



足底触覚による床型歩行誘導システム構築に向けた基礎検討

Preliminary Study on Foot Perception Towards Developing A Floor-Based Navigation System

岡崎菜琳^{1)*}、吉田貴寿¹⁾、Alfonso Balandra²⁾、柏野善大²⁾、稲見昌彦²⁾

Narin OKAZAKI, Takatoshi YOSHIDA, Alfonso BALANDRA, Zendai KASHINO and Masahiko INAMI

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, narin@star.rcast.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

概要: 足底はほぼ常に床や地面といった外部環境に接しており、これらの環境がアクティブに作用することで、今よりも多様な情報を受け取ることができる可能性がある。本研究では、この関係性を利用した歩行誘導システムを提案する。まず人間の足底触覚による空間知覚特性を調べた。実験で得られた知覚特性に基づき、システムの設計指針を提示した。最後に、環境型ディスプレイにより実現される、新たな身体と空間の関係性の展望を述べる。

キーワード: 足底触覚、床インタフェース、歩行誘導、空間知覚

1. 序論

人間は日常的に、足底を介して床や地面から触覚的に情報を受け取っている。例えば、足底で触れている床の質感を高い精度で識別できることが知られている [1]。足底は身体部位の中でも特に多くの時間、外部環境に触れている箇所であるという観点から、人間に触覚提示を行う環境型インタフェースとして床は有用である。本稿では足特有の役割である歩行という動作に着目して、人間を目的地に誘導するようなシステムの考案をする。

視聴覚的な情報の提示による歩行誘導を行う試みはいくつか行われてきた。Ishii らは視覚的な介入に取り組んでおり、焦点領域を編集して錯視を引き起こすことで、ユーザが無意識に進行方向を変えるようなシステムを提案した [2]。Massiceti らは立体音響を用いることで、最小限の指示で音声情報のみを用いたナビゲーションに成功している [3]。我々は視聴覚的な注意を伴わない歩行誘導として、足底への触覚提示に着目した。これまで、フットウェア型デバイスにより振動 [4] や傾斜 [5] を提示するものは提案されてきた。本研究では環境型のシステムを考えることで、フットウェア型のものと比較してユビキタス性やアクセシビリティの高い歩行誘導を目指す。

環境から足底に触覚提示する場合、接している環境からの刺激に対する知覚特性をあらかじめ知る必要がある。足底の触覚感度や外的要因の影響度合いは、状況によっても大きく変化する。例えば、起立時は足底が体重による圧力を受けることにより、着席時よりも知覚閾値が高くなる [6]。さらに、歩行時やフットウェアを着用している時は、足底に加わる圧力や地面との接触時間が異なることが分かって

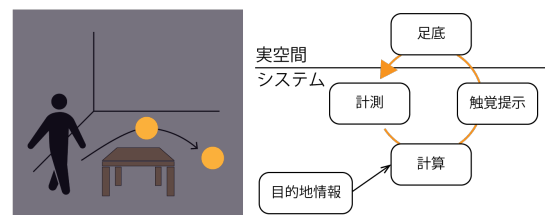


図 1: 床型歩行誘導システムの概要

いる [7]。このように足底と環境との関係性は状況によって変化するため、足底への触覚提示を行う際は、多様な状況を考慮する必要がある。

本研究では、足底触覚の空間知覚特性に基づく床型歩行誘導システムを提案する。これまでの足底触覚に関する調査では、足底が直接接触される部分のみの知覚に着目しているものが多かった。我々は、接触部分のみならず、そこから広がる空間の知覚に着目する。これを明らかにすることにより、床型歩行誘導システムにおける信号刺激の設計指針を獲得する。

2. 床型歩行誘導システムの構想

2.1 システム概要

視聴覚は特に多くの情報量を持つ感覚であり、これまでの歩行誘導システムの多くはこれらの感覚入力に依存してきた。しかし、暗闇や騒音環境下ではシステムを適用できなくなる。一方で、床と足底の触覚は普遍的なものであり、床から触覚刺激を提示することにより、視聴覚に頼らない歩行誘導システムが実現される (図 1 左)。

この時のシステム図は図 1 右のようになる。床の上に立つユーザの情報をセンシングする「計測部」、その情報をもとに最適な刺激を導き出す「計算部」、実際にアクチュエー

*現所属：ソニーグループ株式会社 R&D センター
Tokyo Laboratory 15 4 課

タを制御する「触覚提示部」から構成され、刺激が足底に伝達される。計測部では、ユーザの足の中心位置と角度の情報が取得できれば十分であり、Yoshida らが開発した床荷重計測システム [8] で実現可能である。計算部では、現在地と目的地、障害物を考慮して逐次的な誘導を行うのが望ましい。触覚提示部では、所望の行動をユーザに促すために必要な刺激を適切に設計する必要がある。本稿では特に、この刺激提示の設計指針を獲得することを目的とする。

2.2 設計空間

二次元平面上でのユーザの移動ルールは、距離と角度を用いた表現である極座標に従うものとする。本稿ではこの歩行誘導手法を極座標コントロールと呼ぶ。極座標コントロールにおいて促されるユーザの行動を F・R・L・S の 4 種類に定めた (図 2 左)。F は Forward (直進)、R は Turn Right (右回転)、L は Turn Left (左回転)、S は Stop (停止) を表している。

ユーザに与える信号刺激は、促したいユーザの行動に対応したものを設計する必要がある。信号刺激の提示方法には任意性があるため、設計者には適切なタイプを選ぶことが求められる。ユーザの行動 4 種類に対応した信号刺激タイプの例として、回数、強度、方向などが挙げられる。回数を用いる場合、行動の種類ごとに異なる回数の刺激を提示する方法は恣意的であり、また信号刺激の種類が増えた場合にユーザの負担が大きくなる。強度を用いる場合、ユーザの取るべき行動との対応づけが困難になる可能性がある。歩行誘導においてユーザの取る行動は空間内の移動であるため、空間情報である方向を信号刺激タイプとして用いれば、直感的な誘導が可能になると考えられる。極座標コントロールにおける方向情報を持った信号刺激と足の位置の対応としては、例えば図 2 右に示したようなものが考えられる。

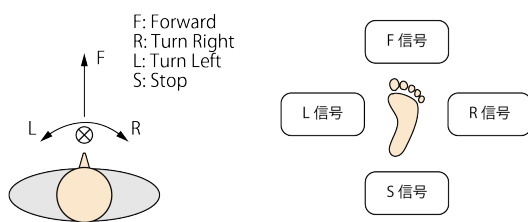


図 2: 極座標コントロールにおけるユーザの行動と信号刺激の対応例

2.3 設計に必要な要素の分解

前節で設定した F・R・L・S という行動に対応したコマンド体系が実際に成立するためには、足底での与えられた刺激に対する方向弁別能力が必要である。そのため、本稿では足底の触覚的な方向弁別能力を計測した。歩行状態においては、常にどちらかの足は床に接触しているため、片足への刺激提示で方向弁別が行えるのであればそれが望ましい。しかし、現時点ではそれが明らかになっていないため、両足接地の場合についても計測を行った。

3. 足底パラメータの計測

本章では、提案システムにおける信号刺激の設計指針を得るための実験について述べる。足底の接触部分からは離れた地点に与えられた刺激の知覚について調べるための心理物理実験として、恒常法による方向弁別能力の計測を行った。

3.1 実験セットアップ

本実験で製作した実験装置を図 3 に示す。板のサイズは 1380 mm×400 mm とした。

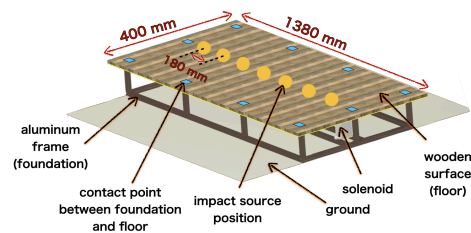


図 3: 実験装置の概略図

本研究で提案する歩行誘導システムは室内での使用を想定しているため、裸足の状態で実験を行った。ソレノイドの衝撃音による音源定位の影響を減らすため、参加者はノイズキャンセリングイヤホン (AirPods Pro, Apple Inc.) とノイズキャンセリングヘッドホン (WH-1000XM4, Sony Co.) を装着した。ピンクノイズはヘッドホン側から再生し、ノイズの音量は全ての参加者で統一した。視覚については、参加者がアイマスクを装着することにより情報を遮断した。また、衝撃提示時には、それと同時にピープ音をヘッドホン側から鳴らした。足底への触覚刺激として、ソレノイド (CB15670520, タカハ機工) で衝撃を板に与えた。全てのソレノイドはドライバー回路 (SB-6565-01, タカハ機工) によって駆動され、印加電圧は一貫して 15 V とした。

3.2 実験概要・手順

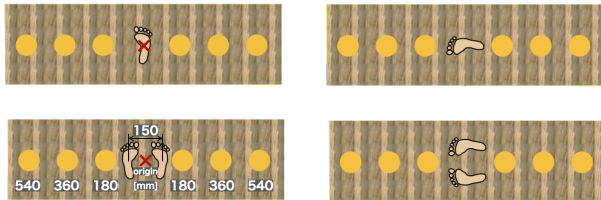
本実験には晴眼の成人 15 名 (女性 2 名、男性 13 名、22 ~ 31 歳、平均年齢 25 歳) が参加した。

原点は板の中央 (端から 700 mm) の地点とした。衝撃振動源までの距離は、原点から 180・360・540 mm の 3 種類とし、原点に対して両側にそれぞれ配置した。これらの計 6 地点から衝撃を与え、原点位置に配置されたソレノイドは使用しなかった。

本実験の手続きを以下に述べる。床と足底の接触条件や衝撃振動源までの位置関係によって方向弁別精度に違いが生じるかを確認するために、実験全体で「接地する足」・「弁別方向」の 2 つの分類を設けた。「接地する足」は右足の場合と両足の場合の 2 通り、「弁別方向」は左右 (L/R) もしくは前後 (F/B) の 2 通りであり、それらの組み合わせでタスクは計 4 セッションとした。弁別方向ごとの足と衝撃振動源の位置関係は図 5 に示される通りである。図 5a に示したように、参加者は、接地する足が右足の場合には原点位置に、両足の場合には原点を中心に足間距離を 150 mm に保って板に乗せた。タスク中は、1 試行につき、6 種類の衝撃振動源のうちのランダムに選ばれた 1 地点から刺激が



図 4: 実験風景 (両足、F/B)



(a) 左右弁別 (L/R)

(b) 前後弁別 (F/B)

図 5: 足と衝撃振動源の配置

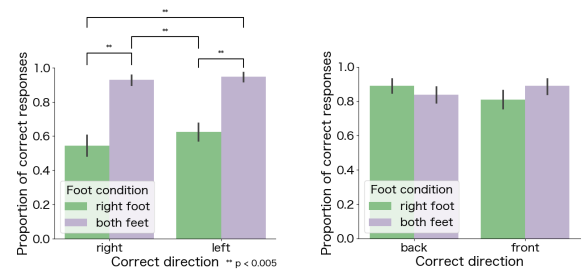
提示される。刺激が提示されるごとに、参加者は右手に持ったワイヤレスハンディマウス (M-RT1DRBK, ELECOM CO.,LTD.) のボタンを押下することにより、足の位置に対してどちら側に衝撃振動源があるかを 2 択で回答した。回答してから 1 秒後に次の試行に移り、新たな衝撃を与えた。1セッションにおける各地点の衝撃提示回数は 20 回であり、試行回数は 6 箇所 × 20 回の計 120 回であった。

3.3 結果と考察

接地する足による違い 接地する足の 2 通りの条件について、弁別方向ごとに正答率を比較した。Shapiro-Wilk 検定を行った結果、どちらの弁別方向でも正規分布に従わない群が存在したため、事前解析として Friedman 検定を行った後、事後解析として Games-Howell 検定を行った。その結果、図 6 に示すような条件間で有意差が認められた ($p < 0.005$)。この図から読み取れるように、弁別方向が F/B の場合は接地する足による正答率への影響はなかった。一方 L/R の場合は、接地する足が異なる全ての条件間で有意差があることから、左右弁別の正答率への影響は大きいことが分かった。つまり、右足のみを用いて左右方向の弁別をするときは顕著に精度が下がり、前後方向では接地する足による精度の違いはないことが確認された。

右足のみを接地したとき、L/R よりも F/B の方が正答率が上がったことには、縦方向に長く横方向に短いという足の形状が影響していると考えられる。縦方向に長いということは、爪先と踵間の距離が長いことにより両者で感じる振動強度差が大きく、横方向に関しては内側縦アーチと外側縦アーチ間の距離が短いため振動強度差が小さい。これより、足底部位間の振動強度差を頼りに衝撃振動源推定が行われていると考えられる。また、右足のみでの左右方向弁別では、左右どちらも同じ回数衝撃が提示されていたが、ほとんど片側からしか衝撃を感じなかったという参加者のコメントもあった。そのどちらの方向の回答割合が高いかは参

加者によって異なり、正答率が同じであっても方向の感じ方には個人差があることが見受けられた。



(a) 左右弁別

(b) 前後弁別

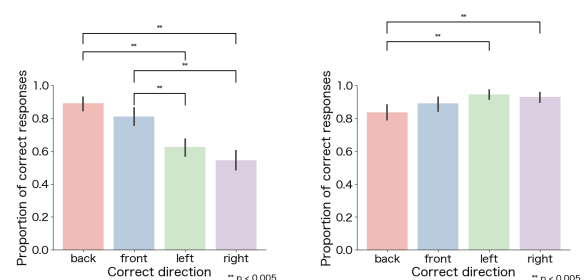
図 6: 右足のみ接地の場合と両足接地の場合の

方向別正答率の比較

弁別方向による違い 弁別方向の 2 通り (L/R、F/B) の条件について、接地する足ごとに正答率を比較した。ここでも同様に Games-Howell 検定を行った結果、図 7 に示すような条件間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。この図から読み取れることとして、下記の点が挙げられる。

1. 右足のみを接地する場合、前後・左右間で正答率に有意差がある (図 7a)。
2. 両足を接地する場合、後ろ方向の推定精度は左右に比べて有意に低い (図 7b)。

1 点目については上述した通り、前後の推定は片足だけで行える一方で、左右は両足間の情報の比較が重要であることに起因すると考えられる。2 点目の結果からは、両足間の比較を行った場合の方が方向弁別精度が高くなると言える。本実験では両足接地の場合、図 5 に示したように足を横並びとしたため、前後の両足間比較はできなかった。縦方向に並べた場合には前後の方向弁別精度がさらに高くなる可能性があり、これは今後の調査課題である。



(a) 右足のみ接地

(b) 両足接地

図 7: 弁別方向ごとの正答率の比較

4. 床型歩行誘導システムにおける信号刺激の設計指針

前章で得られた実験結果から、床型歩行誘導システムの設計指針を導出する。F・R・L・S という行動を誘導するための信号を、F・R・L・B という方向の触覚刺激に符号化する。片足の場合は、前後の方向弁別が約 85% で可能で

あったのに対し、左右の方向弁別は約 55%であった。一方で両足の場合は、全方向で正答率は 80%以上であり、左右の方向弁別に関しては約 90%であった。つまり、図 2 右のような対応ではなく、片足接地時に F・S 信号、両足接地時に R・L 信号を出すのが適切である。

本稿で導いた、歩行誘導システムにおけるユーザーの状態遷移図を図 8 に示す。ただし、歩行時は片足接地、静止時は両足接地であるとする。直進させたい場合、歩行時も静止時は F 信号を出す。右もしくは左に回転させたい場合、歩行時は S 信号を出して静止状態にした後に R/L 信号を出し、静止時は回転させたいだけ R/L 信号を出す。静止させたい場合、歩行時は S 信号を出し、静止時はそのままが良い。以上のような信号刺激の提示方法で、極座標コントロールが実現される。

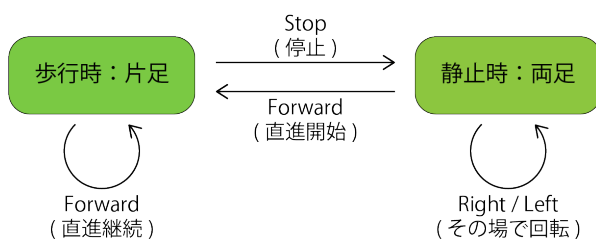


図 8: 信号刺激に対するユーザーの状態遷移図

5. 結論

本稿では、足底と床の普遍的な接触関係に着目し、触覚提示による床型歩行誘導システムを提案した。まず、システムの全体像や設計に必要な要素を述べた。信号刺激についての設計指針を得るため、足底触覚による刺激の方向弁別能力を測る心理物理実験を行った。実験の結果、左右弁別は両足で行う必要があり、前後弁別は片足だけでも十分に行えることが分かった。この知見から、極座標コントロールにおける信号刺激の提示規則を導いた。

本研究では、身体に対してアクティブに作用する床を題材にとり、新たな空間のあり方の一例を示した。特に本稿で提案した床型歩行誘導システムは、作用することによって情報提示を行うため、環境型ディスプレイと捉えることができる。基本的に日常生活における外部環境、特に屋内環境は静的であり、人間に対してアクティブに作用することはない。本研究で着目した床のみでなく、壁や天井、家具などといったものが動的で柔軟なものである場合、身体と空間の新たな関係性を構築することができる。環境知能の領域の研究が近年盛んに行われているが、その知能をもって人間とのインタラクションを形成するためには環境が賢くなるだけでは不十分であり、人間側についての理解も深める必要がある。我々の研究で人間の空間知覚特性の一端を明らかにしたことによって、身体と空間に新たな関係性をもたらすような環境型ディスプレイの実現に一步前進したものと信じている。

謝辞 本研究は、JST ERATO JPMJER1701 の支援を受け

たものである。

参考文献

- [1] Bruno L. Giordano, Yon Visell, Hsin-Yun Yao, Vincent Hayward, Jeremy R. Cooperstock, and Stephen McAdams. Identification of walked-upon materials in auditory, kinesthetic, haptic, and audio-haptic conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 131, No. 5, pp. 4002–4012, 2012.
- [2] Akira Ishii, Ippei Suzuki, Shinji Sakamoto, Keita Kanai, Kazuki Takazawa, Hiraku Doi, and Yoichi Ochiai. Graphical manipulation of human's walking direction with visual illusion. In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '16, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [3] Daniela Maccietti, Stephen Lloyd Hicks, and Joram Jacob van Rheede. Stereosonic vision: Exploring visual-to-auditory sensory substitution mappings in an immersive virtual reality navigation paradigm. *PLOS ONE*, Vol. 13, No. 7, pp. 1–32, 07 2018.
- [4] Ricardo Tachiquin, Ramiro Velázquez, Carolina Del-Valle-Soto, Carlos A. Gutiérrez, Miguel Carrasco, Roberto De Fazio, Andrés Trujillo-León, Paolo Visconti, and Fernando Vidal-Verdú. Wearable urban mobility assistive device for visually impaired pedestrians using a smartphone and a tactile-foot interface. *Sensors*, Vol. 21, No. 16, 2021.
- [5] M. Frey. Cabboots: Shoes with integrated guidance system. In *Proc 1st Int. Conf. Tangible Embedded Interaction*, TEI '07, p. 245–246, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.
- [6] R. L. Mildren, et al. Foot sole skin vibration perceptual thresholds are elevated in a standing posture compared to sitting. *Gait & Posture*, Vol. 43, pp. 87–92, 2016.
- [7] R. W. Soames. Foot pressure patterns during gait. *J Biomed. Eng.*, Vol. 7, No. 2, pp. 120–126, 1985.
- [8] Takatoshi Yoshida, Narin Okazaki, Ken Takaki, Masaharu Hirose, Shingo Kitagawa, and Masahiko Inami. Flexel: A modular floor interface for room-scale tactile sensing. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '22, p. 901–911, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.