

Active Belt: 触覚情報を用いたベルト型ナビゲーション機構

塚田浩二[†] 安村通晃^{††}

既存のコンピュータの出力インターフェースは主に視覚を利用するものであったが、モバイル環境、ユビキタス環境などの、コンピュータの利用場面の多様化に伴い、視覚以外の情報提示手法の重要性が高まってきている。特に触覚を用いた情報提示は、注意量をあまり必要としないため、常時利用可能な情報提示手法として有望である。しかし、従来のモバイル環境での触覚情報提示手法の多くは、携帯電話のバイブレータのように、注意喚起程度の用途で利用されることが多かった。本研究ではモバイル環境において、方位情報を含む多ビットの触覚情報提示を実現するベルト型ウェアラブル・インターフェース “Active Belt” を提案する。Active Belt はベルトに方位センサー、GPS と複数のアクチュエータを装着し、方位情報を伴う触覚情報提示を実現する。我々は Active Belt のプロトタイプを試作し、その有効な活用例を示すアプリケーションを提案する。また、評価実験を行い、提案システムの有効性を検証した。

Active Belt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation

KOJI TSUKADA[†] and MICHIAKI YASUMURA^{††}

This paper proposes a novel wearable interface called “Active Belt” that enables users to get multiple directional information with tactile sense. Since the information given with tactile sense hardly disturbs people’s activities, it suits for daily use in mobile environment. However, many of the existing systems don’t transmit multiple information with tactile sense. Most of them send only simple prompts, such as vibration of cellular phones. Active Belt is a belt-type wearable tactile display that can transmit multiple directional information. We have developed a prototype system and some applications, evaluated the system performance and usability, and confirmed the possibility of practical use.

1. はじめに

1.1 背景

近年、GPS をはじめとする位置計測技術の普及に伴い、モバイル環境における位置情報を用いた情報提供手法に関する研究が盛んに行われている¹¹⁾²¹⁾。また、AU の eznavigation³⁾ や J-PHONE の Station¹⁹⁾ をはじめとして、携帯電話各社も位置情報を利用したコンテンツ・サービスを積極的に展開している。これらの位置依存情報サービスには様々な応用可能性が存在するが、中でも需要の高いものの一つとして、自分の周りの地図を表示するナビゲーションシステムがあげられる⁹⁾。例えば、eznavigation サービスの一つである GPS マップでは、基地局情報と GPS 情報を併用することで、かなり正確な位置の地図を数秒程度で表示

することができる。

こうしたパーソナル・ナビゲーションシステムは一見便利なものであるが、実際に不慣れた場所で利用しようとする、実世界と地図の対応付けが困難であることも多い。たとえば、巨大な学会や展示会場において、地図を持っているにも関わらず、目的の展示を探すのに一苦労した、という経験を持つ人は少なくない。また、地図を読むこと自体が苦手な人も存在する。

こうした問題は二次元の地図と実世界の対応付けの困難さに起因すると考えられるため、その解決手法としては、実世界の「どの方向に」向かえばよいのかという方位情報を適切な手法で提示することが有効である。たとえば、展示会場などで道に迷った場合、今いる場所から「どちらに」向かえばいいのかを教えてもらうことが大きな助けとなる。

本研究では、こうした実世界の方位情報をわかりやすく提示する手法として、触覚により多ビットの方位情報を提示できるベルト型ウェアラブル・インターフェース “Active Belt” を提案し、実装および評価を行った。ここではまず、触覚という情報提示手法、およびベル

[†] 慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

^{††} 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environmental Information, Keio University

ト型のデバイス形態の特徴と優位性について述べる。

1.2 モバイル環境における情報提示手法

モバイル環境やウェアラブル・コンピューティングにおける情報の提示手法としては、「視覚」、「聴覚」、「触覚」を用いる手法が主な選択肢として考えられ、それぞれ一長一短の特徴を持つ⁵⁾。視覚は一度に提示できる情報は豊富だが、多くの注意量を必要とする。例えば、携帯電話の画面を常に見ながら歩くのはユーザにとって大きな負担になる。聴覚は視覚ほど多くの注意量を必要とせず、ある程度の情報を提示できる。しかし、雑踏や逆に静か過ぎる環境では使いにくい。触覚は一度に提示できる情報量は少ないが、注意量をあまり必要としないため、常時利用に適すると考えられる。本研究では常時利用性とユーザの負担の少ない情報提示手法を重視して、触覚による方位情報の提示に焦点をあてる。

1.3 ウェアラブル・インタフェースの形態

ウェアラブル・インタフェースの形態としてはこれまでも様々な種類が提案されてきている。具体的には、表 1 に示すように、眼鏡型、手袋型、腕時計型、指輪型、靴型、ベスト型、ペンダント型、帽子型、イヤリング型、などである。本研究では、触覚による方位情報の提示に適した形態としてベルト型のデバイスに着目した。ベルトは腰の周りを 360 度一周する形態を持つため、アクチュエータを用いて触覚刺激を与えることで、実世界の方位情報を直接想起させることが可能と考えられる。また、ベルトは男女共に幅広く利用される装飾品であり、ユーザに新たな装着負荷を与える可能性も少ない。さらに、ウェアラブル・コンピューティングの研究分野においては、従来、ベルトはコンピュータ本体やバッテリーを装着する用途で頻りに利用されてきたが、ベルトのアクティブな入出力インタフェースとしての可能性については、ほとんど議論されてこなかった。こうした理由から、本研究ではベルト型のデバイス形態を採用した。

2. Active Belt

2.1 コンセプト

Active Belt のコンセプトは以下の 3 点である。

- (1) 方位情報を伴う多ビットの触覚情報提示
- (2) 装着負荷の少ないウェアラブルデバイス
- (3) 位置依存情報サービスとの多様な連携

(1) は腰の周りを 360 度一周するベルトの形状を生かして、アクチュエータを用いて触覚刺激を与えることで、実世界の方位情報を直接想起させることが可能となる点である。このように、実世界の方位情報と触

表 1 ウェアラブル・インタフェースの代表的な形態と事例
Table 1 Typical products and researches of wearable interfaces classified by their shapes

形態	代表的な製品や研究
眼鏡型	MicroOptical ¹⁰⁾ , Poma ¹⁵⁾ , 他
手袋型	5DTDataGlove ¹⁾ , CyberGlove ²⁾ , Ubi-Finger ²²⁾ , 他
腕時計	UbiButton ⁷⁾ , 他
指輪型	FingeRing ⁶⁾ , GSR rings ¹⁴⁾ , 他
靴型	Expressive Footwear ¹³⁾ , GSR Shoes ¹⁴⁾ , 他
ベスト型	Tactual Wearable Display ²⁰⁾ , 他
ペンダント型	GesturePendant ¹⁷⁾ , 他
帽子型	Wearable American Sign Language ¹⁸⁾ , 他
イヤリング型	The Blood Volume Pressure earring ¹⁴⁾ , 他

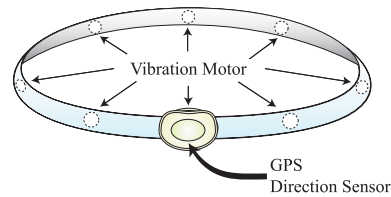


図 1 ActiveBelt デバイス構成イメージ図
Fig. 1 Basic Concept of Active Belt

覚情報を対応付けることで、身体に無作為にアクチュエータを装着する場合と異なり、個々の触覚情報に明確な意味を持たせることができる。(2) は、多くの人々が日常的に利用するベルトにアクチュエータ機能を付加することで、ユーザの装着負荷をほとんど増やすことなく、情報提示機構を加えられることである。また、一般に、ベルトは外出時に身につけられる可能性が高いため、特にモバイル環境における情報提示デバイスとして適していると考えられる。(3) はパーソナル・ナビゲーションをはじめとする、様々な位置依存情報サービスと連携できる可能性を持つことである。

2.2 デバイス構成

次に、Active Belt のデバイス構成について述べる。Active Belt は主に方位センサーと GPS、複数のアクチュエータ（振動モーター）、およびこれらを制御するマイコンから構成される（図 1）。GPS はユーザの位置情報を、方位センサーはユーザの身体（腰部）の絶対方位を取得する。アクチュエータはベルトの周囲を一周するように複数個埋め込み、触覚による情報提示を行う。

2.3 腰部への触覚刺激の特性

ここでは、腰部に触覚刺激を加えることで、実世界の方位情報を想起させ、基本的なパーソナル・ナビゲ-

ション機構を実現できるのかを検証する。Van²³⁾によると、胸回りの二点に振動触覚刺激を与えた場合の分解能は、腹側の中央付近で約 0.4cm、左右で約 1.2cm 程度であり、背中側の中央が約 1.8cm、左右が約 3.0cm 程度と、一般に予想されるよりも高い値を示すという。また、全体として腹側のほうが分解能がよく、また、側面のカーブの部分より背中・腹の平らな部分のほうが分解能はよいと報告している。さらに、山本ら²⁶⁾は、胸回りの単一の振動の分離特性について、腰部に振動触覚刺激を与えた場合、水平面上の方位を一定の正確さで想起できるという実験結果を報告している。

このように、腰部の触覚刺激の分解能はかなり高く、触覚刺激と実世界の方位を一定の正確さで想起できることから、Active Belt を利用して、触覚刺激により目的地への方位情報などを指示し、簡易パーソナル・ナビゲーション機構として利用することは十分可能だと考える。

2.4 アクチュエータ数の検討

前述のように、腰部の振動刺激に対する分解能はかなり高いと報告されており、多くの振動子を取り付ければ情報提示の解像度を高めることはできると考えられるが、消費電力の増加、ケーブルの取り回しの煩雑化、必要な I/O (マイコンのピン数) の増加など、実装面で問題も生まれてくる。そこで、本研究では実装面とのバランスを重視し、8つの振動子を利用することにする。8つの振動子であれば、マイコンベースの実装や、ベルト内部に振動子と配線を格納することが比較的容易であり、現実的にモバイル環境で利用できるシステムとして実装できると考える。

3. 実装

3.1 プロトタイプ

上述したようなデバイス構成に基づいて、我々は Active Belt のプロトタイプを試作した。プロトタイプは、(1)Active Belt ハードウェア、(2)GPS、(3)方位センサーユニット(地磁気センサーと加速度センサー)、(4)制御用マイコンから構成される(図2)。図3にプロトタイプのシステム構成を示す。以下に、プロトタイプの各構成要素について詳しく述べる。

3.1.1 Active Belt ハードウェア

初期の Active Belt ハードウェアはバックル部で長さを調整する、通常のベルト型の形状で実装した(図4)。ベルト部には8個の振動モーター(TPC製 FM23A)とLEDを等間隔に埋め込んだ。振動モーターは直径

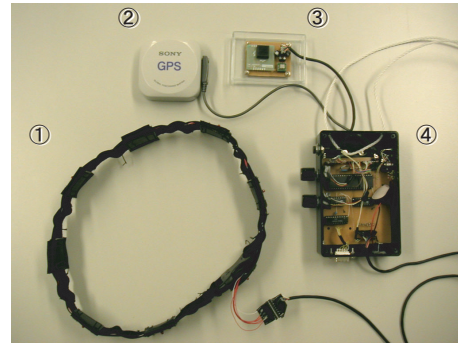


図2 Active Belt プロトタイプ (1. Active Belt ハードウェア, 2. GPS, 3. 方位センサーユニット, 4. 制御用マイコン)
Fig. 2 Prototype system of Active Belt

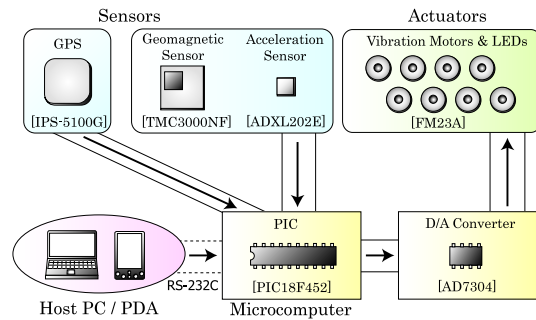


図3 Active Belt システム構成
Fig. 3 System architecture of Active Belt

18mm、厚さは約 3mm の薄型のものである。振動モーターは、ベルト装着時に腹側の中点、背中側の中点、および左右の腰骨付近に位置するよう 1 個ずつ装着し、さらに上記 4 箇所同士の中点に 1 個ずつ配置した。

Active Belt の装着時にユーザが感じる振動の強弱を検証するため、ベルトに内蔵した状態の振動モーターの振動周波数を、圧電型セラミックマイクロホンを用いて計測した。振動モーターにかける電圧は、マイコンにより、0.3~1.2V の間で制御する。実際の利用時の状態に近づけるため、ベルトとセラミックマイクロホンの間には、薄手のシャツ二枚(各厚さ約 1mm)を間に介した。

その結果、0.3V を加えた時の振動周波数は約 33Hz、0.6V を加えた時の振動周波数は約 40Hz、0.8V を加えた時の振動周波数は約 55Hz、1.2V を加えた時の振動周波数は約 77Hz であった。このように、振動モーターをベルトに組み込み、衣服を介した場合でも、振動モーターに加える電圧を変えることで、振動の強弱を

LED は振動モーターと同期して点灯し、主にデモ時の動作

確認用途に利用する。

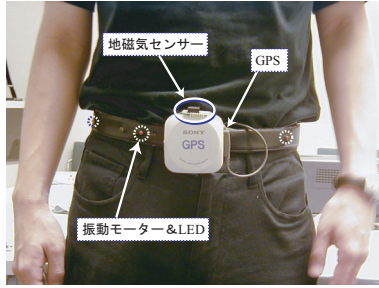


図 4 Active Belt ハードウェア ver.1
Fig. 4 Hardware of Active Belt ver.1

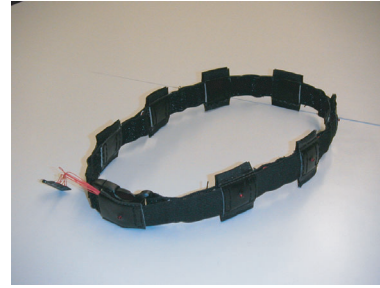


図 5 Active Belt ハードウェア ver.2 (フリーサイズ)
Fig. 5 Hardware of Active Belt ver.2 (universal size)

表現できることがわかる。

人間の皮膚の周波数特性という観点から考えると、最も敏感な周波数帯は 200-250Hz 程度とされている。一方、今回利用している振動モーターの周波数帯域は 33Hz ~ 77Hz 程度であり、やや感度の低い周波数帯に分布してしまっている。今回は、安価で多数の入手が容易であるという点で TPC 製 FM23A を選択したが、今後は人間の皮膚の周波数特性により適した振動モーターの利用についても検討していく。

ベルトのサイズは著者の一人のウエストサイズに合わせ、各アクチュータ間の距離の平均は 97.5mm(±2.5mm)、全長は 78.0cm とした。しかし、ベルトのサイズを調整すると、振動モーターの位置関係が変化し、方位情報との対応付けが困難になるという欠点があり、多くのユーザが装着するのは困難であった。

こうした初期プロトタイプを踏まえて、振動モーターを組み込んだベルト部を伸縮性のあるゴム素材で連結した、フリーサイズの Active Belt ver.2 を実装した(図 5)。通常時の全長は約 75.0cm であるが、図 6 のように、ゴム素材部の伸縮を考慮して余裕を持たせた配線を行うことで、ウエストサイズが最大約 98.0cm 程度のユーザまで、振動モーターの位置関係をほぼ保ったまま装着できるよう工夫している(図 7)。表 2, 表 3 に、ウエストサイズが約 82.0cm のユーザに装着した場合において、ウエストサイズを八分割した際の理論値と、フリーサイズの Active Belt を装着した場合の計測値と誤差、及び通常のベルト形状の場合の計測値と誤差を示す。腹側中央のバックル上の振動子を 1 (基準点) とし、右回りに 2,3,4... とし、各振動子と基準点間の長さを計測した。その結果、フリーサイズの場合は、計測値と理論値との平均誤差が 0.99cm、最大誤差が 2.15cm なのに対し、通常型の計測値と理

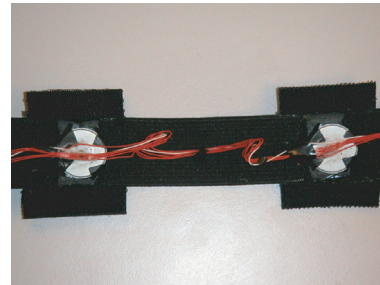


図 6 Active Belt ver.2 内部の配線
Fig. 6 Wiring inside of Active Belt ver.2



図 7 Active Belt ver.2 装着例
Fig. 7 Example of wearing Active Belt ver.2

論値の誤差は平均誤差が 4.10cm、最大誤差が 7.85cm となっており、フリーサイズの方が大幅に誤差が少ないことが確認できた。

3.1.2 方位センサーユニットと GPS

方位センサーユニットは、地磁気センサー (NEC トーキン製 TMC3000NF) と、加速度センサー (Analog Devices 製 ADXL202E) から構成される(図 8)。地磁気センサーは絶対方位の取得に用いる。地磁気センサーの出力はマイコンに 10bit A/D コンバータを通して入力される。本地磁気センサーを方位検出に用いた場合の計測精度は、約 ±1.5 度以内である。加速度センサーは、地軸に対する傾斜の取得に用いる。地磁気センサーが正しい方位を出力するためには、地軸に対し

一般に、周波数があがるとエネルギーが高くなるため、強い刺激として感じられることが多い。

表 2 振動子配置の理論値との誤差 (フリーサイズ型, ウエストサイズ=82.0cm)

Table 2 Comparisons of arrangements of vibrators between an ideal case and a real case with a free-size belt.

計測箇所	理論値 (八分割)	計測値	誤差
1~2	10.25cm	11cm	0.75cm
1~3	20.5cm	20.8cm	0.3cm
1~4	30.75cm	30.6cm	0.15cm
1~5	41cm	40.3cm	0.7cm
1~6	51.25cm	50.1cm	1.15cm
1~7	61.5cm	59.8cm	1.7cm
1~8	71.75cm	69.6cm	2.15cm
平均誤差			0.99cm
最大誤差			2.15cm

表 3 振動子配置の理論値との誤差 (通常型, ウエストサイズ=82.0cm)

Table 3 Comparisons of arrangements of vibrators between an ideal case and a real case with a usual-type belt.

計測箇所	理論値 (八分割)	計測値	誤差
1~2	10.25cm	9.9cm	0.35cm
1~3	20.5cm	18.9cm	1.6cm
1~4	30.75cm	27.9cm	2.85cm
1~5	41cm	36.9cm	4.1cm
1~6	51.25cm	45.9cm	5.35cm
1~7	61.5cm	54.9cm	6.6cm
1~8	71.75cm	63.9cm	7.85cm
平均誤差			4.10cm
最大誤差			7.85cm

て水平な姿勢を保つ必要があるため, 加速度センサーを地磁気センサーの傾斜補正用として利用することを検討した。しかし, 簡単な実験を行った結果, 人間の腰部は勾配 30 度程度の上り坂を歩いている, 地軸に対して水平に近い状態を保てることが判明した。振動子の情報提示が 8 方向 (45 度毎) であることも考慮すると, 腰部に地磁気センサーを装着した場合, 日常生活の範囲においては, 傾斜によるセンサーの誤差は許容できる範囲に収まると考えられる。そこで, 本プロトタイプでは地磁気センサーの傾斜補正は行わず, センサーの出力をそのまま利用する方針をとる。

GPS は, Sony 製 IPS-5100G を利用する。IPS-5100G からの出力はシリアル形式でマイコンに入力され, バイト列から緯度, 経度情報を抽出する。また, 目的地への距離と方位は, GPS の緯度経度情報, および目的地の緯度経度情報をもとに, 球面三角法¹²⁾ を利用して算出する。

3.1.3 マイコンと周辺回路

Active Belt の制御用マイコンは, MicroChip 社の PIC18F452 を利用する。マイコンは上述のようにセ

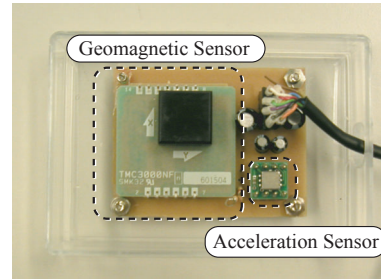


図 8 方位センサーユニット

Fig. 8 Circuit board of direction sensor

ンサーからの信号を入力, 解析するとともに, (1) 振動モーターと LED の制御, (2) ホスト PC/PDA との通信を行う。(1) については, 振動モーターと LED を 8bit の D/A コンバータ (Analog Devices 製 AD7304) を介して制御する。D/A コンバータを利用することで, 電圧を可変的に制御し, 振動モーターの振動数や LED の明るさを滑らかに変化させることができる。(2) については, ホスト PC/PDA と RS-232C を介して通信を行い, 目的地の緯度, 経度情報の設定を行うことができる。

3.2 応用例

ここでは, Active Belt の有効な活用を期待できる応用例として FeelNavi, FeelSense, FeelSeek, および FeelWave を紹介する。FeelNavi はパーソナル・ナビゲーション, FeelSense は位置依存情報提示, FeelSeek は忘れ物探索支援, FeelWave はエンターティメントの応用を目的としている。

3.2.1 FeelNavi

FeelNavi は触覚情報提示を用いたパーソナル・ナビゲーションシステムの応用例である。ユーザは「感じるままに歩く」ことで, 目的地に到達することができる。具体的には, 目的地への距離と方位情報を振動により提示する。プロトタイプにおいては, 目的地の緯度・経度情報をホスト PC/PDA から登録し, 現在地とユーザの向きに応じて特定の振動モーターを駆動させている (図 9)。目的地への距離情報は, 振動の周波数として表現しており, 目的地に近づくほど振動周期が早くなる仕様としている。

3.2.2 FeelSense

本稿の冒頭で述べたように, 特定の位置・地域限定の情報提供サービスが盛んに行われるようになってき

出力電圧は 255 段階で変化させることができるが, 実際に振動モーターに加えている電圧は, 0V ~ 1.2V の範囲である。0.3V 以上の電圧を加えると, 振動モーターを駆動させることができる。

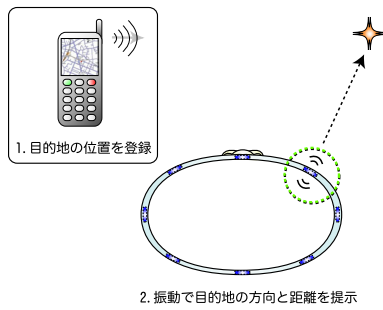


図 9 FeelNavi のイメージ図
Fig. 9 Basic concept of FeelNavi

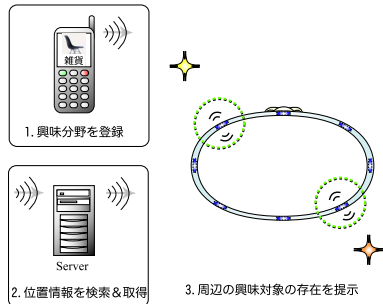


図 10 FeelSense のイメージ図
Fig. 10 Basic concept of FeelSense

ている。従来、こうした情報提供サービスの多くは視覚を用いた情報提示を前提としていた。しかし、たとえば特定の位置に来るとメールが送信されてくる、といった情報提示手法は情報量が豊富な反面、煩わしいことも多いと考えられる。今後位置依存の情報提供サービスはより増加していく傾向にあり、ユーザの利用負荷を考慮したシンプルな情報提示手法が求められる。FeelSense は、興味ある位置依存コンテンツの存在を「感じながら歩ける」常時アクティブな情報提示システムである。具体的には、対象の情報に近づいたとき、その方向と距離を振動により提示する。図 10 に示すように、ユーザは事前に関心領域を登録することで、興味のある位置依存コンテンツの存在を常に感じることができる。例えば、雑貨屋・古着屋など自分の特に関心のある店舗の存在を感じたり、街頭ライブなどのイベントの存在を感じたりすることが可能になるだろう。

3.2.3 FeelSeek

近年無線タグの大幅な小型化・低価格化が進んでおり、近い将来さまざまな生活用品に埋め込まれ、利用されるようになると考えられている²⁴⁾。そうした状況では、財布、手帳、パソコンなど重要な携帯品に無線タグを埋め込み、置き忘れや盗難を防ぐアプリケーションが有効となるだろう。FeelSeek はこうした貴重品の紛

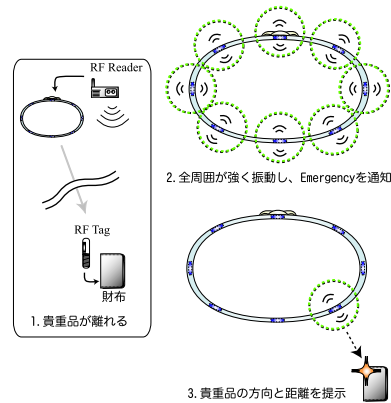


図 11 FeelSeek のイメージ図
Fig. 11 Basic concept of FeelSeek

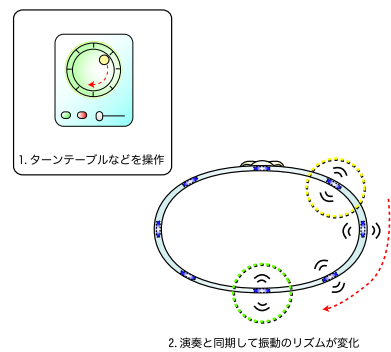


図 12 FeelWave のイメージ図
Fig. 12 Basic concept of FeelWave

失情報の提示、および探索支援を想定したアプリケーションである。具体的には、図 11 に示すように、まず貴重品に埋め込まれた無線タグがベルトに内蔵したリーダーから一定距離以上離れると、ベルトの全方位が震え、「緊急事態」を通知する。次に、ユーザは必要に応じて、探し物を探索するためのトリガーを入力する。すると、システムは GPS の軌跡をもとに貴重品のおおまかな位置を検出し、FeelNavi と同様の仕組みで振動によるナビゲーションを開始する。

3.2.4 FeelWave

上述の例とは趣の異なる応用例として、Active Belt をボディソニックのように、音楽などに併せて振動のリズムを楽しむ目的で利用することも考えられる(図 12)。たとえば、全方位から触覚情報を提示できる特性を生かして、立体音響効果と組み合わせればシンプルで迫力のある演出が期待できる。また、DJ のターンテーブルの演奏(回転)と聴衆のベルトの振動子の動作を同期させるなど、新しい表現手段としての可能性も考えられる。

4. 評価実験

Active Belt のプロトタイプシステムの有効性を検証するため、フリーサイズの Active Belt ver.2 を用いた評価実験を行った。前述のように、Active Belt の応用例である FeelNavi においては、振動の方位の変化によって方位を、周期の変化によって距離を表現する。本実験では、静止状態、歩行状態のそれぞれにおいて、振動の方位や周期の変化を被験者が認識できるかを確認する。さらに、パーソナル・ナビゲーションシステムとして実用化するための、知見を得ることを目的とする。被験者は 21 歳～30 歳までの男女 6 人である。

4.1 手 法

被験者には、Active Belt システム一式と無線シリアルトランスミッタ（野村エンジニアリング製 RS232-STR）を装着させる。実験者は端末と無線信号を用いて、任意に振動の方位や周期を操作する（図 13）。一度に振動する振動子は一つとし、振動の強さも常に一定（約 77Hz）とする。実験時間は各ユーザにつき連続約 15 分程度である。

実験は、下記の二つのプロセスを、続けて行う。

- (1) 被験者が静止した状態
- (2) 被験者が歩いている状態

(1) の静止状態においては、振動の方位を変化させ、身振りや口頭などで、変化した方向を述べるように指示する。振動の周期は、250msec(125msec 振動, 125msec 停止), 500msec(250msec 振動, 250msec 停止), 1000msec(500msec 振動, 500msec 停止), 1680msec(840msec 振動, 840msec 停止) の四つを用いる。(2) の歩行状態においては、振動の方位を変化させ、振動を感じた方向に曲がるように指示する。振動の周期は、上記と同様の四つを用いる。

実験者は各プロセス中はユーザの様子を観察する。各プロセス後には簡単な対話を行い、振動周期と振動方位の変化について、被験者の主観的な印象を調査した。また、実験終了後に自由対話を行い、システムに対する印象や改善点などを調査した。

4.2 結 果

まず、(1) のプロセスにおけるユーザの様子を観察した結果を述べる。振動の周期単体の変化については、全員が全ての変化を感じ取ることができた。振動の方位の変化については、6 人中 5 人の被験者は、振動情報の提示から 1 秒以内に、ほぼ正しい振動方向を示すことができた。また、プロセス終了後に、各振動周期において、8 方向の振動方位を分離できたかとたずね

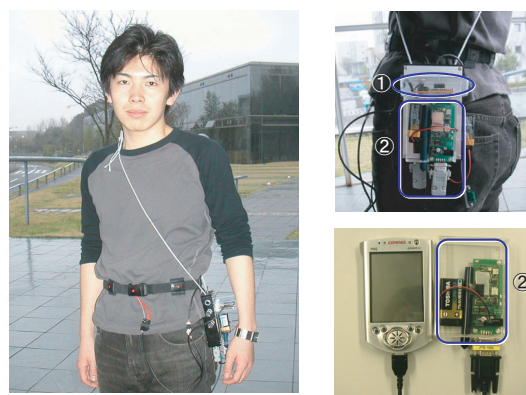


図 13 評価実験の様子。左:被験者, 右上:Active Belt 制御部, 右下:実験者操作部 (1. 方位センサー, 2. 無線シリアル送受信機)

Fig. 13 Prototype system used in the experiment

たところ、上記の 5 人の被験者はいずれの周期においても、問題なく分離することができた、と答えた。

残り 1 人の被験者については、いずれの周期においても、前後左右の 4 方向は確実にわかるが、斜め方向は分離が難しいときがある、と答えた。これは、おそらく被験者のウエストサイズが約 67cm と細く、ベルトが浮いてしまい、振動が伝わりにくかったためではないかと考えられる。

次に、(2) のプロセスにおけるユーザの様子を観察した結果を述べる。歩行状態においては、振動の周期によって被験者の反応が大きく異なった。周期が 1680msec, 1000msec の場合は、振動情報の提示後、すべての被験者が 1~2 歩程度歩いてから一度たちどまり、振動方向に振り向き動作を見せた。プロセス終了後の対話によると、これらの周期においては、すべての被験者は歩きながらも振動方位の変化に気づくことができ、一瞬静止すればおおむね正確な方位を確認できると述べた。周期が 500msec の場合は、被験者の反応が鈍くなり、振動方位の変化に反応できない場合が増加した。2 人の被験者が、この周波数では振動刺激自体を感じるができなかったと述べた。また、周期が 250msec の場合は、全ての被験者が振動刺激自体を感じるができなかったと述べた。

最後に、実験終了後の自由対話でみられた主な意見や要望をまとめる。

- (1) 背中側の刺激は感じにくい (5 人)
- (2) 実際の利用時には、ずっと振動するよりも、道を間違えたときだけ振動してほしい (2 人)
- (3) 歩行時、斜め方向（特に斜め前方向）の振動が分離しにくい (3 人)
- (4) 実際の利用時には、振動子は 4 つ程度でよいと

感じた(3人)

- (5) 歩行時,どちらが振動しているかはわかるが,正しい方向に振り向くのが難しい(2人)
- (6) 歩行時,振動方向に対して(向きを変えずに)歩きたくなる(2人)

4.3 考 察

上述の実験結果に基づき, Active Belt を用いたナビゲーション機構を実用化する際の, 課題と改善手法について考察する.

・方位の表現手法について

評価実験においては, 静止時には振動の方位の変化はほぼ1秒以内の速さで, 正確に感じられていた. 歩行時には, 振動周期が1000msec以上ある場合は, 振動の方位が「変化したこと」は1~2歩程度の間に認識され, 一瞬立ち止まることで, 概ね正確な振動位置に向かって向きを変えることが可能であった. 歩行中に正確な振動方位の変化を知ることが困難であったが, 人は道に迷ったときは反射的に立ち止まることが多いことから, 一瞬立ち止まる程度であれば, 実用上は問題ないと思われる.

・距離の表現手法について

FeelNaviでは, 振動の周期の変化を用いて, 目的地までの距離情報の表現を試みていた. 評価実験においては, 静止時には周期の変化は問題なく感じられていた. 一方で, 今回の実験条件においては, 歩行時には500msec以下の周期の振動は知覚するのは難しいことがわかった. 500msec以上の周期の変化を利用して距離を表現できる可能性もあるが, 今後は周期以外の距離の表現手法についても検討していく. たとえば, 目的地に近づくにつれ, 目的地方向を示す振動子を中心に, 波紋のように振動が広がっていく, という情報提示の形態などを考えている.

・ナビゲーション時の表現形態について

実験終了後の自由対話においては, 実際にナビゲーションを行う際の振動情報の提示手法について, いくつか興味深い意見が聞かれた. まず, 目的地までずっと振動するのではなく, 道を間違えた時だけ振動を行ってほしい, という要望があった. これは, 道に迷ったときだけ地図を見る, という行為と共通しているが, ユーザが特別なタスク(地図を開く, PDAを取り出すなど)を行う必要なしに, 目的地へと自然に導かれるようなナビゲーション・インタフェースを生み出せる可能性があり, 興味深い.

また, 歩行時は斜め方向(特に前斜め方向)の振動が分離しにくい, 振動子は4つ程度で十分なのではないか, という意見があった. 前述したように, Van²³⁾

により, 胴回りの振動刺激に対する分解能が高いことが報告されているが, 実際の歩行においては, 多くの振動子を配置することが必ずしも実用的なパーソナル・ナビゲーションシステムの実現に結びつくとは限らない, という可能性を示唆しているように思われた.

さらに, 背中への刺激は感じにくい, という意見があった. こちらも前述したように, 腹側の振動刺激より, 背中側の振動刺激のほうが分解能が低い, という報告がなされているが, そうした理由に加えて, 背中側にベルトが密着せず, 浮いた感じになってしまう, という意見が多く聞かれた. 実際に Active Belt を用いてナビゲーションを行う際には, 肌に振動子を密着させられる状況は少ないと考えられるため, 背中側の振動子を強力なものにするなど, 実際の装着時の誤差を考慮した設計が重要になる可能性がある.

5. 議 論

ここでは, 位置依存情報の特性, および地図表示型ナビゲーションシステムとベルト型システムの特徴について議論する.

5.1 位置依存情報の特性

Active Belt は視覚や聴覚による情報提示手法と比較すると, 常時装着性に優れる反面, 単体で提示できる情報は限られてくる. 一方, 位置依存の情報サービスはユーザのいる実世界の位置や空間と密接な関係を持つ. そこで, 位置依存サービスを想定した場合, ウェアラブル・インタフェース側ですべての情報を提供しなくても, 環境側の情報を利用することで, ある程度の情報量を得ることができると考えられる. FeelSenseの応用例を考えてみると, 感じられた情報は今いる空間と密接な関係を持つものであり, 振動により提示された方向に目を向けるだけでも, ある程度情報の種類がわかる可能性は高い. たとえば, 目をやった方向に店舗があれば自分の関心のある商品を扱っている可能性が想像できる. ユビキタス・コンピューティング²⁵⁾のようにインテリジェント化された環境を想定すれば, 環境側からより多様な情報を得ることも可能だろう.

5.2 地図表示型ナビゲーション方式との比較と考察

屋外における個人用のナビゲーション手法において, 携帯端末などの地図上に自分の位置や方位を表示する手法は, 従来からよく用いられてきたものである. ここでは, こうした地図表示型のナビゲーションシステムと, ベルト型のナビゲーションシステムを比較した場合の, それぞれの利点についてまとめ, 考察を加える.

地図表示型システムの利点は, (1) 豊富な情報を表示できるため, 目的地付近の建物や, 目的地までの具

体的な距離, 詳細な道順などの, 細かい情報や複雑な情報を伝えることができる, (2) 入力インタフェースを備えることが多く, インタラクティブな利用が容易である, といった要素が挙げられる.

ベルト型システムの利点は, (1) 視覚や聴覚を占有しないため歩きながらも常時利用できる, (2) 振動刺激と実世界の方位の対応付けが直感的に行えるので, 地図を読むのが苦手な人でも容易に目的地の方位など理解することができる, (3) 周囲の環境に左右されにくく, 夜などの視界が悪い状態や周囲に目立つ建物がない状態でもほぼ通常通りの効果が期待できる, といった要素が挙げられる.

このように, 地図表示型システムとベルト型システムはそれぞれ異なる利点をもっている. 両システムはお互いに対立する手法ではなく, むしろ両者をうまく組み合わせれば, お互いの欠点を補えることから, より理想的なナビゲーションシステムを構築できる可能性がある.

6. 関連研究

GPS などの位置情報を利用した情報サービスやナビゲーションシステムに関する研究としては Walk Navi¹¹⁾, Augment-able Reality¹⁶⁾, Touring Machine⁴⁾, Space Tag²¹⁾ などがある. これらはいずれも位置情報を利用したアプリケーションを提案しているが, その多くは視覚を中心とした情報提示を対象としている. 一方, 本研究はこうした位置依存のサービスに適した触覚情報提示手法に焦点を当てている.

電子コンパス内蔵 GPS 携帯²⁸⁾ は, 現在地の地図を表示し, 携帯電話の向きに応じて回転させることができる. 方位情報を用いて地図と実世界の対応付けを支援しており, 興味深い.

ウェアラブル・インタフェースを用いて, 触覚を利用した情報提示を行う研究としては Cyber Touch, Tactual Wearable Display などがある. Cyber Touch²⁾ は6つの振動子をグローブに取り付け, 仮想世界の物体との接触表現などを実現している. Tactual Wearable Display²⁰⁾ はベストなどの背中の部分に振動モーターを3×3のマトリクス状に配置し, 方位情報などの提示を試みている. また, 仮現運動 (Apparent Movement)⁸⁾ などの触覚の認知特性を利用した情報提示手法を提案しており, 大変興味深い. 一方, 本研究はベルト型のデバイスを用いるアプローチであり, 振動刺

皮膚上の二点を, 特定の時間間隔で交互に刺激すると, 小さなものはねるような連続的な刺激が二点間で与えられるように感じる現象

激と実世界の方位の対応付けをより直感的に行うことができる.

ベルト型のウェアラブルデバイスとしては Mitutoyo 社のウエストメジャーベルトがある. ウエストメジャーベルト²⁷⁾ はベルト内部にデジタルスケールを内蔵し, 身につけるだけでウエストサイズを計測することができる. 本研究の目的とは異なるが, ベルト型デバイスを用いた健康管理の応用例を提案しており, 興味深い.

7. おわりに

本研究ではモバイル環境において, 方位情報を含む多ビットの触覚情報提示を実現するベルト型ウェアラブル・インタフェース Active Belt を提案し, 実装および評価を行った. 今後は, 評価実験の結果明らかになった問題点を改善し, パーソナル・ナビゲーション機構としての実用化を目指すとともに, エンターテインメント分野や位置依存情報サービスと連携した, 新たな応用例を開発していく.

参考文献

- 1) 5DT Data Gloves: .
<http://www.5dt.com/hardware.html#glove>.
- 2) CyberGlove and Cyber Touch: .
<http://www.immersion.com/products/3d/>.
- 3) Eznavigation: .
http://www.keitai1bankan.com/phone/ez_navi.html.
- 4) Feiner, S., MacIntyre, B., Hollerer, T. and Webster, A.: A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment, *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC'97)*, pp. 74-81 (1997).
- 5) 福本雅朗: 24 時間ニューロクデキマスカ? - Wearable なインタフェース, 情報処理, Vol. 41, No. 2, pp. 123-126 (2000).
- 6) Fukumoto, M. and Tonomura, Y.: Body coupled FingeRing: Wireless wearable keyboard, *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)*, Addison-Wesley, pp. 147-154 (1997).
- 7) 福本雅明, 外村佳伸: “指釘”: 手首装着型コマンド入力機構, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 389-398 (1999).
- 8) 前野隆司: ヒトの触覚受容機構 - 力学・アナロジー・錯覚という視点から -, 電気学会センサマイクロマシン部門誌, Vol. 122, No. 10, pp. 469-473 (2002).
- 9) 増井俊之: GPS 携帯電話の活用, *UNIX MAGAZINE*, Vol. 17, No. 8, pp. 173-184 (2002).
- 10) MicroOptical: .

- <http://www.microopticalcorp.com/>.
- 11) Nagao, K. and Rekimoto, J.: Agent Augmented Reality: A Software Agent Meets the Real World, *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems(ICMAS'96)*, pp. 228–235 (1996).
 - 12) 長沢工: 天体の位置計算 増補版, 地人書館 (1985).
 - 13) Paradiso, J. and Hu, E.: Expressive Footwear for Computer-Augmented Dance Performance, *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers(ISWC'97)* (1997).
 - 14) Picard, R. and Healey, J.: Affective Wearables, *Personal Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 231–240 (1997).
 - 15) Poma: .
http://www.xyberonaut.com/Solutions/product/poma_product.htm.
 - 16) Rekimoto, J., Ayatsuka, Y. and Hayashi, K.: Augment-able Reality: Situated Communication through Physical and Digital Spaces, *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers(ISWC'98)*.
 - 17) Starner, T., Auxier, J., Ashbrook, D. and Gandy, M.: The Gesture Pendant: A Self-illuminating, Wearable, Infrared Computer Vision System for Home Automation Control and Medical Monitoring., *Proceedings of 4th International Symposium on Wearable Computers(ISWC'2000)* (2000).
 - 18) Starner, T., Weaver, J. and Pentland, A.: A Wearable Computer Based American Sign Language Recognizer, *Proceedings of First International Symposium on Wearable Computers(ISWC'97)* (1997).
 - 19) Station: .
http://www.jmobile.co.jp/pdf/pdf0117/030117_jss.pdf.
 - 20) Tan, H. and Pentland, A.: Tactual Displays for Wearable Computing, *Personal Technologies*, Vol. 1, pp. 225–230 (1997).
 - 21) Tarumi, H., Morishita, K., Nakao, M. and Kambayashi, Y.: SpaceTag: An Overlaid Virtual System and its Application, *Proceedings of International Conference on Multimedia Computing and Systems(ICMCS'99)*, Vol.1, pp. 207–212.
 - 22) 塚田浩二, 安村通晃: Ubi-Finger:モバイル指向ジェスチャ入力デバイスの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3675–3684 (2002).
 - 23) Van Erp, J.: Tactile Navigation Display, *Proceedings of Haptic Human-Computer Interaction 2000*, pp. 165–173 (2001).
 - 24) Want, R., Fishkin, K., P., Gujar, A. and Harrison, B., L.: Bridging Physical and Virtual Worlds with Electronic Tags, *Proceedings of CHI'99*, ACM Press.
 - 25) Weiser, M.: The Computer for the 21st Century, *Scientific American (International Edition)*, Vol. 265, No. 3, pp. 66–75 (1991).
 - 26) 山本哲正, 泉隆, 白銀暁, 小島悟, 田中敏明, 井野秀一, 伊福部達: 振動触覚刺激による二次元方位知覚特性, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集, pp. 21–24 (2002).
 - 27) ウエストメジャーベルト: .
http://www.mitutoyo.co.jp/jpn/syouhin/kenkou/w_new/w_new_1.html.
 - 28) 電子コンパス内蔵 GPS 携帯: .
http://www.zdnet.co.jp/mobile/0202/25/n_gpsp.html.

(平成 2003 年 4 月 10 日受付)

(平成 2003 年 9 月 8 日採録)

塚田 浩二 (正会員)

1977 年生 . 2000 年慶應義塾大学環境情報学部卒業 . 2002 年同大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了 . 同年, 同大学大学院博士課程入学 . Mobiquitous-Computing , 俄アートに興味を持つ .

安村 通晃 (正会員)

1947 年生 . 1971 年東京大学物理学部物理学科卒 . 1978 年同大学理学系大学院博士課程 (情報科学専攻) 満了 . (株) 日立製作所中央研究所主任研究員を経て, 1990 年 4 月より慶應義塾大学環境情報学部助教授 . 現在, 同教授 . 理学博士 . 実世界指向インタフェース等の研究に従事 .