Vol.2017-AAC-5 No.15
2017/12/9

仮想点字ブロックへ向けた 足裏振動モータアレイによる線分提示手法の一検討

平野 隼壮[1,a)]　吉田 直人[1,b)]　榎堀 優[2,c)]　米澤 朋子[1,d)]

概要：視覚障がい者誘導用ブロック（通称点字ブロック）は，線状および点状の突起パターンにより移動の方向および，注意が必要な箇所を示す．本稿では，移動の方向を示す「誘導ブロック」の提示に向け，足裏への線分を提示するデバイス試作と有用性の検討について述べる．仮想点字ブロックの線分に対して，足裏に配置した振動モータアレイの振動パターンをおよび振動強度を制御することにより，線分が知覚されるか予備的に検討し報告する．

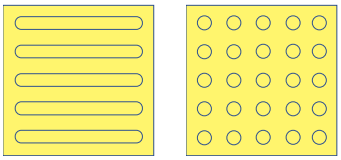
1. はじめに

視覚の健常な人は外出時に様々な視覚的サインを見つけながら行動をとる．道案内や立ち入り禁止などのサインは，生活の中の利便性を向上させ危険を回避するのに役立っている．その一方で，サインが無いシーンでも我々は周辺の状況を判断し，危険を回避しながら過ごしている．車道と歩道の間に線を引いていないところでも，車の走る場所を認識して避け端を歩く．

視覚障がい者はこのようなサインのない周辺状況を判断しながら歩くことは難しい．白杖を使う手と，足裏で感じる感覚の変化を頼りに移動しているため，非常に狭い周辺状況認識となる．そのため，他の感覚刺激を用いた様々な歩行支援サインがある．例えば，誘導音のある信号機（音響式信号機）は，音サインを用いている．ある程度の指向性のあるスピーカを地上 3.3m に設置するもので，音源位置が分かることで青信号の横断方向を示す．

他に，凹凸触覚を用いた点字ブロック（視覚障がい者誘導用ブロック）がある．点字ブロックには，線が進行方向を示す誘導ブロック（図 1 左）と，注意や停止を意味する点状の警告ブロック（図 1 右）があり，視覚障がい者の周辺環境理解や安全に一役買っている．

一方，点字ブロックには問題点が残る．高齢者や子供がつまずいたり，車椅子利用者やキャスター荷物移動の障害



誘導ブロック　　警告ブロック

図 1　点字ブロック
Fig. 1　Textured paving blocks

になる他，視覚健常者には点字ブロックについての理解が広がらず，荷物を置いたりブロック上に立ち止まったりして進路を塞ぐことも多々ある．駅のホームでも同様なことが起こる．電車待ちの列は誘導ブロックを塞ぎ，視覚障がい者の転落事故は後を絶たず，2009 年度から 2014 年度の間に起きた転落事故は 415 件 [*1] に上る．

このような事故や日常の不便を減らすためには，点字ブロックの普及と理解の広がりが必要であるが，点字ブロックが設置されていない場所での視覚障がい者の歩行支援が最も急がれる問題だと考えられる．

これに対し我々の研究プロジェクトでは，白杖に対する衝撃触覚提示による仮想的な壁を与える試みを行ってきた [1]．白杖は周辺の空間や環境を知るために有効な代替感覚器となる．しかし，非常に狭い場所や人ごみの中などを歩く場合に，人間に当てないようにしながら白杖を用いて空間知覚をすることは難しい．

そこで，本研究では，足裏に振動刺激を与えるウェアラブルデバイスにより，仮想の点字ブロックを感じさせ，歩行を誘導するシステムの検討を行う．点字ブロックの中でも，誘導ブロックは，歩行中の視覚障がい者に進行方向を

[1] 関西大学
Kansai University, Takatsuki, Osaka 5691095, Japan
[2] 名古屋大学
Nagoya University, Furo-cho, Nagoya, Aichi 4640814, Japan
[a)] k579542@kansai-u.ac.jp
[b)] k463362@kansai-u.ac.jp
[c)] enokibori@i.nagoya-u.ac.jp
[d)] yone@kansai-u.ac.jp

[*1] https://mainichi.jp/articles/20161017/k00/00m/040/081000c より

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

案内する重要な歩行支援となる．この誘導ブロックにおける線分の方向を足裏に提示するため，靴底のインソール素材にリニア振動モータを複数埋め込み，位置に応じた出力制御を行う手法を検討する．

2. 関連研究

2.1 歩行ナビゲーションシステム

車や電車，歩行など様々な人間の移動状況におけるナビゲーションシステムがある．どんな人でも，初めての場所で道順や周辺状況を把握し目的地に到達するのは容易ではない．VR や AR を用いたシステムにより，より直観的理解や利便性を提供するシステムもある．

モバイルデバイス [2] やウェアラブルデバイス [3] による歩行ナビゲーションシステムは古くから提案されてきた．AR を用いた案内 [4] に関しても様々な手法があり，視覚や聴覚によるものだけでなく触覚も適用するなど，多感覚でのナビゲーションを行うシステムもある．これは，歩行時の様々な注意をできるだけ阻害せずに，追加のナビゲーソン情報を提示するために有効だと考えられる．個人のデバイスで情報取得することでのナビゲーションシステムだけでなく，環境にデータを埋め込むことで端末が情報を取得するようなシステムもある [5]．これらは，マルチモーダルに統合された情報提示を行うことで歩行誘導をするシステム [6] として一般の人に向けた利便性向上を狙うものが多い．

ここで，視覚障がい者以外の人は，視覚サインやランドマークにより目的地を探すとともに，周辺状況の危険を察知するということが可能だが，視覚障がい者にとっては目的地への移動情報と安全にかかわる情報をより限られたチャンネルで取得することは困難である．

2.2 視覚障がい者用誘導システム

視覚障がいのある人にとって，音情報や周辺理解に関わる触覚情報は重要な情報である．

歩行ナビゲーションと組み合わせ音声ガイドを用いることで視覚障がい者への情報提示を行うシステム [7], [8], [9] の中で音の指向性を利用するものもある．音声と触覚を組み合わせた統合的なナビゲーションシステム [10] は駅プラットホームでの実験を行っている．しかし普段は情報提示の無い中で周辺音に頼りながら過ごしている視覚障がい者が，多くの情報提示を受け取ることで混乱が生ずる可能性もある．また音源位置は，視覚遮蔽時の歩行方向への影響を無意識的にも与える [11] という報告もある．

音情報だけでなく，マルチモーダルに視覚障がい者の歩行を支援するものとして，振動を用いた情報提示 [12] や，白杖や点字ブロックに関わるシステムもある．IC タグ [13] やセンサによる位置推定 [14] を用いて取得した情報を白杖に触覚提示する手法 [15] がある．これは我々の試み [1] における白杖への触覚提示という手法において類似するが，仮想壁提示といったローカルな導線に関わるものではない．

点字ブロックは誘導ブロックによりローカルな進行方向を示し警告ブロックにより危険を示す．このとき利用者は足裏で凹凸のパターンを感知し情報を得る．しかしこの点字ブロックはどこにでも配備されているものではなく，場所によってはほかの利用者や荷物で邪魔されてしまうこともある．このような誘導ブロックの進行方向の提示を取り入れつつ，あらゆる場所に触覚提示を通して仮想的に設置出来れば，危険を避けながら迷うことなく歩くことができる．

特にユーザの位置や障害物の存在に合わせてこの仮想点字ブロックを移動することで適切な経路を提示できれば，現実空間の特定の個所を通らなければならないという制約がなくなり，視覚障がい者の移動はより自由で安全なものになると考えられる．

2.3 足裏刺激情報提示

足裏に刺激提示することで歩行ナビゲーションをするシステムがある．歩行周期の誘導をしてリズムよく歩かせるシステム [16] や，ユーザ定義情報を足裏の五か所の振動モータで与える手法 [17]，足裏振動モータによる偽歩行感覚の提示 [18] など，アンビエントな情報提示として足裏振動刺激を用いる例がある．これらの情報提示は普段から足裏に集中して情報収集していないユーザに新規の情報を与えるものである．

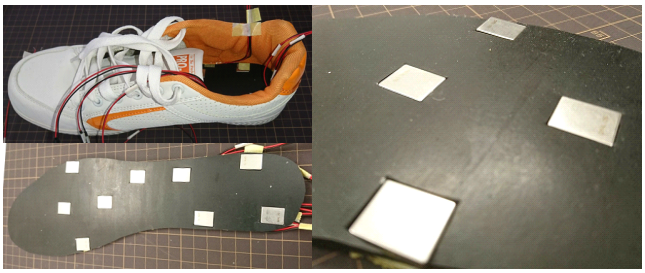
本稿では，視覚障がい者の普段の生活における刺激に即した足裏刺激として，新規の情報提示の代わりに，点字ブロック未設置の場所やユーザが点字ブロックから離れた位置に立っているときのみ点字ブロックを再現するため，適切な振動刺激の提示方法を検討することとした．

3. 提案システム

3.1 システムの概要

本システムは，足裏に配置した振動アクチュエータの振動マッピングや振動強度を調整することで，線状の誘導ブロックのような，方向を示す仮想の線分を足裏に提示することを目的としたものである．

図 2 は本稿において試作したプロトタイプである．本システムは，振動アクチュエータが埋め込まれたインソールと振動アクチュエータを制御するためのドライバ等を搭載した制御基板からなるデバイス部，足裏の地面への設置を検出するセンサ部，仮想の線分から各振動アクチュエータの振動マッピングや振動強度を算出し制御のためのアナログ信号を出力する制御部，制御部とデバイス部を無線接続するための無線通信モジュール親機および子機からなる通信部，線分の方向や位置を設定するコンピュータで構成される（図 3）．このうち，デバイス部および通信部子機は靴



左上：靴型デバイスへの埋め込み，左下：インソール素材（ゴム）への振動アクチュエータ配置，右：振動アクチュエータの埋め込み拡大

図 2 プロトタイプシステム
Fig. 2 Prototype system

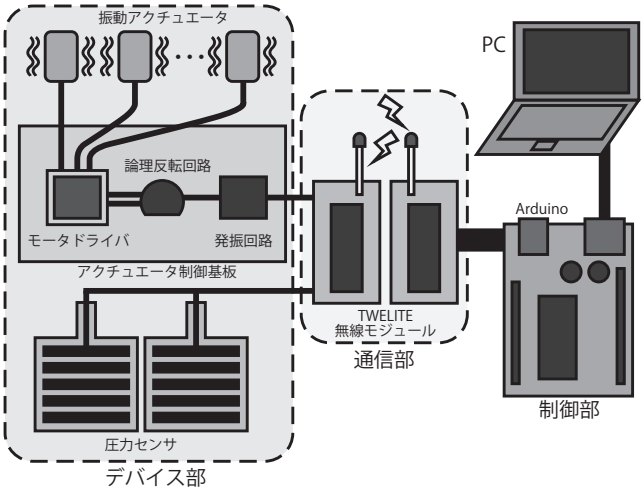


図 3 システム構成
Fig. 3 System configuration

に装着し，振動アクチュエータ内蔵インソールを靴の中に，その他の部分を靴の甲上に設置する．

仮想誘導ブロックの線分を設定して，その線分から足裏に複数配置された各振動アクチュエータへの距離を計算し，それぞれの振動アクチュエータの強度を設定する．足裏に設置する圧力のセンサによって接地を検出し，それに応じて振動を出力する．

次に各部の詳細と制御について述べる．

3.2 システム構成

3.2.1 デバイス部

振動提示用小型デバイスとして，リニア振動アクチュエータ（LD14-002, 5V 120mA, 1 相バイポーラ駆動，図 4-B）を用いる．本システムの設計においては，低コストな円盤型（偏心タイプ）振動モータ（3V,100mA, 13000RPM, 図 4-A）についても検討したが，電圧の強弱で振動の表現できる強弱の差が狭い．そのため，間欠電流で直線運動の回数を制御する [19] リニア振動アクチュエータを採用した．これにより，微弱な振動から強い振動を各モータに異なる強度で再現する．

リニア振動アクチュエータの振動周波数および Duty 比を変更することで，足裏への材質や凹凸等の触覚提示の可能性 [20], [21] を考慮しリニア振動アクチュエータを採用する．本プロタイプシステムにおいては，Duty 比は 2/3，周波数は 160Hz で固定する．

リニア振動アクチュエータの駆動のための発振回路には，CMOS タイマ IC（LMC555CN）のバイポーラ回路を用いて 160Hz の方形波を出力した．これをトランジスタ（2DC1815GR）によって論理反転した順相・逆相 1 対の発振信号を元にフルブリッジドライバ（モータドライバ, BD6211F-E2, Vcc: 5V）を介し，リニア振動アクチュエータを 160Hz にて振動させる．リニア振動アクチュエータの配置および強度制御については 3.3 節で述べる．

3.2.2 センサ部

接地検出センサには接地面積が広く柔軟性があり装置構成が簡易な圧力センサ（DSR406, 感圧範囲: 0.2〜20N）を使用する．これをソール裏面の爪先・かかと側に 2 枚貼付する．

3.2.3 制御部および PC

圧力センサおよび各リニア振動アクチュエータへのアナログ値の入出力は Arduino UNO（ATMega 328P, クロック周波数: 16MHz）で行う．各圧力センサからはセンサ回路における電圧値が 0 から 1023 の 1024 段階で入力される．これを元に閾値に基づく接地判定を行い，歩行に合わせた仮想線分の提示を行う．なおプロトタイプシステムにおいては，ユーザの足の形状や圧力の分散の個人差によってセンサからの出力値が異なることを考慮し，ユーザ毎に手動でキャリブレーションを行うこととした．

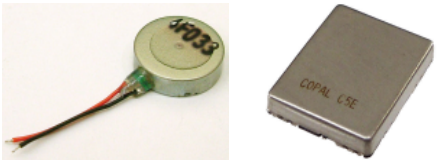
個別のリニア振動アクチュエータの振動強度は，PC 上のソフトウェア（Processing 3 [*2]）で計算する．ソフトウェアにはあらかじめソール上の振動アクチュエータの配置座標が登録されており，線分の傾きや切片の座標を変数に登録することで，振動アクチュエータの座標に対する仮想の線分が GUI 上に出力され，線分と各振動アクチュエータの距離に基づく強度計算が行われる．リニア振動アクチュエータの配置および強度計算式については 3.3 節および 3.4 節で述べる．

Arduino UNO と PC は USB ケーブルで接続し，ソフトウェアで計算した値をシリアル通信（9800bps）で Arduino UNO に送信する．プロトタイプシステムにおいては，PC と Arduino UNO を USB 接続するが，無線機能（Wi-Fi）付き Arduino ボード（Arduino YN ATmega32u4, IEEE 802.11bgn）等を使用することで，PC を使用しないデバイスのみのウェアラブル化を検討する．

3.3 足裏圧力分布に基づく振動アクチュエータの配置

ソールに埋め込む振動アクチュエータの配置に関して，

[*2] https://processing.org/



A) 偏心モータ（直径 1cm）　B) リニア振動アクチュエータ（11.2 x 14.0 [mm]）

図 4　偏心モータとリニア振動アクチュエータ
Fig. 4　Decentering motor and Linear-vibration motor

図 5　足裏圧分散に応じた振動アクチュエータ配置
Fig. 5　Placements of vibration actuators corresponding to pressure distribution

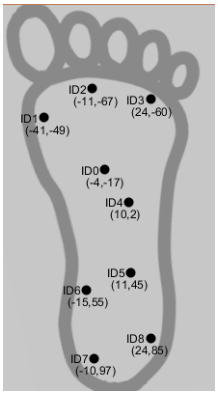


図 6　振動モータ設置座標
Fig. 6　Coordinates of motors

表 1　設置座標値
Table 1　Coordinates settings

ID	x	y
0	-4	-17
1	-41	-49
2	-11	-67
3	24	-60
4	10	2
5	11	45
6	-15	55
7	-10	97
8	24	85

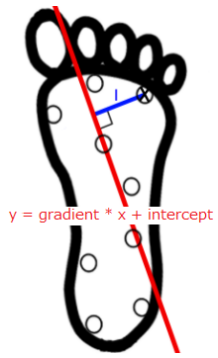


図 7　線分への距離
Fig. 7　Distances from a particular line segment

表 2　距離による減衰
Table 2　Attenuation by distance

ID	distance(cm)	stength
0	0.039	1.0
1	5.16	0.003
2	0.33	1.0
3	6.10	0.0
4	1.75	0.385
5	0.51	1.0
6	4.35	0.054
7	4.96	0.014
8	1.24	0.58

効果的に足裏への振動刺激を提示するために足裏にかかる圧力分布を考慮する．

足裏にかかる圧力は均一ではなく，歩行時には踵，小指球（小指の付け根部分），親指の順に強い圧力がかかるエリアが移動し，それぞれの中心部に圧力の強いエリアが出現する（図 5 歩行時のフットビュー（足裏にかかる圧力）[*3]）．このため，圧力の分布に合わせた配置場所および分布を検討する必要がある

まず，配置場所に関して，事前の評価において振動アクチュエータを踏む圧力が強すぎると，振動が吸収され感じにくくなる可能性が示唆された．そこで，足に接触しつつ，圧力が最も強い部分の周囲（図 5 中の緑色のエリア）に配置することが適当と考えた．

しかし，仮想の線分が振動モータが配置されないエリアを通過する場合に，振動モータによる直接的な振動を提示することができない．そこで，周囲の振動モータを用いて，ファントムセンセーション [22] による仮想の振動源提示に着目した．

また，人間の足裏皮膚上の 2 点弁別における分解能がおよそ 2cm[19], [23], [24] であること，事前評価によって振動アクチュエータの皮膚上の振動到達距離がおよそ 2cm であることを考慮し，振動アクチュエータ同士の間隔は複数の振動アクチュエータが相補的に刺激を提示できる 2cm 間隔とした．その結果図 5 に示すように，足先には 5 つ、踵には 4 つの計 9 つの振動アクチュエータを配置することとした．

3.4　仮想線分提示計算手法

仮想線分提示においては，ソール上の振動アクチュエータ座標および仮想の線分の座標を定義し，その線分から各振動モータ位置への最短距離を算出し，仮想の線分を刺激源とした場合の各振動アクチュエータ座標における減衰率を計算し，それに基づく各座標における振動強度を決定する．

ソフトウェア上で足のサイズを 25.5cm とした場合の足裏モデルを作成し，計 9 個の振動アクチュエータを配置（図 6）した結果，足の中心位置を原点 (x = 0, y = 0) とした場合の各振動アクチュエータの位置座標は表 1 の通りとなった．なお，ソフトウェアを構築している Processing における座標系は左手系（y 軸は原点より下方に向けて増加）である．

図 7 に足裏に配置した振動モータの座標と提示線分，および表 2 最短距離とそれに応じた強度出力の算出例を示す．

まず，線分 $y = gradient$(傾き)$\cdot x + intercept$(切片) からアクチュエータ座標値 (x_n, y_n) への最短距離 $distance_{min}$ は，以下の式で求める．

$$distance_{min} = \frac{|gradient \cdot x_n - y_n + intercept|}{\sqrt{gradient^2 + 1}}$$

次に，対数的に減衰する振動を模して，以下の式により

[*3] NPO 法人シニアライフ応援協会ブログ http://enjoy-senior.link/ より引用

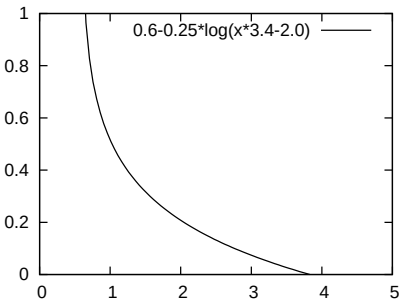


図 8　距離減衰する振動の設定
Fig. 8　Vibration-power attenuation by distance

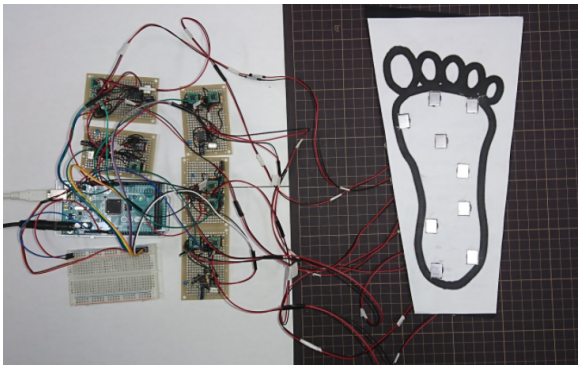


図 9　実験におけるデバイス設置風景（左：モータドライバなどの回路，右：足を載せる場所）
Fig. 9　Device setting in the preliminary experiment

距離減衰を設定した．なおこの係数は仮に設定したものであるが，線分から 5cm 程度離れた時にアクチュエータ動作が 0 になるよう考慮した．

$$gain = a - b \cdot \log(cx - d)$$

ただし本デザインでは各係数値を $a = 0.6, b = 0.25, c = 3.4, d = 2$ とする．

4.　予備検証

4.1　評価方法

プロトタイプシステムを用いて予備評価を行った．まず (1) システムに関する事前知識なしに振動アクチュエータの刺激から (1-a) どのような形状を感じるか，(1-b) どのような触覚を得られ，どのような意図を感じるかを評価し，その後 (2) 刺激が線分の表現と仮定した場合に，(2-a) どのように角度を認識するか，(2-b) 線分の太さや長さ，形状をどのように知覚するか，どのような意図を感じるかを評価する．(1-a) および (2-a) では，それぞれ角度を変え 3 回行った．

まず，(1-a) では足型のみを印刷した用紙（図 9）を用意し，足裏に刺激を感じた領域を塗りつぶさせた（計 6 回，6 種類）．その後，(1-b) インタビューを交えながら回答フォームに入力させた（計 1 回）．回答フォームにおける質問項目は表 3 の通りである．

表 3　質問項目 (1)
Table 3　Question items (1)

1	足裏の刺激がわかったか 専用の用紙に足裏に刺激を感じた部分を塗ってください
2	足裏に形のようなものを感じたか その理由・どんな感覚だったか どんな形に感じたか
3	形に境目のようなものは感じたか その理由・どんな感覚だったか
4	どのような感覚を表そうとしていたか

表 4　質問項目 (2)
Table 4　Question items (2)

1	どの程度，線のような形として感じられたか その線の角度は その線の長さは 3/6/10/15/20cm 紙に手書きで感じた線の角度や長さを記入してください
2	線に対して太さを感じたか 線の太さの幅はどのくらいだと感じたか 3/5/10cm 太さについて上記のように感じた理由・どんな感覚だったか
3	凹凸を感じたか その理由・どんな感覚だったか
4	どのような足裏感覚を表そうとしていたと感じたか
5	この足裏刺激を応用できそうなシーン

A: 点在タイプ (ID:7, $\tan\theta = -5$)　B-α: 局所タイプ (ID:5, $\tan\theta = -5$)　B-β: 偏在タイプ (ID:5, $\tan\theta = \frac{1}{2}$)

図 10　刺激を感じた場所のパターン
Fig. 10　Patterns of stimuli distribution

次に，(2-a) では足型のみを印刷した用紙（図 9）に，足裏に刺激を感じた線分を 1 本記入させた（計 6 回，6 種類）．その後，(2-b) インタビューを交えながら回答フォームに入力させた（計 1 回）．回答フォームにおける質問項目は表 4 の通りである．

(1-a) および (2-a) では，足裏に提示する仮想の線分 6 種類を用意した．6 種類の線分は全て原点（足の中心）を通る $\tan\theta = \frac{1}{2}(= 30°)$，$-\frac{1}{2}(= 150°)$，$1(= 45°)$，$-1(= 135°)$，$-1/2(= 30°)$，$5(\simeq 26.57°)$，$-5(\simeq 78.69°)$ の直線で，端点は設定しない（足幅よりも長い直線とする）．

4.2　評価結果

合計 6 名（男性 4 名，女性 2 名）に用紙への記入（1 人 6 回，計 36 回）とインタビュー（計 6 回）を行った．

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

4.2.1 (1) システムに関する事前知識なしでの評価

まず，(1) システムに関する事前知識なしに振動アクチュエータの刺激を評価した結果をまとめる．(1-a) において参加者が足裏に刺激を感じた領域を塗りつぶした用紙から，(A) 刺激を足裏の複数の局所に感じたパターン（図 10-A）と，(B)1 つの領域として知覚されるパターンの 2 つに分類される (以降，A を点在タイプ，B を偏在タイプと呼ぶ)．さらに，(B) 偏在タイプにおいては，(B-α) 局所的な円形の領域のみを感じたパターン（図 10-B-α）（局所タイプ）と (B-β) 楕円あるいは特定方向に長い領域を感じ取ったパターン（図 10-B-β）（広域タイプ）に分けられる．

(A) 点在タイプには 3 名 8 個の回答が該当する．これに分類された参加者のインタビューからは，与えられた刺激に対して明確な形状を感じ取らなかった傾向が見られる．またこれらの参加者においては，刺激を形状としてではなく，質感（例「砂の地面のようであった」）として感じ取るケースも見られた．このタイプにおいては，回答数が少ないこともあり，仮想の線分角度による違いについては判断できなかった．

次に，(B) 偏在タイプに関しては，(B-α) 局所的な円形の領域のみを感じたパターンと (B-β) 楕円あるいは特定方向に長い領域を感じ取ったパターンに分けられる．

(B-α) の参加者が記入した形状を実際の振動アクチュエータの振動箇所と照合しつつ，提示刺激の角度毎に見ると，$\tan\theta = -\frac{1}{2}$ の場合には回答と刺激を感じた箇所が異なる傾向が見られ適切に把握が難しかったと推測される．$\tan\theta = 1, \tan\theta = 5$ の場合には，一部の振動アクチュエータの箇所と回答の箇所に似た傾向が見られたが，それらは主に母指球付近の振動アクチュエータであるなど刺激を正しく認識された可能性のある箇所には偏りがあるように感じられる．対して，$\tan\theta = \frac{1}{2}$ の場合には，実際の刺激提示箇所と回答が相似するような傾向がみられた．

これらの結果から，(B-α) パターンの回答を行った参加者は，複数の振動アクチュエータの刺激をそれら合成されたものではなく，振動アクチュエータ単体の振動あるいは少数の振動アクチュエータの振動をもとにした限られた領域の刺激として感じた可能性が考えられる．このことから，振動刺激を感じ取りやすい箇所とそうでない箇所が表れる可能性についても考慮する必要がある．

(B-β) パターンに分類された回答からは，提示した刺激に対して特定方向に長い領域を感じた傾向がみられる．しかしながら，明確に仮想の線分と記述された領域が対応するような回答は見られなかった．

一方で，領域の分布の傾向を仮想線分の角度間で比較すると，角度によって刺激を感じる特定の領域に違いが見られることが分かる．具体的な傾向は以下の通りである．

- $\tan\theta = -\frac{1}{2}$ のとき，足の中央から外側に向けて感知している
- $\tan\theta = -1$ のとき，提示されている震源を全て感知していたが、範囲の広がりは斜めではなく縦方向に伸びる傾向
- $\tan\theta = -5$ のとき，足先で感知はせず、踵で主に刺激を感じ取っていた
- $\tan\theta = \frac{1}{2}$ のとき、足の外側、垂直中央に感覚が集中したが、そこから水平中央・内側に感覚は伸びなかった
- $\tan\theta = 1$ のとき，点の時と同じで、母指球・指尖球に感覚が集中
- $\tan\theta = 5$ のとき，主に踵で感知するが、やや足外側よりに感知範囲が足先方向に伸びている

これらをまとめると，横方向への提示 ($\tan\theta = \frac{1}{2}, \tan\theta = -\frac{1}{2}$) の間では，刺激を感じた場所や範囲に明確な違いは見られなかった．一方で，縦方向への提示 ($\tan\theta = 5, \tan\theta = -5$) ではいずれも踵では同じ場所・範囲で刺激を感じたと推測されるが、$\tan\theta = 5$ の場合ではより縦に感覚が伸びたように捉えられる．斜め方向への提示 ($\tan\theta = 1, \tan\theta = -1$) では、角度に応じて各指球周辺で感覚範囲が左右にはっきりと分かれていた．また，これらの結果やインタビューから，母指球と足の外側では振動をよく感じることができる反面，指先方向などの足の内側は振動を感じづらい可能性が考えられ，足裏の形状や部位によって振動の感じ方が大きく異なることも考えられる．

振動刺激が触覚に与える影響に関して，ほとんどが形のないもの（砂などの細かいもの、もしくは電気のピリピリした刺激)、形あるものとしても薄いもの（すぐ割れそうなもの、変形しそうなもの）を想像したという回答が得られた．

4.2.2 (2) 刺激を線分表現と仮定した場合における評価

つぎに，(2) 刺激を線分表現として仮定することを参加者に事前に伝えた場合の振動アクチュエータの刺激を評価した結果をまとめる．(2-a) において参加者が足裏に感じた線分を記入した用紙から，提示した仮想の線分の角度がどのように認識されたかを考察する．

縦方向の提示に関しては，比較的縦方向に長い線分として認識される可能性がある．一方で，横方向と斜め方向に関しては，線分の長さが短く，局所的に線が引かれ，その方向は一定ではない傾向が見られた．

具体的には，表 5 のような特徴が見て取れる．これらの結果をまとめると，横方向に提示した場合 (-$\tan\theta = \frac{1}{2}$, $\tan\theta = \frac{1}{2}$) におけるそれぞれのアンケートを比べると，2 つの間に違いはあまり見られなかった．斜めに提示した場合 ($\tan\theta = 1, \tan\theta = -1$) においては，仮想の線分よりもやや母指球・指尖球・小指球に沿って知覚しやすいと推測される．縦方向への提示 ($\tan\theta = 5, \tan\theta = -5$) では，足側面に沿って縦方向の領域で知覚されると推測される．

このことから，参加者に刺激が線分を提示しようとしていることを伝えた上で，縦方向に関しては比較的長い縦方

表 5　角度毎の回答
Table 5　Results for each angles

$\tan\theta$	回答
5	全回答が足中央を通過，ただし角度は縦や斜めなど, 方向が定まらない.
1	母指球, 指尖球に沿った横向きの線を回答.
1/2	足の外側で線を感じるものの，短線（およそ 3cm）.
-5	線の長さは十分だったが, 角度は $\tan\theta$=5 の線形に近似.
-1	提示した角度通りの線の長さは 6cm 以上だった一方で，提示線分と直交する線では 3cm 以下の太い線が回答された.
-1/2	指球に沿った短線と，外側と踵を通る長線の二つに回答が別れた.

向の刺激として認識される可能性があるが，斜め方向と横方向への提示では足の特定の位置への刺激を強く感じ，位置や角度ともに回答にばらつきが多く見られた．

5. 考察

プロトタイプシステムを用いた予備評価にもとづき，振動アクチュエータによる線分提示手法について考察する．

まず (1) システムに関する事前知識なしに振動アクチュエータの刺激からどのような形状を感じるかについては，線分としての知覚はされなかったが，仮想線分の角度を変えることによって刺激を感じる部位とその形状を変化させることができると考えられる．

一方で，課題として，振動アクチュエータの刺激をそのまま知覚するケースでは，刺激が一つの領域ではなく，個々の振動アクチュエータを点としてばらばらに認識してしまう可能性も考えられる．これは今後，線状の誘導ブロックだけでなく，点状の警告ブロックを表現するにあたって問題となる可能性があり，振動アクチュエータ同士の距離や個数を変え，一つの領域として相補的に提示できるよう調整を行う必要がある．

また，角度を変化させても，足裏の特定の領域において刺激を強く感じてしまう傾向や個人差もみられた．足裏の凹凸のある形状や土踏まずの位置など接地する場所の個人差が影響し，刺激を感じやすい部位と感じにくい部位ができ，刺激を感じる領域に影響した可能性が考えられる．

これに関しては，インタビューにおいて，土踏まずに刺激がなかったため形状が分かりづらいという意見が得られた．足裏の圧力分布に関する事前の調査から土踏まずでは感覚を感知できないものと考えていた．しかし，実際の点字ブロッグでは凹凸が大きく土踏まずなどの凹んだ部分に対しても影響がある可能性がある．そこで今後，土踏まずへの刺激の有無による精度の変化を検証する必要がある．

次に，(2) 刺激が線分の表現と仮定した場合に線分の方向や形状をどのように知覚するかに関する評価からは，仮想の線分の刺激を縦方向に提示した場合には，縦に長い線分を知覚する参加者も見られた．一方で，横方向や斜め方向の仮想線分刺激提示においては，線分が足の中心位置を通らない回答も多く見られ，線分の位置や方向，長さに関しても正しく提示することが難しいと考えられる．

このことから，縦方向の線分を示す刺激かそうでないかについては，判別が可能である可能性も考えられるが，その方向が横あるいは縦であるかについて正しく知覚されるとは言い難い．

原因として，縦に長い足の形状から，縦方向には多くの振動アクチュエータが設置される一方で，縦に比べ幅の狭い横方向については，振動アクチュエータの個数が減少するためと考える事ができる．このことから，縦方向に比べ横方向の振動アクチュエータの密度を増加させることで，刺激の位置や方向をより明確に示すことができるではないかと考える．

これらの考察の結果から，プロトタイプを用いた評価では，仮想線分の提示角度を変化させることによって，足裏の異なる領域に刺激を提示することが可能であると推測される．また，刺激が線分を示しているということを事前に教示することで，縦方向の線分かそうでないかが知覚される可能性についても考えられる．今後，足の凹凸のある形状にソールを合わせることで，足裏の各部位における振動アクチュエータの振動知覚に差が出ないような設計を行うとともに，振動アクチュエータの密度を増加させることで，刺激の位置や減衰をより直接的に刺激として提示することで棒状の線分を感じさせるように改良を行い，方向提示に関する検証および統計的検定を行う．

上記の考察とは別の側面として，足裏刺激には安全に注意すべき点がある．デバイスに慣れるまでは，立位姿勢 [25], [26] や平衡感覚 [27] に影響を与えることも示されており，今後安全なシステム利用が見込まれるかについても検証する必要がある．

6. おわりに

本稿では，進行方向を示す誘導ブロックを仮想的に設置し足裏へ提示するウェアラブルデバイスとして，足裏に誘導ブロック上の凸線を提示するインソールデバイスを提案し試作した．このデバイスは，インソール上に設置した複数の振動モータを振動刺激アレイとして用いるもので，足裏に仮想的に提示したい一本の線分から各振動モータ座標への最短距離により振動強度を減衰させることで，誘導ブロック上の凸線のように進行方向を示すことを狙う．歩行に応じて触覚提示するため，足裏に設置した圧力センサにより接地を検出し動作する．

予備的検証の結果，仮想線分の提示角度を変化させることによって，足裏の異なる領域に刺激を提示することが可能であると推測される．また，刺激が線分を示しているということを事前に教示することで，縦方向の線分かそうでないかが知覚される可能性についても考えられる．今後，

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan

本予備的検証に基づくシステム改良を行い，横・斜め方向の線分提示の精度を含めた検証を行う必要がある．

さらに，今後の展望として，誘導ブロックを提示する際の接地面の傾きや路面状況による線分提示効果について検証が必要だと考えられるほか，立位だけではなく歩行時の提示による安全な進行誘導の実現性についても検討したい．

謝辞 本研究は公益財団法人立石科学技術振興財団の助成を受けて行われた．ここに記して感謝の意を表す．本研究を推進するにあたり，先行事例と実装例を提供してくださった関西大学米澤研究室の黄訓達氏に感謝する．

参考文献

[1] 渡辺博文, 榎堀優, 米澤朋子, 間瀬健二. 白杖先端への衝撃刺激提示による歩行支援の実現へ向けた仮想的な壁と歩行誘導の再現および歩行誘導に関する一検討. 第 55 回情報処理学会 UBI 研究会/ASD 研究会, 2017-ASD-9, pp. 1–6, 2017.

[2] Koslover, R. L., Gleeson, B. T., De Bever, J. T., and Provancher, W. R. (2012). Mobile navigation using haptic, audio, and visual direction cues with a handheld test platform. IEEE Transactions on Haptics, 5(1), 33–38.

[3] Ross, D. A., and Blasch, B. B. (2000). Wearable interfaces for orientation and wayfinding. In Proceedings of the fourth international ACM conference on Assistive technologies, pp. 193–200.

[4] Thomas, B., Demczuk, V., Piekarski, W., Hepworth, D., and Gunther, B. (1998). A wearable computer system with augmented reality to support terrestrial navigation. In International Symposium on Wearable Computers. pp. 168–171.

[5] 山下清司, 長谷川孝明. 視覚障がい者誘導用ブロックを用いた M-CubITS 歩行者ナビゲーションシステムについて. 電子情報通信学会論文誌 A, 88(2), 269-276. 2005.

[6] 渡邊紀文, 三門裕明, 大森隆司. 周辺視ディスプレイと振動デバイスを利用した歩行誘導効果と感覚統合のモデル構築. 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol.28, No.3, pp.608–616, 2016.

[7] 鎌田一雄, 山下智哉, 奥原麻菜美, 今井達二己. 盲人のための歩行支援メッセージに関する検討. 電子情報通信学会技術研究報告, 福祉情報工学. vol.111, num.58, pp.7–12, 2011.

[8] 中村和弘, 青野嘉幸, 田所嘉昭. 視覚障害者用誘導型歩行支援システム. 電子情報通信学会論文誌 D, 79(9), pp. 1610–1618, 1996.

[9] Loomis, J. M., Golledge, R. G., and Klatzky, R. L. (2006). Navigation system for the blind: Auditory display modes and guidance. Navigation, 7(2).

[10] 森英雄, 安部圭祐, 竹谷哲也, 依田一朗, 小谷信司. 視覚障害者向け携帯型歩行支援装置による駅における誘導. 電子情報通信学会技術研究報告. HCS, ヒューマンコミュニケーション基礎, vol.103, num.587, pp.1–6, 2004.

[11] 大倉元宏, 三浦崇路, 富永友樹, 丸山雄大, 池上敦子. 周囲音が視覚遮断直進歩行に及ぼす影響. 人間工学, Vol. 42, No. 2, pp.119–125, 2006.

[12] Dakopoulos, D., Boddhu, S. K., and Bourbakis, N. (2007). A 2D vibration array as an assistive device for visually impaired. In IEEE International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE 2007). pp. 930–937.

[13] Ando, T., Yamamoto, M., Seki, M., and Fujie, M. G. (2009). Development of a cane with a haptic interface using IC tags for the visually impaired. IROS 2009. pp.3196–3201.

[14] 古川裕士, 濱川礼. センサーによる位置推定と仮想点字ブロックを用いて視覚障害者を歩行支援する電子白杖. 電子情報通信学会技術研究報告 (福祉情報工学), vol.113, num.272, pp.71–76, 2013.

[15] Wang, Y., and Kuchenbecker, K. J. (2012). HALO: Haptic alerts for low-hanging obstacles in white cane navigation. IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 527–532.

[16] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 朝原佳昭, 杉本麻樹, 前田太郎. 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究. 情報処理学会論文誌, vol.46, num.5, pp.1354–1362, 2005.

[17] 佐藤史規, 足底への振動刺激を用いたユーザ定義型の情報提示, インタラクション 2016, pp. 1094–1099, 2016.

[18] 雨宮智浩, 池井寧, 広田光一, 北崎充晃. 歩行を模擬した足底振動刺激による身体近傍空間の拡張. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.21, No.4, pp.627–633, 2016.

[19] 鈴木隆史, 曲谷一成. リニア振動アクチュエータを用いた方向提示デバイスの開発. 東海大学紀要. 工学部, 56(2), pp.49–54, 2016.

[20] 鈴木隆史, 曲谷一成. リニア振動アクチュエータを用いた触覚提示システムの開発. ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1A1-19b4, 2016.

[21] 大滝英征, 門井裕紀, 琴坂信哉, 長坂保美. 点字ブロックの存在を手のひらに振動で伝達する白杖の研究. 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 724, pp. 3962–3968, 2006.

[22] Alles, D. S. (1970). Information transmission by phantom sensations. IEEE transactions on man-machine systems, 11(1), 85-91.

[23] Gerstein, G. L., Gross, C. G., and Weinstein, M. (1968). Inferotemporal evoked potentials during visual discrimination performance by monkeys. Journal of comparative and physiological psychology, 65(3p1), 526.

[24] 原田寛之. 歩行感覚支援のための足底刺激アクチュエータの研究開発. 法政大学大学院デザイン工学研究科紀要 Vol.4, 2015.

[25] 安田勝一, 加藤智久, 山本紳一郎. 足底部への振動刺激が立位姿勢に及ぼす影響. ABML2011, O2-14, 2011.

[26] 中田五月, 橋本悠希, 梶本裕之. 姿勢知覚制御のための足裏皮膚刺激の最適化. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 1D2-6, 2009.

[27] 中田五月, 橋本悠希, 梶本裕之. 足底皮膚刺激を用いたぐらつき感提示. 第 9 回（社）計測自動制御学会　システムインテグレーション部門，2008

ⓒ 2017 Information Processing Society of Japan