少ない場合には、頭の向きを大きく変えないと振動モータのある方向と提示方向が重ならない場合があるため、この欠点は顕著になると

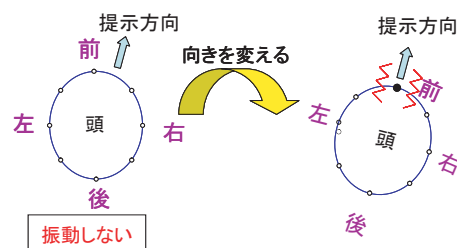


図2 単一モータ振動方式
Fig.2 Single motor technique

予想される。

本節では2つの方向情報提示手法を提案したが、それぞれに長所と短所がある。そのため、これら2つの手法による方向情報提示の特徴を明らかにする評価実験を行った。

3. 提案手法の評価実験

3.1 実験の目的

頭部への振動刺激を用いた方向情報の提示において、提案手法を用いれば、他の部位に情報を提示した場合に比べ、頭の向きを変えるだけで容易に情報の「探索」や「確認」ができるため、より正確な方向情報の取得が期待できる。このことから本実験では、提案手法による方向情報提示実験を行い、人間が正確に認識できる提示方位数を調べる。また、詳細な方向情報を提示する場合には、複数モータ振動方式、単一モータ振動方式のどちらが適切であるか、それぞれの手法について実験を行い、評価する。

本実験では、8個の振動モータを用いた方向情報提示を行う。これは4個の場合と比べ、2章で述べた複数モータ振動方式、単一モータ振動方式の両手法におけるそれぞれの欠点が軽減できるためである。実験は8方位、16方位、24方位、32方位について行う。

3.2 実験システムの構成

まず評価実験を行うために作成した実験システムを説明する。

振動モータ

本実験では振動子として振動モータFM34Fを用いた。振動モータは同じ型番のものであっても、同じ電圧を印加した場合の振動の特性が異なる場合がある。そのため、各モータの振動の強さの特性を調べる予備実験を行い、同じ特性を持つ8個の振動モータを選出した。

複数モータ振動方式では、16方位なら2段階、24方位なら3段階、32方位なら4段階の振動の強さの変化が必要であるため、モータの制御をPWM制御で行った。本実験ではモータの振動の強さを16段階に調節できるようにし、人が、2段階の変化であれば強さが2倍に変化すると、3段階の変化であれば強さが2倍・3倍と変化すると感じるような印加電圧値を選び、使用した。また、各振動の強さにおいて、振動を頭部に提示した場合に、モータが振動していると認識できることを確認した。

システム構成

実験システムの構成を図3に示す。実験システムは、頭の向き情報を取得するためのジャイロセンサ、振動させるモータとその強さの情報を決定し出力するホストPC、ホストPCからの信号によりモータを振動さ

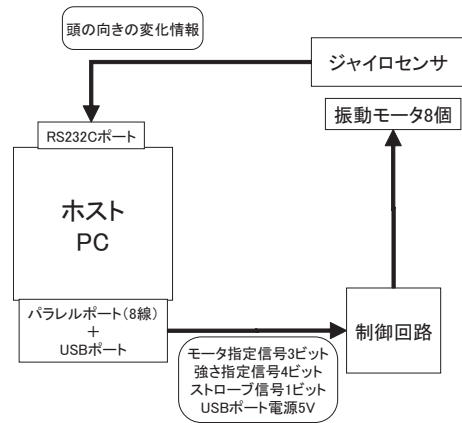


図3 システムの構成
Fig. 3 Configuration of the system.

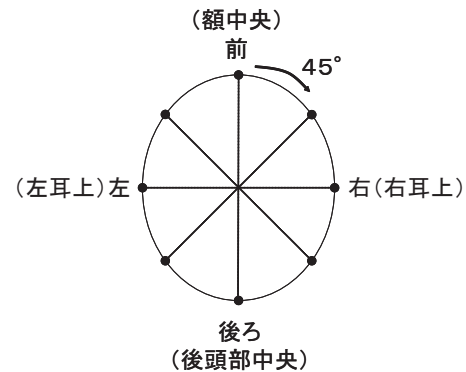


図4 振動モータの装着位置
Fig. 4 Position of vibration motors.

せる制御回路、8個の振動モータから構成される。振動モータを装着する位置は、図4に示すように、額中央、右耳上、後頭部中央、左耳上の4箇所と、さらにその各モータの間の4箇所とし、皮膚に直接モータを当ててゴム製のヘアバンドで固定した。ジャイロセンサはInterSense社製のInertiaCube3を使用し、頭頂部に装着した。

方向情報提示のアルゴリズム

次に方向情報提示のアルゴリズムを述べる。方向情報提示開始時には、頭は体の正面を向いているものとする(以下、情報提示開始時のこの状態を初期状態と呼ぶ)。

まず、頭頂部に装着したジャイロセンサによって、初期状態から変化した頭の向きの角度情報を取得する。取得した情報はRS232Cポートを通じてホストPCに送る。ホストPCでは、得られた角度情報に応じて振動させるモータと振動の強さを決定し、8ビットの信号としてパラレルポートから制御回路に出力する。制御回路では、入力信号に応じて指定されたモータに指定された電圧を印加し、モータを振動させる。

このアルゴリズムによって、頭の向きの変化に追従

した方向情報の提示が可能である。

提示方向

今回の実験では、提示方向は、 360° を提示方位数で割った角度の範囲を持つものとした。例えば、8方位提示の場合であれば、各方向は 45° の範囲を持ち、正面の方向は、頭の向きが初期状態のときを 0° として、 $-22.5^{\circ} \sim 22.5^{\circ}$ の範囲となる。他の方位数でも同様に、16方位提示であれば各方向は 22.5° の範囲を、24方位提示であれば 15° の範囲を、32方位提示であれば 11.25° の範囲を持つ。

3.3 実験条件

実験は8方位提示、16方位提示、24方位提示、32方位提示について行う。本実験では8個の振動モータを使用するため、8方位提示に関しては複数モータ振動方式、単一モータ振動方式の区別がないので、1回のみ実験を行う。16方位提示、24方位提示、32方位提示については、複数モータ振動方式、単一モータ振動方式それぞれの手法について1回ずつ実験を行う。

3.4 実験手順

実験は、被験者をAグループ・Bグループの2つのグループに分けて行う。Aグループの実験の流れを図5に示す。Bグループは、複数モータ振動方式と単一モータ振動方式の順番を入れ替えて行った。

実験は起立姿勢で行うものとする。各情報提示開始時には実験者の合図によって、被験者は壁に定められた印に対して顔と体の正面を向ける。また、被験者が頭の向きを変える際は、視線は水平を保つものとした。

まずウォーミングアップとして、全方向を正面の方向から順に時計回りに1回ずつ、被験者に提示方向を教えながら提示する。各提示は、被験者が提示された方向の確認が取れるまで行う。

次に練習として各提示手法とも8回の情報提示を行う。提示する方向はランダムに選ばれた同一でない8方向とする。各提示は実験者の合図とともに始まり、被験者は提示された方向が分かった時点で実験者に声で合図を送る。被験者の合図があった時点で情報提示を終了する。提示開始から被験者の合図までの時間を、回答にかかった時間として計測する。また、被験者は提示されたと感じた方向を回答用紙に記入する。回答用紙には各提示方位数分に放射状に区切られた円が描かれており、回答は提示されたと感じた方向の扇形を選択するものとした。被験者が回答を行ったあと、被験者に提示方向の正解を教える。

その後本試行に移る。本試行では練習と同じ手順で、全方向をランダムに1回ずつ提示する。但し、本試行では被験者に回答が正解か不正解かは教えない。

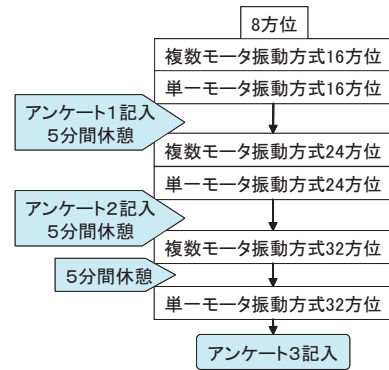


図5 Aグループの実験の流れ
Fig. 5 Flow of experiment for A group.

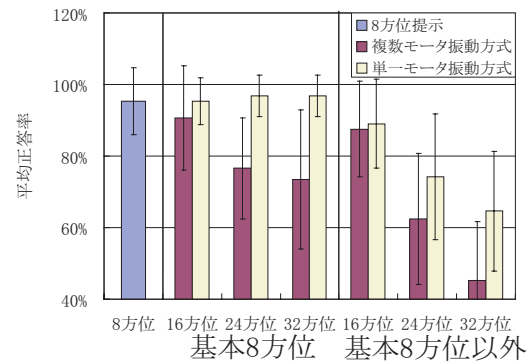


図6 平均正答率
Fig. 6 Average of correct answer rate.

3.5 被験者

被験者は20代の男性6名、女性2名とした。全被験者とも頭部に皮膚疾患は無く、また平衡感覚にも異常はない。その他、視覚障害や聴覚障害なども有していない。

4. 実験結果

実験結果を計測指標ごとに示す。

4.1 正答率

提示された方向を正しく回答した割合を正答率とする。

単一モータ振動方式では、初期状態において振動モータのある方向（以下、基本8方位と呼ぶ）を提示した場合、提示された方向を探索しなくても、8個のモータのうちいずれかのモータが振動する。このことから、基本8方位は他の提示方位と異なる特性をもつと考えられる。よって図6に基本8方位の全被験者の平均正答率と基本8方位以外の全被験者の平均正答率を分けて示す。

基本8方位においては、単一モータ振動方式は全ての提示方位数において8方位提示の場合と同様の高い平均正答率となったが、複数モータ振動方式は提示方位数が増えるにつれて平均正答率は低くなった。また、

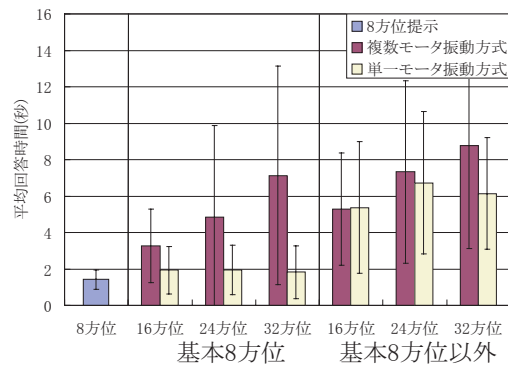


図7 平均回答時間

Fig.7 Average of response time.

基本 8 方位以外の提示方向については、32 方位提示実験において単一モータ振動方式の平均正答率の方が複数モータ振動方式に対して有意に高く (t 検定 $p < 0.05$)、16 方位、24 方位提示実験においては両手法に有意差はなかった (t 検定 $p < 0.05$)、どちらの提示方位数の実験においても単一モータ振動方式の平均正答率の方が高かった。

4.2 回答時間

回答時間においても正答率と同様、基本 8 方位について異なった特性がみられると予想されるため、図 7 に基本 8 方位の全被験者の平均回答時間と、基本 8 方位以外の提示方向の全被験者の平均回答時間を分けて示す。

基本 8 方位では単一モータ振動方式は全ての実験において、8 方位提示実験の平均回答時間と同程度の回答時間であり、複数モータ振動方式に対して有意に短かった (t 検定 $p < 0.05$)。複数モータ振動方式は、提示方位数が増えるにつれて、回答時間が長くなった。基本 8 方位以外の提示方向については、いずれの提示方位数の実験においても両手法に有意差はなかった (t 検定 $p < 0.05$)。しかし、複数モータ振動方式が提示方位数が増えるにつれて回答時間も長くなったのに対し、単一モータ振動方式では平均回答時間の増加はなかった。

4.3 正解からのずれ

各提示手法について、被験者の回答が正解の方向からどれだけずれていたかを、図 8、図 9 に提示方位数ごとに示す。

単一モータ方式 16 方位提示実験を除き、全ての実験において、1 方位分のずれが最も多く、2 方位分、3 方位分となるにしたがって少なくなっていく傾向がみられた。単一モータ方式 16 方位提示実験においては 2 方位分 (45°) のずれが 1 方位分のずれよりも多かった。

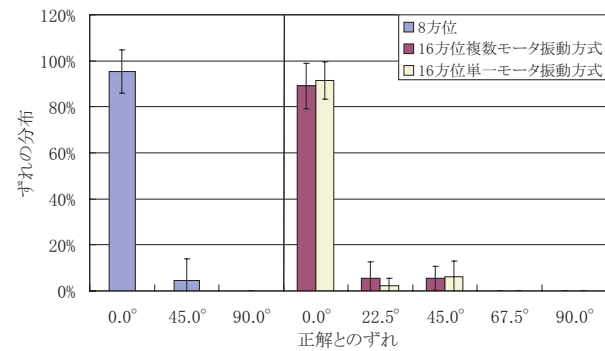


図8 8 方位・16 方位提示実験における正解とのずれの分布

Fig.8 Distribution of gap with correct answer in experiment which the system provided 8 and 16 directions

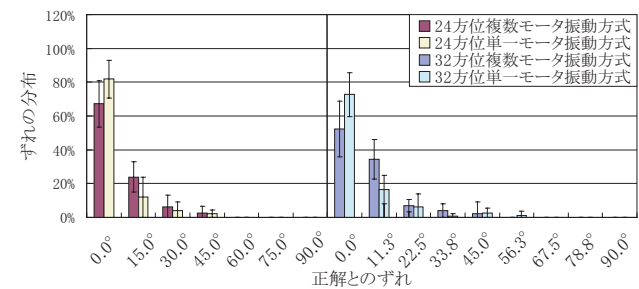


図9 24 方位・32 方位提示実験における正解と
のずれの分布

Fig.9 Distribution of gap with correct answer in experiment which the system provided 24 and 32 directions

5. 考察

5.1 提示手法について

基本 8 方位の提示では、単一モータ振動方式の平均正答率と平均回答時間は、どの提示方位数の実験でも単なる 8 方位提示と同様の、高い正答率と短い回答時間となった。これに対して複数モータ振動方式では、提示方位数が増えるにつれて平均正答率は下がり平均回答時間は長くなった。この結果は、単一モータ振動方式では提示方位数に関わらず提示方向を探索する必要がないのに対して、複数モータ振動方式では方向を探索しないと十分に認識できず、また提示方位数が増えるとその精度が下がることを示している。よって、基本 8 方位に関しては単一モータ振動方式の方が素早く正確な情報取得ができたと言える。

基本 8 方位以外の方向の提示に関して、平均正答率は、下がり幅に差はあるものの、どちらの手法でも提示方位数が増えるにつれて単調に下がっている。しかし、平均回答時間は複数モータ振動方式では提示方位数が増えるにつれて単調に増加しているのに対して、

単一モータ振動方式では提示方位数に関わらず変化が見られない。このことから、提示方向を正確に回答しようとする場合、単一モータ振動方式では提示方位数に関わらず6秒程度である程度の方向を推測し回答できるが、複数モータ振動方式では24方位提示以上は方向を推測することさえ困難であったと考えられる。但し複数モータ振動方式でも16方位提示であれば、単一モータ振動方式と同程度の正答率と回答時間となっている。これは振動の強さの変化が2段階のみであれば、方向の探索は必要であるが、提示方向の認識は容易であることを示している。

5.2 正解からのずれの分布について

24方位、32方位提示において、複数モータ振動方式では1方位分のずれの割合が、単一モータ振動方式のそれに比べ、大きい結果となった。これは2章で述べた、人間が頭部において正しく知覚できる振動の強弱は2段階までという知見から、24方位、32方位提示では振動の強弱の変化の幅が小さいために、最も強く振動する方向が正確には分からなかったものと言える。また、弱い振動が強い振動に掻き消され、認識しにくくなっていることも考えられる。

16方位提示においては他の提示方位数の実験と異なり、2方位分のずれが大きな割合を占めている。これについては以下の2つの原因が考えられる。まず、基本8方位を提示した際に、振動したモータを勘違いした場合である。これは、8方位提示においても誤答が存在することから、十分にありうるものである。これに起因する誤答が、全被験者の合計で複数モータ振動方式において2回、単一モータ振動方式において3回あった。次に考えられるのは、基本8方位以外の8方位を提示した際に誤答した場合である。これについての原因は、被験者から次のような意見が得られたことから、今回の実験における回答方法にあると考えられる。本実験では被験者が回答を回答用紙に記入するという回答方法であったが、被験者が回答用紙に記入する際、被験者は頭の方向を正面に戻した状態で行っていた。そのため、方向を確認したときに自身が左右どちらの方向に頭を向けていたか分からなくなって混乱したというものである。これに起因する誤答は複数モータ振動方式で5回、単一モータ振動方式で5回あった。

6. まとめと今後の展望

本実験により、複数モータ振動方式より単一モータ振動方式の方が素早く正確に方向情報を認識できる傾向にあることが示された。また、16方位までであれば、両手法とも正確な方向情報の認識が可能であることが分かった。但し、単一モータ振動方式には、「方

向情報の提示開始時がわからず、常時認知可能という触覚の利点を損なっている」という欠点がある。しかし、情報提示の開始時に全てのモータを振動させるなどといった、ユーザへの注意喚起を行うことによって、この欠点を補うことは可能であると考えられる。

今後は、単一モータ振動方式についてさらに実験を進めていく予定である。今回の実験では提示する方向は最大で32種類と制限していた。しかし、提示方向の $\pm x^\circ$ の範囲にモータがあればそのモータが振動する単一モータ振動方式は、方向を自由に提示することができ、より実用的な方向情報の提示が可能である。また、回答方法を、提示されたと感じた方向を矢印で示すようにすれば、回答が提示した方向から何度ずれていたかを正確に計測できる。

さらに今回の実験では提示した方向情報が正確に認識できるまでの時間を計測したが、情報提示に制限時間を設けることで、「どのくらいの時間があればどの程度正確に方向情報を認識できるか」という情報を調べることができる。これにより、「何秒で方向情報を得たい場合にはどの程度の誤差範囲内で方向が認識できるか」という、アプリケーションを作る上で重要な情報を得ることができると期待される。

参考文献

- [1] 板生清, "ウェアラブル・コンピュータとは何か", NHK出版, 2004.
- [2] Enrico Rukzio, Albrecht Schmidt, Antonio Kruger: The Rotating Compass: A Novel Interaction Technique for Mobile Navigation, CHI '05: Extended abstracts of the 2005 conference on Human factors and computing systems, Portland, Oregon, USA: ACM Press, pp. 1761-1764, 2005.
- [3] 天目 隆平, 神原 誠之, 横矢 直和, "「平城宮跡ナビ」マルチメディアコンテンツを利用したウェアラブル型観光案内システム", ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 1, pp. 30-35, 2005.
- [4] Robert W. Lindeman, John L. Sibert, Corinna E. Lathan and Jack M. Vice: The Design and Deployment of a Wearable Vibrotactile Feedback System, Eighth IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'04), pp. 56-59, 2004.
- [5] Erin Pateski and Lynette Jones: Vibrotactile Pattern Recognition on the Arm and Torso, First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'05), pp. 90-95, 2005.
- [6] Tsukada, K. and Yasumura, M.: ActiveBelt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, Proceedings of UbiComp2004, Springer LNCS3205, pp. 384-399, 2004.
- [7] 東山篤規, 宮岡徹, 谷口俊治, 佐藤愛子, "触覚と痛み", pp. 9-34, ブレーン出版, 2000.
- [8] 乙部和紀, 佐々木豊, 小林恭, "農作業時に視界を妨げない情報提示機構"
http://narc.naro.affrc.go.jp/chousei/shiryou/kankou/seika/kanto16/02/16_02_17.html (2月1日現在)