

ヒューマンファクターに基づいたウェアラブル冷暖房デバイスの開発

高橋一聡¹ 近藤匠海¹ シクリキイエイズ キジト¹ 横窪安奈¹
ロペズ ギョーム¹

概要: 人が快適かつ高効率に活動する上で、快適な温度を保ち続けることは重要であると同時に、常に温度に気を配るということは困難でもある。また、温度の不快感に気が付いたとしても、オフィス等の共同空間においては自分の意志のみで温度調節をすることは難しい。本研究では、生体情報を用いてリアルタイムかつ自動的に温冷感の推定を行うシステムと、推定された温冷感に基づいてユーザーに適切な温度を提示する個別冷暖房デバイスの試作を行った。本実験で試作したデバイスの構成では十分な加温冷却性能が得られないことが動作試験で判明し、加温動作のみの評価実験も試験と同様に、十分な加温動作が実現できなかったことが確認された。また、本システムでは温冷感の変化によるデバイス制御の切替が非常に重要なため、使用者の温冷感の変化時における推定精度の向上が求められることが明らかになった。

Development of Human Factor Based Wearable Thermo-Conditioning Device

KAZUTO TAKAHASHI¹ TAKUMI KONDO¹ KIZITO NKURIKIYEEYUZU¹
ANNA YOKOKUBO¹ GUILLAUME LOPEZ¹

1. はじめに

近年、省エネルギー政策の推進により、電力使用制限が実施されている。その結果、これまで際限無く電力を消費し実現されていた快適環境が失われ、健康危機、労働生産性の低下などの問題が起こっている。また2005年より環境省主導で行われている冷暖房の節約キャンペーンである、「クールビズ・ウォームビズ」の影響で、暑さ寒さの不満がより顕著になってきている。例えばクールビズ提言前、首都圏内の1万6千棟のオフィスビルの平均設定室温は25℃であったが、ほとんどの企業がガイドラインを守ってきた。2017年の夏季に三菱電機ビルテクノサービス株式会社がオフィスで働く男女1000名を対象に実施した調査では、クールビズで定められている室温28℃のオフィスでは51.8%の人が暑いと感じていた [1]。実際には69.7%の職場で28℃よりも室温を低く設定しており、それにより76.3%の人が冷房で体調不良になったことがあると回答した。温熱ストレスに関する多くの研究は暑熱ストレスに関連している。極端な気温や理想的でない天気は長期間さらされると、深部体温が変化し、恒常性のコントロールや体温を維持する能力に影響を与える可能性がある。身体が水やエネルギーのような資源を再配分することによって健康な中核温度を維持することがより困難になると、脳はこれらの同じ資源を奪われ、考える能力が衰退する [2]。

エアコンやストーブなどの、空気を媒介として体温調節

を行う現在主流の冷暖房システムでは、個人間の体感温度の差を埋めることは難しい。また現状の冷暖房システムは空気を媒介として身体を加温冷却するため、床および壁、窓への熱エネルギーの流出によるロスが大きい。身体を直接加温冷却することができれば、現状のシステムよりも省エネルギーな体温調整が実現できる。また、冷暖房システムが自動的に最適な加温冷却動作を行うことができれば、自分の意志で冷暖房動作が困難な小児や身体障害者に最適な温冷環境を提示することが可能になる。

これらを踏まえ、本研究では、生体情報による温冷感推定に基づいて身体を直接加温冷却するデバイスを制御することを目的とした、個別冷暖房デバイスおよびアプリケーションソフトウェアの試作を行った。

2. 関連研究

いくつかの研究では、局所冷却および加温の両方が生理指標の変動に影響を与えていることが報告されている [3][4]。頭・頸部の冷却は、いくつかの医療用途 [5] および、運動業界 [6] [7] においてすでに有効であることが実証されている。また、頸部冷却は脳の温度および脳血流の変化を引き起こすことが示されている [8]。加温冷却する部位として、頸部において加温時も冷却時も温熱的快適感を得やすいことが報告されている [9]。

実際に個別冷暖房デバイスの関連研究として、板生らの頸部の加温冷却が可能なウェアラブル局所冷暖房機の開発がある [10]。電流を流すことで片面から反対面に熱を移動

¹ 青山学院大学
Aoyama Gakuin University

させる性質を持つペルチェ素子を加温冷却部に用いており、加温動作時は 37~40.5℃、冷却動作時は 20~28℃の範囲で、計 14 段階の温度切替が可能である。冷却時には冷却面の反対面が発熱するため、水冷式の冷却法によって高い冷却性能を有するが、制御は手動であるほか、加温冷却動作の切替のためにハードウェアの組み換えが必要である。

製品化されているものでは、腕を加温冷却する Embr Labs 製の Embr Wave がある[11]。皮膚は急激な温度変化の方が変化を強く感じやすいため、温度を上下させて波状の温度変化を提示する。製品化前のプロトタイプは“Wristify”として発表されており、周辺温度を元に自動的に加温冷却する機能があったが、Embr wave には実装されず、16 段階の手動制御のみとなった。加温冷却は本体表面のスイッチで容易に切替可能である。

ヒトの不快感という曖昧な指標を、生体情報を用いて定量化する研究が行われてきており、不快感という指標は個人差が反映されやすいが、個人から計測している生体情報を用いることで個人への対応が可能であると考えられている。人体は温冷感などによって発汗や筋肉の弛緩などの反応を示すが、これらの反応は自律神経が担っており、自律神経と心拍変動 (HRV) は密接に関係しており、心拍変動から温冷感の推定を行う研究が Nkurikiyeyezu らにより行われた[12]。心拍変動の指標である 6 つの指標 (平均心拍数、平均平方二乗標準偏差、標準偏差、pNN25、VLF、サンプルエントロピー) を用いた SVM 分類器による推定アルゴリズムを用いることで、最大 93.7%の精度で温冷感の推定が可能であることが確認されている。

3. 個別適合ウェアラブル冷暖房デバイス

本研究では、個別冷暖房デバイス (以下、デバイス) と、推定した温冷感に応じてデバイスを制御するアプリケーションソフトウェア (以下、アプリ) の試作を行う。システム全体の動作は、デバイスで測定した心拍間隔 (RRI) をアプリに送信、アプリケーションに蓄積された RRI から HRV (Heart Rate Variability) を計測し温冷感を推定、推定された温冷感に基づいて動作指示をデバイスに返す、デバイスで加温冷却動作を行う、といった処理を繰り返す。

3.1 ハードウェア構成

デバイスの動作には、比較的容易に開発可能なマイコン開発ボードである Arduino を使用し、今回は特に小型であり、ATmega328P プロセッサを搭載した Arduino Nano を採用した。加温冷却にはペルチェ素子を使用し、冷却のためにヒートシンクとファンを用いる。ペルチェ素子を温冷の両方で駆動するためには電流を逆向きに流す必要があるが、このためにモータの回転を制御するための集積回路 (IC) であるモータドライバを用いる。本研究では DC モータドライバの使用を検討し、比較的大きな 1~2A 程度の出力電

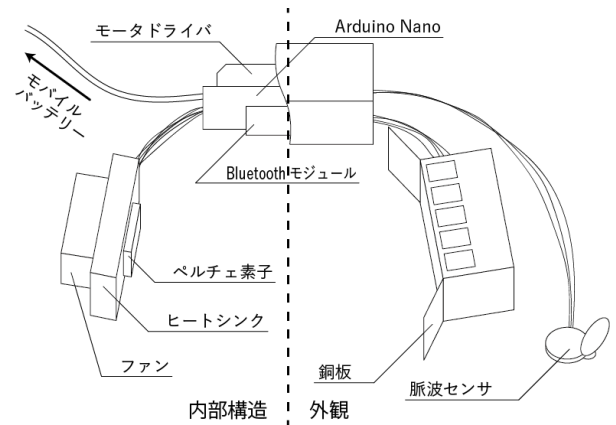


図 1 試作したデバイスの構成

流にも耐えられるもの、また、モバイルバッテリーの最大出力電圧である 5V 以下で動作可能なもの、を考慮した結果、株式会社東芝セミコンダクター製の「TA7291P」を採用した。ペルチェ素子の温度制御のために NTC サーミスタを用いて温度を測定する。実装の際にペルチェ素子と加温面の間に挟み込むことが出来るよう、非常に小型なものとして、株式会社村田製作所の NTC サーミスタ「NXFT15XH103FA」を採用した。温冷感推定のための RRI は脈波センサを用いて温度を測定する。本研究では、脈拍変動を用いたデバイスの自動制御機能を検討しているため、PulseSensor.com 製の脈波センサを採用した。温冷感推定のための RRI は脈波センサを用いて耳朶から取得する。後述の Android アプリとの通信には Bluetooth シリアル通信を用いる。Arduino の Bluetooth 送受信には HC-06 という Bluetooth シリアル通信モジュールを採用した。電源は最大 5V、2A 出力のモバイルバッテリーから USB 経由で供給することにより隔離された電源環境で動作可能になり、ウェアラブル化を実現した。試作したデバイスの構成を図 1 に示す。なお、デバイスの加温冷却部は左右対称である。

3.2 システム構成

3.2.1 デバイス側のシステム

デバイス側のシステムでは、脈波を計測して Android アプリケーションに送信する、Android アプリケーションからの指示によってペルチェ素子を制御する、という大きく分けて 2 つの処理を行った。後述する温冷感推定アルゴリズムでは RRI を用いるため、RRI を取得する必要がある。Arduino のアナログ入力で読み取る脈波信号から脈波のピーク値を検出し、次のピーク検出までの時間をミリ秒で算出した値が RRI になる。Android アプリには RRI と参考値としてモニタするために BPM とサーミスタの温度の計 3 つのデータを Bluetooth 経由で送信する。

Bluetooth 経由で Android アプリから設定温度の数値を受け取った際にペルチェ素子をその温度まで加温冷却制御するようにした。ペルチェ素子の温度制御には PID 制御を用い、入力をサーミスタの温度、出力をモータドライバの制

御電源端子へのアナログ出力の大きさとした。フィードバックをサーミスタの温度と設定温度の差の絶対値に設定し、サーミスタの温度と設定温度の差の正負によって、モータドライバの2つの入力端子へのデジタル出力の組み合わせを変更するようにした。これにより、サーミスタの温度が設定温度よりも低ければ加温動作、高ければ冷却動作をし、温度差の大きさによって出力の強弱を変更するといった、PID制御の動作を加温冷却の両方に対応させることができた。デバイスの動作フローチャートを図2に示す。

3.2.2 スマートフォン側のシステム

スマートフォン側のアプリでは、ArduinoからRRIを受信して温冷感を推定し、推定した温冷感を元にデバイスの設定温度を算出してArduinoに送信する、という処理を行った。温冷感の推定にはNkurikiyeyezuらの構築した推定アルゴリズムを用いた。このアルゴリズムにより、最大93.7%の精度でCold, Neutral, Hotのいずれかの温冷感の推定が可能である。最新の300個のRRIからHRVを取得することで温冷感が推定され、新たにRRIを取得するたびに推定結果は更新される。推定結果がColdなら加温、Neutralなら停止、Hotなら冷却の動作指示をデバイスに送信する(自動制御)。また、推定結果による自動の動作指示以外にも、手動操作による動作指示をデバイスに送信することも可能である(手動制御)。試作したスマートフォンアプリのフローチャートを図3に示す。

4. 試作デバイスの評価実験

4.1 デバイスの動作試験

4.1.1 動作方法

個別適合ウェアラブル冷暖房デバイスの動作試験を行った。加温冷却の限界温度や持続時間を確認するために、加温冷却それぞれの動作の方向に最大供給電圧である5Vを印加し2分間電流を流し続けたときの温度変化を計測した。加温動作時に、ペルチェ素子が高温になることにより素子が破壊される可能性、低温やけどの危険があることから、ペルチェ素子の温度が40℃以上にはならないよう制限を設けた。計測は、デバイス装着時と非装着時のそれぞれにおいて実施し、寒、暖、快適な3環境において温冷感推定を試験した。

4.1.2 動作試験結果と考察

理想的な冷暖房機能を実現するための装着時の温度範囲は20~40℃であるが、本デバイスにおいては28~38℃であった。また、動作中にモータドライバが非常に高温に発熱していた。動作開始から約25秒後以降は動作とは反対の温度変化を示した。温度範囲の向上にはより高電圧・大電量でペルチェ素子を駆動する必要があること、素子の過剰な発熱は破損の原因や動作不良を引き起こす可能性があることから、電源及びモータドライバ等のデバイス構成の変

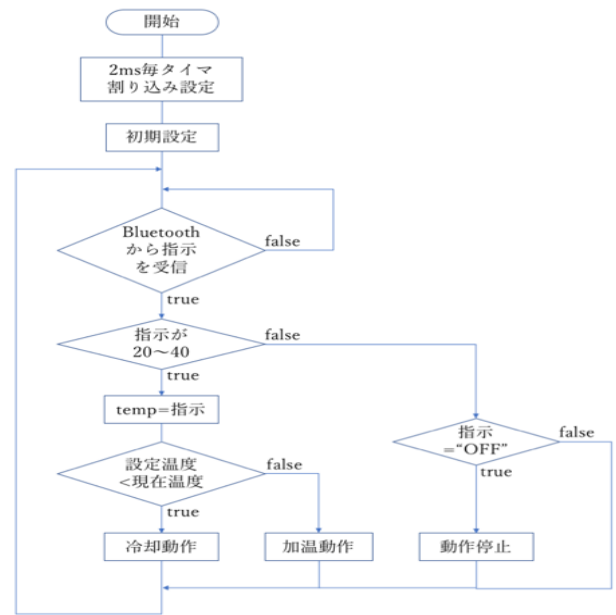


図2 デバイスの動作フローチャート

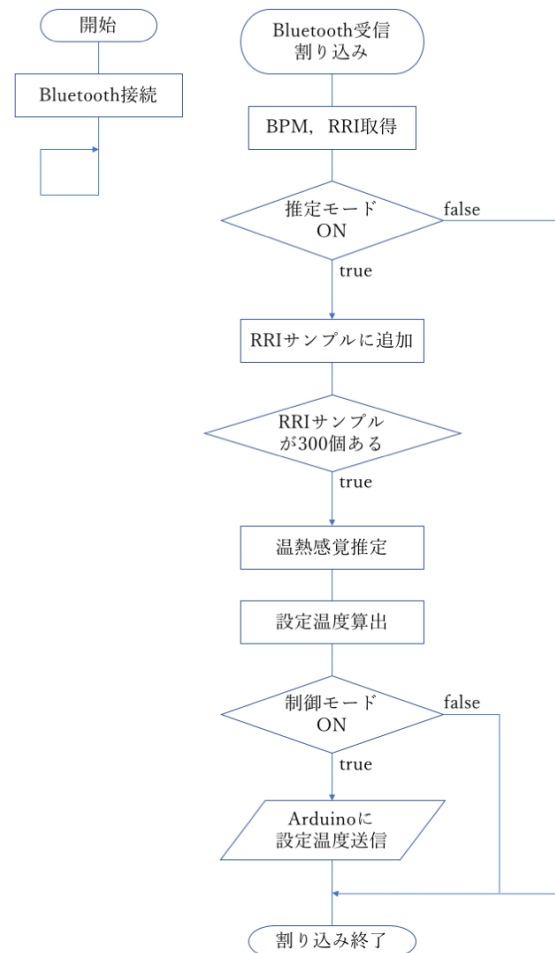


図3 Androidアプリケーションの動作フローチャート

更を検討する必要があると考えられる。

Cold, Neutral, Hotの温冷感を得られる環境において温冷感推定アルゴリズムの試験を行ったが、試験者に対してはそれぞれ主観的な温冷感と等しい推定結果が得られた。

この動作試験により、現状のデバイスでは、デバイス設計時の想定よりも加温冷却性能が低いこと、時間経過による性能低下や素子の発熱から長時間の動作が困難であること、脈拍による温冷感の推定は可能であることが判明した。この結果を踏まえ後述のデバイス評価実験では、1℃刻みの温度設定による動作を廃止し、加温動作、冷却動作、動作停止の3つに動作を限定することにより現状可能な範囲で動作を簡略化することを検討した。

4.2 デバイスの使用評価実験

4.2.1 実験方法

試作したデバイスおよびシステムの評価をするためにSD法と自由記述を用いた主観評価実験を行った。初めに被験者は座位安静状態でデバイスを装着。デバイスとAndroidアプリケーションを起動し、温冷感推定モードをONにして温冷感推定用のRRIの取得を開始した。RRIが300個蓄積され温冷感の推定が開始されたら以下に示す①②の動作を、被験者ごとにランダムな順番で行った。

- ① 【自動制御】推定結果に応じて自動的にデバイスの動作を制御する。1分間動作後、動作を停止し、アンケートに回答する。
- ② 【手動制御】被験者の主観的な温冷感に応じて、被験者自身にデバイスの動作を制御してもらう。1分間動作後、動作を停止し、アンケートに回答する。

4.2.2 実験結果と考察

SD法による評価実験の測定結果を図4に、自由記述回答を表1に示す。動作強度が弱い、不十分などの回答より、前述したデバイスの改良が必要であると言える。一方で、SD法の結果で「やや~かなり実用的な」を示したことから、頸部に装着する冷暖房デバイスは有用であると言える。

加えて、現在の主観的な温冷感を7人の被験者全員がColdであると回答したが、内5人で主観的な温冷感とは異なる温冷感推定が得られた。そのためにSD法において自動制御時に「やや冷たい」という否定的な結果となったと考えられる。自由記述において、自動制御では否定的な、手動制御では肯定的な回答のみが得られたことから、現状の自動制御システムは効果的ではないと言える。

5. まとめと今後の課題

5.1 まとめ

個人の温冷感に基づいて動作する頸部装着型冷暖房デバイスの開発を目標として、デバイスおよびデバイスを制御するシステムの試作を行った。試作したデバイスの動作を試験し、現在のデバイスの構成では十分な加温冷却性能が得られないことが判明した。この結果を踏まえたうえで、実現可能な範囲にデバイスの動作を限定し、デバイスの使用評価実験を行った。この実験において使用評価を確認できたのは加温動作のみであったが、試験結果と同様に十分な加温動作が実現できなかったことが確認された。また、本

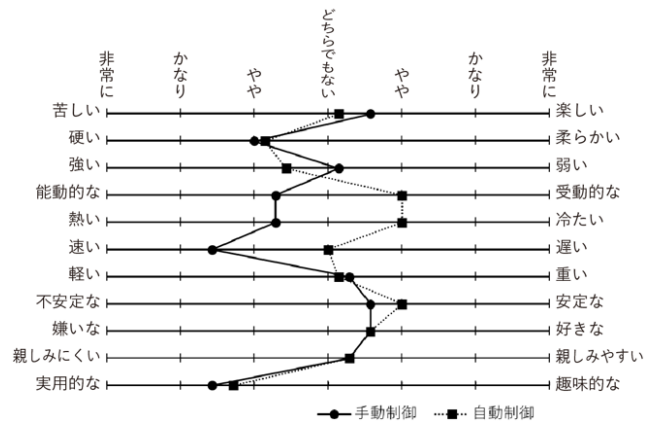


図4 被験者全員の Semantic Profile の平均

表1 自由記述回答結果

	自動制御	手動制御	全体
Pros	—	好き、心地よい、早い	軽い、苦にならない、使用したい
Cons	遅い、冷たい	—	変化に気づかなかった、弱い、不十分

システムでは温冷感の変化によるデバイス制御の切替が非常に重要なため、使用者の温冷感の変化時における推定精度の向上が求められることが明らかになった。

5.2 今後の課題

4.1.2で述べたように、デバイスの動作性能を向上させるため、電源をはじめとした素子類の構成を検討しなおす必要がある。また、正確な自動制御のために、より高精度な温冷感の推定方法、および現状のアルゴリズムの精度向上を検討する必要がある。

自動制御が実現しない段階であっても、十分な性能を備えた個別冷暖房デバイスが実現すれば、冷暖房システムとしての実用性は十分に見込めるため、今後は動作性能改善のために試作デバイスの構成の再検討を行いたい。

参考文献

- [1] 三菱電機ビルテクノサービス株式会社: ビジネスパーソン1,000名に聞く、夏のオフィス環境に関する意識と実態調査(2017).
- [2] Tomporowski, P.D., Beasman, K., Ganio, M.S., et al., Effects of dehydration and fluid ingestion on cognition, *International Journal of Sports*, 28:891-6 (2007).
- [3] Uebara K., Xu F.H., "Temperature-dependent Physio-psychological Changes by Footbath: Changes in electroencephalogram, cerebral circulation, R-R variability and comfort," *The Journal of the Japanese Society of Balneology, Climatology and Physical Medicine*, 67(2):119-29 (2004).
- [4] Kaczmarczyk, J., Melikov, A., Fanger, P. O., "Human response to personalized ventilation and mixing ventilation," *Indoor Air*, 14(s8):17-29 (2004).
- [5] Wang, H., Olivero, W., Lanzino, G., et al., "Rapid and selective cerebral hypothermia achieved using a cooling helmet," *J. Neurosurg.*, 100:272-7 (2004).
- [6] Lee J.K., Koh A.C., Koh S.X., et al., "Neck cooling and cognitive performance following exercise-induced hyperthermia," *Eur. J. Appl. Physiol.*, 114:375-84 (2014).

- [7] Jackson, K., Rubin, R., Van Hoeck, N., et al., “The effect of selective head-neck cooling on physiological and cognitive functions in healthy volunteers,” *Translational Neuroscience*, 6:131-8 (2015).
- [8] Kawahara, Y. and Katagiri, Y., “Selective brain cooling affects regional brain temperature and cognitive performances,” in *proc. of the 1st International Aizu Conference on Biomedical Informatics and Technology, Japan* (2013).
- [9] 中村 真由美, 依田 珠江, 内田 有希, ほか: 温度感覚, 温熱的快適感の部位差, *人間科学研究*, 22(1) (2009).
- [10] 板生 清, 保坂 寛, 橘高 薫, ほか: ウェアラブル電子制御式冷暖房機器の開発, *精密工学会誌* 82(10) (2016).
- [11] Embr Wave Wristband, available online at <https://embrlabs.com/how-it-works/>.
- [12] K. Nkurikiyeyezu et al., “Heart Rate Variability as a Predictive Biomarker of Thermal Comfort,” *J Ambient Intell Human Comput* (2017).