

足先の皮膚温に基づき作業者の休憩・歩行促進を行う タンブラー型アンビエントディスプレイの開発

渡邊 珠海¹ 平尾 悠太郎¹ ペルスキアエルナンデス モニカ¹ 内山 英昭¹ 清川 清¹

概要：デスクワークにおける長時間の座位は、下肢の血流停滞を引き起こす。これにより、作業の生産性が低下するだけでなく、動脈硬化や血栓症、心血管疾患などの健康被害リスクが上昇する。これらの影響を解消する方法として、定期的な歩行が効果的であることが明らかとなっている。そこで、本研究では、作業の邪魔にならない、強制力が少ないデザインを目指し、足先の血流状態と相関の高い足先の皮膚温に基づき作業者の休憩と休憩時の歩行を促すタンブラー型アンビエントディスプレイを提案する。

1. はじめに

日本においてデスクワークを行う就業者は 2020 年時点で 1500 万人以上であることが報告されている^[1]。デスクワークの課題として長時間の座位が挙げられ、特に日本人は諸外国と比較して座位時間が長いことも報告されており、日常的な身体活動量が少ないことが問題視されている^[2]。座位姿勢を長時間継続すると、足先の血流速度の低下、および血液粘度の増加が起こることが明らかとなっている^[3]。これにより、血管の拡張・収縮を調整する機能が悪化し、血液がスムーズに流れる力が弱まることで、足先での血流停滞が引き起こされる。足先の血流停滞は、むくみやしびれなどの症状を引き起こし、作業中の集中力低下や疲労感の増加など作業効率を低下させる要因となりうる。また、血流の悪い状態が長く続くと、動脈硬化や血栓症、心血管疾患などの健康被害リスクが上昇することが明らかとなっている^[4]。これらの影響を緩和し血流を循環させるために、長時間の座位を解消して定期的な歩行が効果的であることが報告されている^[5]。以上のことから、作業者の血流の状態をモニタリングし、それに基づいてこまめな歩行を取り入れるように促すことが重要である。

足先の血流状態をモニタリングする方法として、皮膚温を用いることができる。血流量が減少するのに伴い、皮膚温が低下することが明らかとなっている^[6]。このことから、皮膚温は血流の変化の間接的な指標として有効であるといえる。近年では、靴下などの足元にセンサを搭載し、足先の皮膚温をモニタリングする製品が存在する^{[7][8]}。これらの多くはスマートフォンアプリを介して情報提供され



図 1 提案システムのイメージ

るが、運動促進は行われていない。また、作業中における情報伝達は、方法によっては作業の集中を阻害する場合もあるため、作業の邪魔にならない方法を考える必要がある。

そこで本研究では、足先の血流状態に基づき、作業を阻害せず運動を促すシステムの開発を目的とする。

2. 関連研究

2.1 作業を阻害しない情報伝達手法

作業者に情報を伝える手段として、PC やスマートフォンなどのディスプレイを介した通知や、オブジェクトの震動が挙げられる。PC やスマートフォンを介したアプリによるポップアップやプッシュ通知は、視覚的にわかりやすい一方で、異なる内容であっても統一的なデザインで表示されるため、情報の重要度を判断しづらく無視されるという問題がある^[9]。また、頻繁に通知が表示されることによる情報過多で、作業の生産性を低下させる場合もある^[10]。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

作業中でも注意をひくために、オブジェクトを振動させて情報を伝える方法が提案されている。Haller らは、作業者の姿勢の良し悪しを、椅子の振動によって強制的に気づかせるシステムを提案している^[11]。このシステムにおいて作業者は自身の姿勢の悪さを必ず認知できるが、振動の煩わしさから作業に集中できず、長期利用に向かない可能性がある。これらのことから作業を阻害しない、かつ強制力を抑えた情報の伝え方が、作業の生産性を維持するうえで重要であると考えられる。

穏やかにさりげなく情報を伝える方法としてアンビエントディスプレイによる情報伝達がある。アンビエントディスプレイとは、意味のある情報を環境に溶け込むように伝える手法で、光や音、匂い、形状変化といった様々なモダリティを用いて情報を伝える、PC やスマホなどのディスプレイから独立したタンジブルなインタフェースである^[12]。これにより、作業者は作業に集中しながらも、環境から情報を把握することが可能である。このアンビエントディスプレイを用いて、作業者に情報を伝え、行動を変容する取り組みが行われている。Brombacher らは、座りっぱなしな時間を減らすために、コンピュータの活動から作業者が集中できているかを LED 光の色変化を用いて可視化する Apphia を提案し、就業時間中における身体活動量を内省させることができる可能性を示している^[13]。Fortmann らは、作業者の座位時間をデスクライトの色によって示す MoveLamp を提案し、短期使用における身体活動量が増加することを確認している^[14]。また、Krenzer らは、作業中の休憩を促すために植物型アンビエントディスプレイを用いて外観変化、音、光、揺れ動作の 4 つのモダリティで比較した結果、光が最も動機づけや信頼性の評価が高かったと報告している^[15]。このように、様々なモダリティの中でも視覚的なフィードバックをもたらし光は、色を用いて情報の意味をさりげなく伝えることが可能なモダリティである。本研究で提案するシステムでは、足先の血流停滞の指標である皮膚温を光の色にマッピングして表現することで作業者に伝えるよう設計する。

2.2 運動を促進するインタラクティブコンテンツ

作業中や休憩中において座りっぱなしで過ごす習慣から、休憩中に立って歩くように行動を変容し、それを継続するには、歩行への動機づけを高める必要がある。動機づけを高め、休憩中の歩行を習慣化するには、外部からの働きかけをきっかけに新たな習慣への興味や関心を生み、またそれに対して楽しさや喜びを感じさせるようにすることが効果的である^[16]。そこで歩行を楽しませる施策として、インタラクティブコンテンツを用いる事例がいくつかある。インタラクティブコンテンツとは、人の行動をセンシングして、それに対する応答の内容や見た目の変化でリアルタイムにフィードバックを提供するコンテンツで



図 2 利用シナリオ

ある。株式会社たきコーポレーションは、人が歩いた跡にインクの着色、波紋の広がりなどのエフェクトを表示するインタラクティブ作品「Interactive Floor」を制作している^[17]。また、Rogers らは、建物内で階段の近くを歩いていると、足元から階段の入り口までの床に埋め込んだ LED が点滅することで階段の利用を促す Follow-the-Lights を提案し、階段の利用率を向上している^[18]。これらは、フロアプロジェクションや床への LED の埋め込みにより、環境をディスプレイにして歩行を促進している。これらのように、歩くことが楽しいと思えるように、作業者の歩行そのものに対してインタラクティブなフィードバックを行うことで、運動への動機づけを行い、日常的な運動習慣を身につけられるようになることが期待される。一方で、天井へのプロジェクタの設置や床への LED の埋め込みは、設置のコストが高く、利用可能な場所が限られてしまう。

そこで本研究では、図 1 に示すように、足先の血流状態を光の色によって表現して作業者に知らせ、作業者の足元に対するインタラクティブな映像コンテンツの提示によって歩行を楽しませるアンビエントディスプレイを提案する。

3. 足先の皮膚温に基づき休憩・歩行促進するタンブラー型アンビエントディスプレイ

本研究では、足先の血流状態に基づき、強制力が少なく作業の邪魔にならないように休憩や休憩時の歩行を促進するシステムを提案する。本章では、提案するシステムが満たすべき要件と想定する提案システムの概要について述べる。

3.1 提案システムの要件

本システムでは次の 2 つの機能を実現する。

- (1) 座位の作業者の足先の皮膚温を基に血流状態をさりげなく可視化して、座位の中断を促すこと

(2) 座位中断後に、作業者の歩行に対するインタラクティブな映像を環境に溶け込むように足元に提示して、歩行を促すこと

(1) の機能の実現にあたって、作業中でも自身の足先の血流状態を把握できるような仕組みが必要である。作業に集中しながら作業者の足先の血流状態を取得するためには、着脱が容易で日常的な使用が可能な靴型デバイスで足先の皮膚温を計測することが求められる。また、作業しながらでも自身の血流状態を認識するには、正常時と皮膚温低下時で視覚的に区別できる必要がある。一方で、しつこい点滅や、一度に様々な色を組み合わせた点灯などは作業中に煩わしさを感じさせ作業の生産性を低下させる恐れがある。そのため、作業の邪魔にならないような可視化である必要がある。

(2) の機能の実現にあたって、座位中断後に自然と歩行を促すために、ユーザの足元にインタラクティブな映像を提示する。この映像の提示は、他の執務者に影響を与えず、作業環境に溶け込むようユーザの足元のみに行われるようにする必要がある。また、場所を問わずそこでも映像提示可能にするためウェアラブルプロジェクタを利用する。さらに、ユーザの利便性及び受容性を高めるため、離席時によく手に持つ日用品としての機能を兼ね備えていることが望ましい。

3.2 提案システムの概要

前述の機能を満たすため、本研究では、次の2つのデバイスを提案する。

(1) 非接触式皮膚温計測スリッパ

(2) タンブラー型アンビエントディスプレイ

非接触式皮膚温計測スリッパは赤外線を用いた皮膚温計測センサを搭載することで作業に集中しながらの皮膚温計測を可能にする。タンブラー型アンビエントディスプレイは、皮膚温可視化とフロアプロジェクションの2つのモジュールを含む。皮膚温可視化モジュールでは、非接触式皮膚温計測スリッパから受け取った皮膚温に基づきLEDの色を変化させることで作業者の皮膚温を可視化する。また、フロアプロジェクションモジュールでは、タンブラーの底面に搭載したレーザプロジェクタにより作業者の歩行を促すようなインタラクティブコンテンツを足元に提示する。

図2に本システムの利用シナリオを示す。提案システムは、長時間パソコンに向かって作業をするようなデスクワークを主な利用対象として想定している。図2(a)のように、机上に置かれた皮膚温可視化モジュールのLEDによって、作業中に足先の血流の状態を可視化することで休憩のきっかけとなり、歩行を促すことができる。アンビエントディスプレイの形状としてタンブラーを採用した理由は、作業中や休憩中のいずれのシーンにおいても自然に利



図3 提案システムの構成



図4 非接触式皮膚温計測スリッパの構成

用できる特性を持つためである。例えば、オフィス環境においては、図2(b)のように作業中には水分補給として使用し、休憩中には水を汲みに行ったり、図2(c)のようにタンブラーを手に同僚と談笑しながらコミュニケーションを図るといったシナリオが考えられる。さらに、作業者の歩行状態だけでなく、当事者の同意のもとで様々な健康状態も可視化することで、職場の同僚も作業者の状態を把握しやすくなる。その結果、作業者の体調の異変に迅速にサポートできるなど、職場環境の質の向上にも寄与することが期待される。

4. 実装

4.1 システム構成

図3に提案システムの構成を示す。提案システムは、非接触式皮膚温計測スリッパ、タンブラー型アンビエントディスプレイ（皮膚温可視化モジュールおよびフロアプロジェクションモジュール）、データ統合用サーバの3つのコンポーネントで構成される。提案システムの基本動作は次の通りである。まず、非接触式皮膚温計測スリッパに搭載されたセンサで足先の皮膚温および歩行における加速度を計測し、それらをデータ統合用サーバと皮膚温可視化モジュールに送信する。データ統合用サーバでは、歩数の算出を行い、それに基づいたインタラクティブコンテンツの描画を行う。タンブラー型アンビエントディスプレイのう

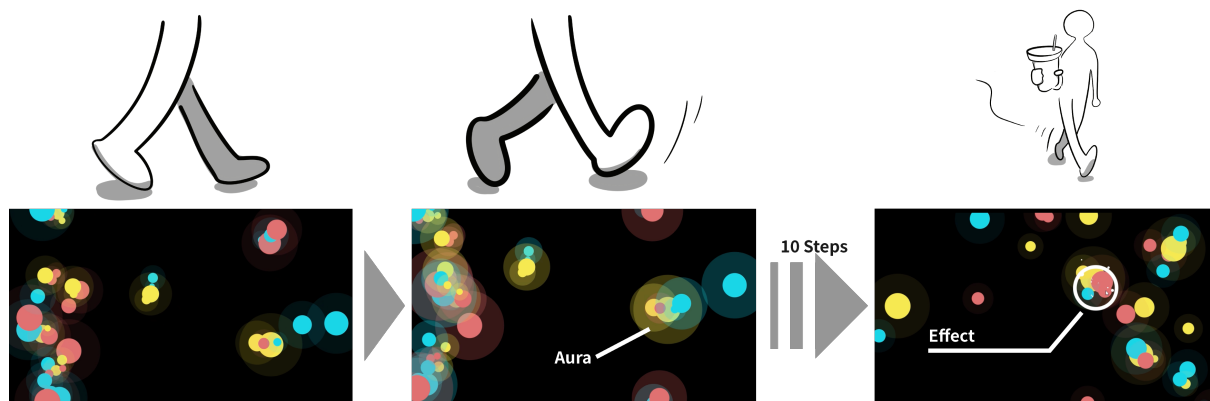


図 5 制作したインタラクティブコンテンツ

ち皮膚温可視化モジュールは、非接触式皮膚温計測スリッパから送信された皮膚温を、光の色を変化させることで可視化する。また、フロアプロジェクションモジュールは、データ統合用サーバによる描画データを受信し、フロアプロジェクションを行う。

4.2 非接触式皮膚温計測スリッパ

非接触式皮膚温計測スリッパの構成を図4に示す。本デバイスでは、足先の皮膚温、歩行時における加速度を同時に取得する。足先の皮膚温の取得には、M5Stack 用非接触温度センサユニットに搭載された MLX90614 赤外線センサ、歩行における加速度の取得には、M5Atom Matrix 内に搭載されている MPU6886 を用いる。この構成により、作業中でも気にならないデータ取得を行う。センサから取得した測定値は、データ統合用サーバと皮膚温可視化モジュールに OSC 通信で送信する。

4.3 データ統合用サーバ

データ統合用サーバでは、各デバイス間のデータ通信を媒介するだけでなく、非接触式皮膚温計測スリッパから受信した歩行における加速度を用いたインタラクティブコンテンツを描画する。描画されるインタラクティブコンテンツの様子を図5に示す。全体のコンテンツとして、Boids アルゴリズムを利用した円の群れを作成している。10 歩ごとに円が拡がるようなエフェクトや、歩いた時の加速度を利用して円の明るさや大きさが変わるインタラクションを付加している。描画には、プログラミングで映像を作り出すフレームワークである Processing を Python で利用できるように作られた Py5 というライブラリを用いる。描画フレームは、jpeg 形式に圧縮し、UDP 通信でフロアプロジェクションモジュールに送信する。

4.4 タンブラー型アンビエントディスプレイ

タンブラー型アンビエントディスプレイは、足先の皮膚

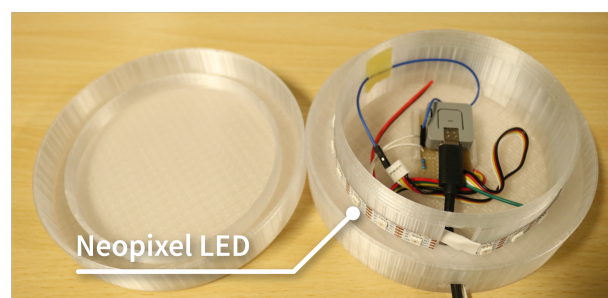


図 6 皮膚温可視化モジュールの構成

温を LED で可視化する皮膚温可視化モジュールと、インタラクティブコンテンツをフロアプロジェクションするフロアプロジェクションモジュールで構成されている。これらの筐体は 3D プリンタで制作した。将来的に、フロアプロジェクションモジュールを皮膚温可視化モジュールに置くことでフロアプロジェクションモジュールの充電が行われることを想定して制作した。

4.4.1 皮膚温可視化モジュール

非接触式皮膚温計測スリッパから送信された皮膚温を用いて LED の色を変化させる。皮膚温と色の対応を決定するために、20 代の男女（男性：8 名、女性：2 名）に対しヒアリングを行った。表 1 にヒアリングした質問項目を示す。

ヒアリングの結果、通常時から皮膚温低下時にかけて橙や黄→水→青というような暖色から寒色への遷移を挙げた人が 5 名と最も多かった。この他にも、信号のように危険

表 1 皮膚温と色の対応を決定するためのヒアリング調査

	質問項目	回答例
Q1	皮膚温が通常時の色	橙色
Q2	皮膚温が少し下がった時の色	水色
Q3	皮膚温が大きく下がった時の色	青色
Q4	それぞれの色を選んだ理由	(省略)
Q5	その他アイデアやコメント	(省略)

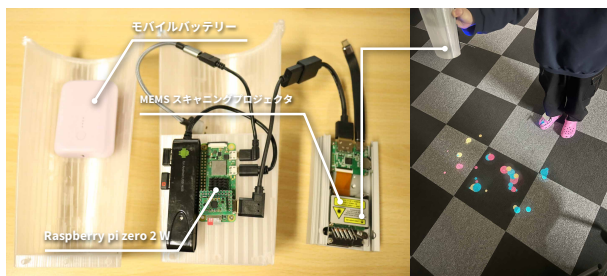


図 7 フロアプロジェクションモジュール

度を示す緑→黄→赤という遷移（2名）や、サーモグラフィをイメージして橙→青→紫という遷移を挙げた人（2名）もいた。実装では、足先の皮膚温に対して移動平均法を用いて平滑化したのち、測定し始めた時の皮膚温を基準として、皮膚温が下がれば下がるほど光の色が橙から青に向かって色が変わるように制御する。皮膚温可視化モジュールの構成を図6に示す。制御するマイコンにはM5Atom Lite、光の提示はNeoPixel LEDによって行う。

4.4.2 フロアプロジェクションモジュール

フロアプロジェクションを行うモジュールの構成を図7に示す。データ統合用サーバから送信された描画フレームをUDP通信で受信するため、Raspberry pi zero 2 Wを搭載している。プロジェクタにはMEMS スキャニングプロジェクタ（Ultimems 社製 HD309D1-C1）を用いて床にインタラクティブコンテンツを投影する。

5. おわりに

本研究では、作業者の足先の血流状態に基づき作業中の運動促進を行うタンブラー型アンビエントディスプレイを提案した。今後は、提案システムの有効性やユーザビリティについて検証する方針である。

参考文献

- [1] リクルートワークス研究所. なぜノンデスクワーカー - 日本経済の中核を担う職種 -. <https://www.works-i.com/research/project/deskless/why/detail002.html>, 2021. (最終閲覧: 2024.12.23).
- [2] Aino Kitayama, Mohammad Javad Koohsari, Kaori Ishii, Ai Shibata, and Koichiro Oka. Sedentary time in a nationally representative sample of adults in japan: Prevalence and sociodemographic correlates. *Preventive medicine reports*, 23:101439, 2021.
- [3] Saurabh S Thosar, Sylvanna L Bielko, Kieren J Mather, Jeanne D Johnston, and Janet P Wallace. Effect of prolonged sitting and breaks in sitting time on endothelial function. 2015.
- [4] Aaron W Aday and Kunihiro Matsushita. Epidemiology of peripheral artery disease and polyvascular disease. *Circulation research*, 128(12):1818–1832, 2021.
- [5] Meredith C Peddie, Chris Kessell, Tom Bergen, Travis D Gibbons, Holly A Campbell, James D Cotter, Nancy J Rehrer, and Kate N Thomas. The effects of prolonged sitting, prolonged standing, and activity breaks on vascular function, and postprandial glucose and insulin responses:

- a randomised crossover trial. *Plos one*, 16(1):e0244841, 2021.
- [6] Seung Namkoong, JeMyung Shim, SungJoong Kim, and JungMyo Shim. Effects of different sitting positions on skin temperature of the lower extremity. *Journal of physical therapy science*, 27(8):2637–2640, 2015.
- [7] Siren. The next step in foot care. <https://www.siren.care/>. (最終閲覧: 2024.12.23).
- [8] Actics. Digitizing the future of foot therapy. <https://www.acticsmedical.com/>. (最終閲覧: 2024.12.23).
- [9] Jörg Müller, Dennis Wilmsmann, Juliane Exeler, Markus Buzcek, Albrecht Schmidt, Tim Jay, and Antonio Krüger. Display blindness: The effect of expectations on attention towards digital signage. In *Pervasive Computing: 7th International Conference, Pervasive 2009, Nara, Japan, May 11-14, 2009. Proceedings 7*, pages 1–8. Springer, 2009.
- [10] D. Garlan, D.P. Siewiorek, A. Smailagic, and P. Steenkiste. Project aura: toward distraction-free pervasive computing. *IEEE Pervasive Computing*, 1(2):22–31, 2002.
- [11] Michael Haller, Christoph Richter, Peter Brandl, Sabine Gross, Gerold Schossleitner, Andreas Schrempf, Hideaki Nii, Maki Sugimoto, and Masahiko Inami. Finding the right way for interrupting people improving their sitting posture. In *Human-Computer Interaction-INTERACT 2011: 13th IFIP TC 13 International Conference, Lisbon, Portugal, September 5-9, 2011, Proceedings, Part II 13*, pages 1–17. Springer, 2011.
- [12] Zachary Pousman and John Stasko. A taxonomy of ambient information systems: four patterns of design. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, pages 67–74, 2006.
- [13] Hans Brombacher, Xipei Ren, Steven Vos, and Carine Lallemand. Visualizing computer-based activity on ambient displays to reduce sedentary behavior at work. In *Proceedings of the 32nd Australian Conference on Human-Computer Interaction*, pages 760–764, 2020.
- [14] Jutta Fortmann, Tim Claudius Stratmann, Susanne Boll, Benjamin Poppinga, and Wilko Heuten. Make me move at work! an ambient light display to increase physical activity. In *2013 7th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare and Workshops*, pages 274–277. IEEE, 2013.
- [15] Theresa Jung-Krenzer, Jeanine Kirchner-Krath, Celina Retz, and Maximilian Altmeyer. Leaf your chair behind—calm persuasion for frequent sitting breaks among office-workers. In *Proceedings of Mensch und Computer 2024*, pages 111–128. 2024.
- [16] Richard M Ryan. *Self-determination theory: Basic psychological needs in motivation, development, and well-being*. Guilford Press, 2017.
- [17] 株式会社たきコーポレーション. Interactive floor. https://www.taki.co.jp/project/taki_lab/interactive-floor/. (最終閲覧: 2024.12.23).
- [18] Yvonne Rogers, William R Hazlewood, Paul Marshall, Nick Dalton, and Susanna Hertrich. Ambient influence: Can twinkly lights lure and abstract representations trigger behavioral change? In *Proceedings of the 12th ACM international conference on Ubiquitous computing*, pages 261–270, 2010.