



インソール型センサを用いた歩行姿勢フィードバックシステム

Realtime Feedback System for Load-weighted Walking Posture with Insole Sensors

伊藤詩乃¹⁾, Yichen Peng¹⁾ Chen-Chieh Liao¹⁾ Erwin Wu¹⁾, 小池英樹¹⁾

Shino ITO, Yichen Peng, Chen-Chieh Liao, Erwin Wu, Hideki KOIKE

1) 東京科学大学 情報理工学院 (〒 152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, ito.s.feb9@m.isct.ac.jp, peng.y.ag, liao.c.aa, wu.e.aa@m.titech.ac.jp, koike@c.titech.ac.jp)

概要: 危険な姿勢の検知は、正しい姿勢を保持し健康への一助となる。カメラや IMU を用いて姿勢を推定する手法と比較して、圧力センサは足の接地や重心の情報をもち、新たな手がかりとなると考えられる。本研究では、インソール型センサを用いて荷物を持った状態での歩行中の姿勢推定を行い、リアルタイムでの姿勢のフィードバックシステムを開発した。提案システムで用いるモデルは時系列のセンサデータを入力とし、姿勢の分類や背中の角度を出力する。それをそれぞれスマートフォンの振動と音声でのピープ音でフィードバックすることで、より直感的に姿勢を知ることができ、姿勢改善を促すことが示唆された。

キーワード: 作業支援・評価, モデル・計算, センサ, スポーツ・健康

1. はじめに

正しい姿勢の維持は健康や生活の質向上に不可欠である。不適切な姿勢は腰痛や関節の摩耗を引き起こし、生活のあらゆる場面での生産性を低下させる。近年、姿勢推定技術が発展し [1, 2], 姿勢をデータに基づいて定量的に評価することが可能となりつつある。そこで、これらのシステムは危険な姿勢を検知する手段となることが期待できる。

しかし、カメラベースの手法は環境の制限が多く高コストであり [1, 2], ウェアラブルセンサは複数のデバイスを装着する必要がある [3, 4] など、活用に障壁がある。それに対して、インソール型のセンサは靴の中に入れるだけで簡単に準備でき、屋内外を問わず動き回ることができる。そのため、インソール型センサはこれらのデバイスの短所を補い、モニタリングのデバイスとして代替案となり得る。現在、インソールセンサを用いた姿勢推定システムの研究がなされている [5]。しかし、この先行研究のデータセットは重量物を持った姿勢を含んでおらず、圧力センサへの影響が不明である。また、腕の精度が課題として挙げられており、本研究においても重要課題であると考えられる。

本研究では IMU センサと圧力センサが入っているインソール型センサを用いて荷物を持った際の危険な姿勢の検知と背中の角度の予測、リアルタイムでのフィードバックの設計を行う。予測モデルの学習のために、12 人の被験者を集めデータセット構築する。また、音声と振動のフィードバックシステムをユーザ実験を通して可用性を評価する。ユーザ実験の結果より、複数モダリティのフィードバックよりも 1 つのモダリティによるフィードバックの方が好まれ、音声フィードバックと振動フィードバックを比べた際に振動の方がより好まれた。しかし、姿勢情報の背中の角度に基づ

く定量評価の結果は音声フィードバックの方が優れていた。

2. システム概要

本研究で提案するシステム全体の構成図を図 1 にて示す。ユーザはインソール型センサが入った運動靴を履き、センサのデータはコンピュータに送られる。プログラムを実行し、センサデータから背中の角度と姿勢の分類を予測し、結果別で異なる音声をユーザに Bluetooth イヤホンを通して聞かせる。また、予測結果をスマートフォンに送り、スマートフォンアプリを通して振動させる。

学習に用いたデータセットは 12 人の足圧と IMU センサ、姿勢データで構成する。被験者はランニングマシンの上で荷物を持った状態で 8 種類の姿勢で歩く (図 2)。姿勢 (a) は箱を横に持った正しい姿勢、姿勢 (b) は箱を縦に持った正しい姿勢、姿勢 (c) は少し低い位置で持った姿勢、姿勢 (d) は箱を少し高い位置で持った姿勢、姿勢 (e) は背中が曲がった姿勢、姿勢 (f) は背中を捻った姿勢、姿勢 (g) は箱を右肩に乗せた姿勢、姿勢 (h) は箱を右脇に抱えた姿勢である。この中でも姿勢 (a)-(d) は正しい姿勢から箱の位置のみを変えた姿勢、姿勢 (e)(f) は背中が曲がった姿勢、姿勢 (g)(h) は荷物を左右均等に持っていない姿勢である。被験者は moticon¹ と qualisys² を用いて 3 次元の姿勢を測定する。

2.1 モデルの設計

ネットワークは Transformer を基にし、1 秒分の圧力センサと IMU センサのデータを入力とし、8 種類の姿勢カテゴリと背中の曲がった角度を推定する。8 種類の姿勢カテゴリ

¹<https://moticon.com/opengo/sensor-insoles>

²<https://www.qualisys.com/software/qualisys-track-manager/>

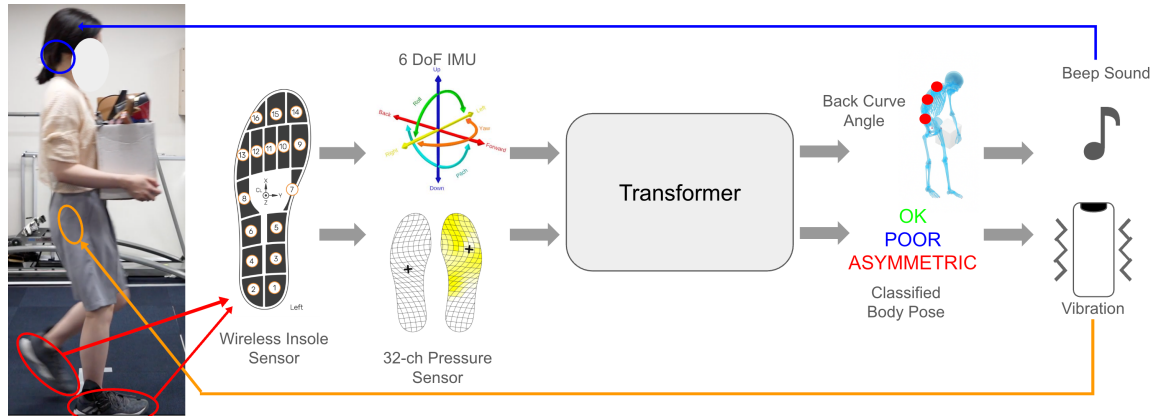


図 1: システム構成図.

りは図 2 の上部に示す.

本研究で使用するモデルは圧力センサと IMU センサの 2 種の特徴量を Cross-Attention を用いて融合する. Cross-Attention の入力は以下のように定義する.

$$f = \text{Attention}(W_q z_p, W_k z_a, W_v z_a) \quad (1)$$

ここで, f は特徴量を表し, W_q, W_k, W_v は学習可能なパラメータであり, z_p と z_a はそれぞれ圧力センサの特徴量と IMU センサの特徴量である.

2.2 フィードバック設計

予測した姿勢カテゴリと背中中の角度に対して, それぞれ振動, 音声フィードバックを実装する. 図 2 で示すように姿勢が悪いとスマートフォンが短く振動し, 良い姿勢の際は振動しない. また, 左右に歪みが出るような姿勢の場合は長く振動する.

音声フィードバックは, 背中がより曲がっている時により高い音での警告音を流す. 図 3 は背中中の角度と音程の変化を示す. 背中が曲がっていないときは C4 の音程のピープ音が流れ, 背中が曲がるにつれ音声の周波数が上がり, 90° に曲がっている際は C5 のピープ音が流れる.

3. ユーザ実験

3.1 実験手順

3 人の被験者を集め, 音声フィードバック, 振動フィードバック, 両方同時の 3 種類のフィードバックを比べるユーザ実験を行なった. 3 人の被験者はデータセットに含まれており, モデルの学習データは被験者のデータを含む.

実験過程は図 4 に示した. 最初に実験の流れを説明した後, 準備や動作確認を行なった. 動作確認では, 被験者が快適に聞こえる音量の調整やスマートフォンを持つ場所と振動の強さの確認を行なった. 被験者は 2 分間ランニングマシンの上でフィードバックを受ける. 1 度のフィードバックが終わったらそれに対するアンケートに回答し, 次のフィードバックの準備を始める, これを全てのフィードバックに対して行い, 最後にインタビューを行なった.

被験者がフィードバックを受けている間は qualisys を用いて 3 次元姿勢を記録する. また, アンケートは SUS[6],

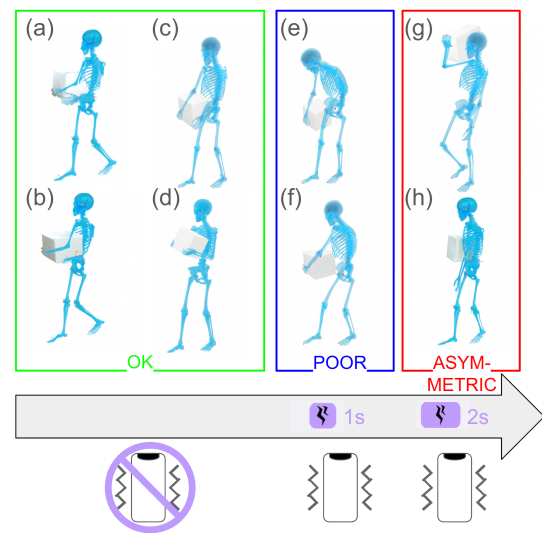


図 2: フィードバックする姿勢分類と振動パターン.

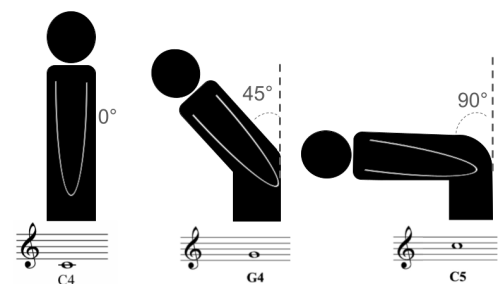


図 3: 背中中の角度とフィードバック音声の高さ.

NASA-TLX[7] の質問とフィードバックの順位を決める質問を採用した.

3.2 結果

図 5 にフィードバックを受けている際の背中中の角度を箱ひげ図で示す. ウィルコクソンの順位と検定を行い, 音声フィードバック中の背中中の角度は両方同時のフィードバック中の背中中の角度よりも有意に小さく ($W = 0, p = 6.10 \times 10^{-5}, n = 15$), 振動フィードバック中の背中中の角度も両方



図 4: ユーザ実験の流れ.

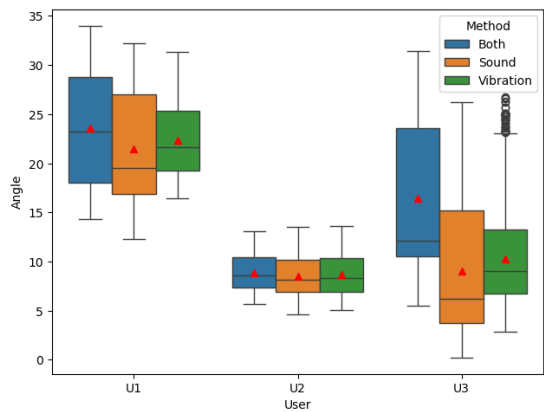


図 5: 各被験者の背中中の角度.

同時のフィードバック中の背中中の角度よりも有意に小さかった ($W = 1, p = 1.22 \times 10^{-4}, n = 15$). 音声フィードバック中の背中中の角度と振動フィードバック中の背中中の角度は有意な差が見られなかった ($W = 42, p = 0.330, n = 15$). また、全ての被験者において、フィードバック中の背中中の角度の平均は音声フィードバックの際が最も小さかった。

表 1 はアンケート内で被験者が回答した各フィードバックのランキングである。被験者は全員振動フィードバックを好み、項目に分けた場合は振動と音声の回答が意見が分かれた。両方同時のフィードバックは全ての項目において選ばれなかった。

ユーザからのコメントでは、同時のフィードバックに関して U3 は、「音声と振動の同時フィードバックは複雑に感じた」とコメントした。複数モダリティの併用し、別の視点におけるフィードバックを同時に行ったことが認知的負荷を増加させた可能性が示唆された。

一方、音声フィードバックの連続的なビープ音について、U1 は「連続的なビープ音は、姿勢を意識するのに役立った」と述べたが、U2 は「流れ続けるビープ音は適切な背中中の角度を維持する際に気が散り、危険な時のみに音声を流してほしい」と指摘した。

4. 考察

ユーザ実験の定量的結果に基づいて、音声フィードバック方法および振動フィードバック方法と両方同時の方法との間で背中中の屈曲角度に有意差が認められた。ただし、音声フィードバックと振動フィードバックの間には統計的に有意な差は見られなかった。この結果は、振動フィードバックが指定されたポーズと背中中の屈曲角度との間に強い相関

表 1: フィードバックのランキング

	U1	U2	U3
全体評価	振動	振動	振動
操作の簡易さ	振動	音声	音声
わかりやすさ	振動	振動	音声
自信を持って使えた	音声	振動	振動

を持つためであると考ええる。具体的には、振動フィードバックが即時的かつ身体的な刺激として機能し、参加者における姿勢の微調整を促進した点がこの結果に寄与していると考えられる。しかし、音声フィードバックはその情報量や指示内容の明確さが姿勢改善に寄与したものの、振動フィードバックほど直接的な効果を持たなかったと考えられる。

アンケートより、複数のモダリティから同時にフィードバックをするのは直感的でなく、わかりにくいということがわかった。一方で、各フィードバックにはいくつかの制約があることが明らかになった。特に、単一のスマートフォンから提供される振動フィードバックの種類が限られているため、伝達できる情報量が制限される問題が存在する。振動をカスタマイズすることは可能であるが、振動のパターンと対応する姿勢を記憶しておかなければならない。この課題に対しては、危険な姿勢に関与する特定の身体部位に振動子を配置し、直すべき部分の振動子を振動させることで、フィードバックシステムの情報伝達能力と効果を高める可能性がある。

音声フィードバックについては、汎用的なビープ音をユーザの言語に基づいた明確な指示に置き換えることで、より具体的で行動可能なガイダンスを提供できると考えられる。このような改良により、ユーザがフィードバックを理解しやすくなり、システムの効果をさらに向上させることが期待される。

全体として、今回開発したフィードバックシステムは、荷物取扱作業における背中中の角度の定量的評価において一定の改善を示した。今後の研究では、システムの使いやすさを向上させるためのインターフェースデザインや、フィードバックの種類を増やしてユーザ体験を高めるアプローチに焦点を当てる予定である。また、実験環境だけでなく、実際の現場における使用を想定した評価を行い、異なる勾配や異なる地面環境での使用における効果の一般化を確認することが重要であると考えられる。

5. まとめ

本研究は荷物を持った状態での歩行中における危険な姿勢を改善するためのフィードバックシステムの検証を行なった。ユーザ実験により、音声および振動フィードバックが背中中の角度の改善に有効であることが定量的に示された。特に、音声フィードバックは背中中の角度を直接指示することで、姿勢の改善への効果がみられた。振動フィードバックは即時的

な身体刺激として機能し、ユーザから音声フィードバックと両方のフィードバックよりも高い評価を受けた。

残された課題としては、背中以外の危険な姿勢の要素をフィードバックに含めることと、それらをより直感的に伝えることである。単一モダリティでは情報量の限界があるため、言語で具体的な姿勢改善の指示を含んだフィードバックの可能性が示唆される。

本研究は作業中の危険検知だけでなく、リハビリテーションなどのヘルスケア領域、スポーツ分野に応用することが期待される。また、VR 環境におけるアバタ制御にも応用できると考えられる。

謝辞 本研究は JST ムーンショット型研究開発事業 (JP-MJMS2012) および ASPIRE (JPMJAP2404) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Chen, Y., Wang, Z., Peng, Y., Zhang, Z., Yu, G. and Sun, J.: Cascaded Pyramid Network for Multi-Person Pose Estimation, 2018.
- [2] Fang, H.-S., Xie, S., Tai, Y.-W. and Lu, C.: RMPE: Regional Multi-person Pose Estimation, 2018.
- [3] Mollyn, V., Arakawa, R., Goel, M., Harrison, C. and Ahuja, K.: IMUPoser: Full-Body Pose Estimation using IMUs in Phones, Watches, and Earbuds, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '23, New York, NY, USA, , 2023.
- [4] Xu, V., Gao, C., Hoffmann, H. and Ahuja, K.: MobilePoser: Real-Time Full-Body Pose Estimation and 3D Human Translation from IMUs in Mobile Consumer Devices, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, , 2024.
- [5] Wu, E., Khirodkar, R., Koike, H. and Kitani, K.: SolePoser: Full Body Pose Estimation using a Single Pair of Insole Sensor, *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '24, New York, NY, USA, , 2024.
- [6] Brooke, J.: SUS: A quick and dirty usability scale, *Usability Eval. Ind.*, Vol. 189, 1995.
- [7] Hart, S. G. and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, *Human Mental Workload* (Hancock, P. A. and Meshkati, N., eds.), Advances in Psychology, Vol. 52, North-Holland, pp. 139–183, 1988.