ドキドキをセンシングして可視化する LED ライティングデバイス

浦野 健太[1] 廣井 慧[2] 米澤 拓郎[1] 河口 信夫[1,3]

概要：「胸がドキドキする」という表現が古くは枕草子にも登場するように，心拍数と心理状態は結びつくものとみなされてきた．現実にも，プレゼンテーション前の緊張・ゲームでの手に汗握る戦闘では自らのドキドキを感じられる．一方，心拍数を計測できる活動量計やスマートウォッチが多数販売されている．計測した心拍数は，デバイス本体や，スマートフォンを通じて使用者のみが確認可能な情報で，提示や共有に課題がある．本稿では，心拍の脈波信号に合わせて LED を駆動するデバイスを提案する．提案するデバイスの利用で，人は脈波信号・心拍数をリアルタイムに視覚的に感じられ，また他者と共有できるようになる．本稿では特に，センシングを行うプロトタイプデバイスの製作と，ドキドキを実感できる発光パターンとアニメーションの検討を行う．

A LED Device for Visualizing Heart Beat

KENTA URANO[1] KEI HIROI[2] TAKURO YONEZAWA[1] NOBUO KAWAGUCHI[1,3]

1. 背景

緊張や興奮，期待感や不安感で胸がドキドキする感覚は，多くの人にとって身近なものである．古典文学においても，枕草子に「胸つぶる (不安で胸がキュッとする)」や「心ときめき (心がドキドキする)」といった表現が登場し，源氏物語にも「心ときめき」，更級日記にも「はしるはしる (胸をワクワクさせる)」という記述がある．現代においても，主に恋愛がテーマの曲に「胸のドキドキ」や「胸キュン」という歌詞が見られ，漫画やアニメでは驚いたキャラの口から心臓が飛び出す演出がしばしば描かれる．

普段の生活でも胸がドキドキする場面はしばしば訪れる．肉体的に負荷がかかる運動中はもちろん，それ以外においてもプレゼンテーションや面接の前や，ゲームプレイ中の手に汗握る局面，音楽ライブや DJ プレイで好きな曲が流れたときなど，心理状態に応じて心拍数は変化する．

近年，Fitbit のような活動量計にくわえ，Apple Watch や Galaxy Watch などのスマートウォッチが広く普及し，日々の生活における運動や睡眠のトラッキングが可能になった．これらのウェアラブルデバイスには心拍計測機能を持つものがある．計測された心拍数は，運動強度や睡眠の深さの推定など，主にヘルスケア用途で利用されている．

先述の，胸がドキドキする場面における心拍数の変動もウェアラブルデバイスによって捉えられる．音楽ライブにおける開演から終演までの心拍数変化を Fitbit Versa で計測したものを図 1 に示す．図より，ミュージカルパート・MC パート・告知においては心拍数が低い値を示しており，比較的落ち着いていることがわかる．一方，ライブの 1 曲目・推し曲・アンコールにおいて特に高い心拍数が記録されており，手拍子や腕振りの運動で心拍数が変動している可能性はあるものの，ドキドキしていることがわかる．

ウェアラブルデバイスが計測した心拍数の確認には，デバイス本体や，親機になっているスマートフォンの注視が必要である．表示はデバイス使用者のみに示され，他者との共有は記録終了後となる．また，心拍数の表示は BPM (Beat Per Minute) の数字またはそのグラフであり，デバイスで検知した信号波形は表示されない．したがって，既存のウェアラブルデバイスによる心拍計測は以下のような

1 名古屋大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University
2 京都大学防災研究所
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
3 名古屋大学未来社会創造機構 Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

© 2020 Information Processing Society of Japan

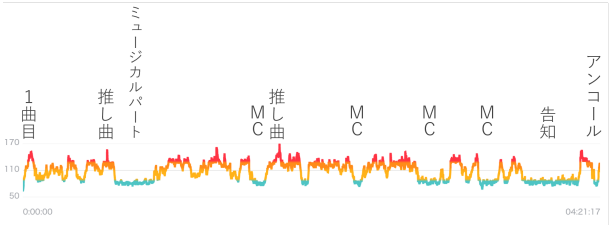


図 1: 音楽ライブにおける第一著者の心拍数変化 (Fitbit アプリで提示されるグラフ)

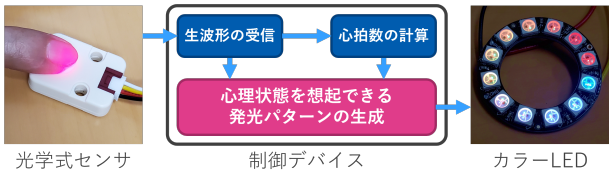


図 2: 光学式センサ，デバイス本体，LED の構成

状況での利用が難しい．

(1) デバイスの注視・数値の解釈が難しい状況：運動中やゲーム中

(2) 心拍波形についてリアルタイムなフィードバックが必要な状況：自らの緊張を客観視したいとき

(3) デバイス使用者の心拍数を他者に提示したい状況：運動中やゲーム中・ビデオ通話

本研究では，これらの状況でも利用可能な，使用者の心拍に関する信号をセンシングして「ドキドキ」をリアルタイムに視聴・共有できるシステムの実現を目指す．本稿では特に，心拍情報がプライバシーに関わるという心情に配慮し，ネットワーク通信を必要としないプロトタイプとして，マイコンを用いてセンサとライトを駆動し，光でドキドキをフィードバックするデバイスを提案する．環境中に設置されたライトまたはデバイス使用者の服そのものが発光することで，光で提示されるドキドキをデバイス注視なしに知覚でき，また他者もその光を捉えられる．さらに，リアルタイムの生の心拍波形に合わせてライトの輝度や色を変化させ，自らのドキドキを視覚的に把握することで，心理状態に対する新たな感覚の発生や他者とのインタクションの発生を期待する．

本稿で製作するプロトタイプの構成を図 2 に示す．心拍センサには入手性が高く，センサの装着が容易な光学式センサを利用する．実際にセンサを駆動し，輝度と色からなる発光パターンを生成するデバイス本体部には Arduino IDE で容易にプログラミングできる ESP32 マイコンを利用し，高速な開発を行う．ライト部には電源・グラウンドに加えて 1 本のデータ線で複数個の輝度と色を容易に制御できるフルカラー LED を用いる．発光パターンとアニメーションはデバイス使用者がドキドキを実感でき，他者もそれを想像できる必要がある．

2. 関連研究・商業利用

センサの小型化・高性能化・低価格化に伴ってモバイルセンシングが身近になり，身体から得た信号を利用するシステムが提案されている．取得される信号は，音や呼吸 [1] に加え，視線・筋電位・体温・発汗 [2] など多岐に渡るが，中でも心拍数は運動や心理状態に応じて変化するため，多数の研究がある．また，商業分野でも，心拍数のエンターテイメント的な利用が行われるようになっている．

2.1 心拍数を利用するシステム

Lotan らの imPulse[3] では，パームレスト形デバイスが提案されている．imPulse デバイスは心拍センサと通信モジュールに LED とバイブレーションモータを内蔵しており，心拍センサで得た信号を近隣の他の imPulse デバイスに送信する．使用者は LED で自分の，振動で他者の心臓の拍動を感じられる．Werner らの United-Pulse[4] では，離れていてもパートナーの拍動を感じられるデバイスのコンセプトが提案されている．デバイスは指輪型で 2 つで 1 対となっており，片方のデバイスの使用者が指で切れ目を閉じると，もう片方のデバイスで検出した心拍パルスに合わせて振動し，パートナーが遠隔地にいても親近感を得られる．

Dekker ら [2] は，心拍数とガルバニック皮膚反応に応じて変化 (バイオフィードバック) するゲーム体験を提案している．ホラー要素のある FPS を対象に，アバターの移動速度やゲーム音量の変化で没入感を増す．また，画面表示も変化し，プレイヤーが落ち着いていると画面がモノクロに近づき，興奮していると赤いフィルタがかかり，落ち着きと興奮が視覚的に提示される．2015 年には実際に心拍数に応じたバイオフィードバック機能を有するゲーム Nevermind[5] が発売されている．

Hassib らの HeartChat[6] では，チャットアプリのメッセージに心拍数の情報を付与し，チャット相手の心理状態を想像できるようにする試みが行われた．メッセージの色を変える，名前の横に心拍数が表示されるなど複数の表示方法が提案され，実験ではチャット相手の興奮が伝わったり，何をしているかが想像できるなど，心拍数の付加でより豊かなコミュニケーションが行われた．Vermeulen らの Heartefacts[7] では，動画クリップの主観的ハイライトの生成を，視聴中の心拍数の変化から行う提案がされている．実験では，楽しい・悲しい・怖いなどの印象を受ける動画を見ている際の心拍数が記録され，視聴者の主観でハイライトとされたタイミングと心拍数の変化が大きかったタイミングの関連が示された．

Khot らの TastyBeats[8] では，運動セッション中の心拍数を測定し，心拍数ゾーンごとに異なる味のドリンクを噴

© 2020 Information Processing Society of Japan

水でグラスに注いで混ぜ合わせ，個人の「運動セッション味」のドリンクを生成するシステムが作成されている．具体的な心拍数が示されなくても，どの味のドリンクが注がれるのか・どれだけの味を混ぜられるかなどが使用者の興味を誘うことが示唆された．Walmink ら [9] は自転車用ヘルメットの後頭部にスマートフォンを取り付け，心拍数を表示するシステムを提案している．心拍数はヘルメットの後頭部に表示されるため，自分の心拍数は自力では確認できず，一緒にサイクリングを行う人が伝えることになり，運動にソーシャルインタラクションが生まれた．

2.2 商業分野での心拍数の利用

ドキドキする場としてお化け屋敷が注目され，心拍数を利用したお化け屋敷体験が展開されている．2016 年に期間限定で開催されたワンシチュエーション・ホラーハウス心音 [10] では，参加者の心拍数が設定値を下回らないと密室型のお化け屋敷から出られないというシチュエーションが設定されていた．NTT 西日本が開催するスマート光お化け屋敷では，活動量計でお化け屋敷通過中の加速度や心拍数を取得し，「ビビり度」を診断するサービスを 2016 年から 2018 年まで行っていた [11], [12], [13].

スポーツ分野では，フェンシングの 2018 年全日本選手権決勝で試合中の選手や審判の心拍数が表示される [14] という取り組みが行われた．e スポーツ分野でセガが提供するゲーム大会実況システム bi-e-Play では，心拍数や発汗状態のグラフ表示が可能 [15] となっている．また，プレイヤーの心拍数が分かる状況に近いものとして，アイドルグループ嵐は 2014 年のライブ公演 [16] において，メンバーの心拍数が大型ビジョンに表示される演出が行われた．同ライブでは，筋電センサを用いた演出も行われた．

上記 2 節を総合すると，研究でも商業でも，心拍数の情報が他者とのコミュニケーションに新たな形をもたらしたり，自らの心理状態を暗黙的にシステムに伝える手段となっている．これを踏まえ，本研究の位置づけをまとめると，心拍の情報をより効果的に可視化し，使用者により強い心理状態のフィードバックを行い，光による他者との新たなコミュニケーションを発生させる試みといえる．本稿では，このうち心拍の情報をより効果的に可視化する点を重視してプロトタイプデバイスを製作する．

3. プロトタイプ LED デバイス

心拍数のセンシング，輝度・色情報への変換，ライトの駆動を行うプロトタイプを製作する．高速なプロトタイプ作成のため，入手性が高く扱いやすいデバイスを用いる．プロトタイプデバイスはセンサ部・プロセッサ部・ライト部の 3 箇所に分けられる．

心拍情報を取得するセンサ部は，波形そのものを読み出す必要があるため，BPM で心拍数を報告する既存の心拍センサやスマートウォッチは向かない．また心拍センサには，心臓の電気パルスを読み取る心電センサと，光を当てて血液量を読み取る光学式センサがある．心電センサは使用時に電極が身体の決まった位置に接触していなければならない一方で，光学式センサは肌に接触させれば読み取りが可能であり，入手性が高いため，今回は光学式センサを使用する．

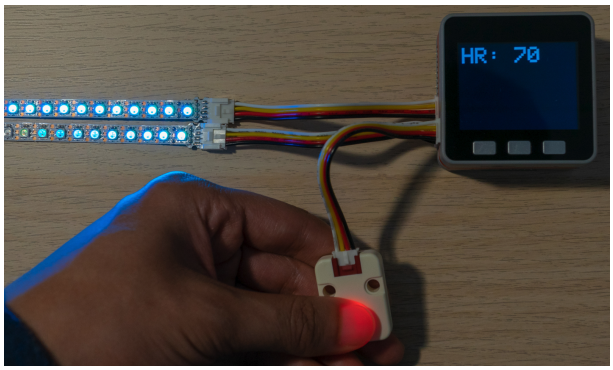


図 3: プロトタイプ

センサから値を読み取り，ライトの輝度・色を決めるプロセッサ部には，安価で性能が高く，Arduino IDE でプログラミングが可能な ESP32 デバイスを利用する．Arduino IDE でプログラミングを行うことで，センサ駆動用ライブラリや LED 制御用ライブラリ[*1]が利用可能となり，発光パターンも容易に変更できる．

実際に発光するライト部には，フルカラーシリアル LED を利用する．数珠つなぎになった LED を電源・グラウンド以外に 1 本のデータ線のみで制御でき，配線の簡素化が可能である．

上記を踏まえ，本稿ではラピッドプロトタイピング向きを謳い拡張性が高い M5Stack を中心に，以下のパーツでデバイスを構成する．MAX30100 は赤色光，赤外 (IR) 光 LED を内蔵する光学式心拍センサで，I^2C 通信により M5Stack と通信する．M5Stack には LED 接続用のポート 2 系統を増設した拡張ユニットとバッテリユニットを取り付け，単体で動作できるようにし，図 3 のようなプロトタイプを構成した．

- センサ: MAX30100 搭載心拍センサユニット[*2]
- プロセッサ: M5Stack[*3]
- ライト: NeoPixel LED[*4]

4. 発光パターンの検討

プロトタイプデバイスで実際に読み取れる値の確認と，得た値を LED の発光パターンに変換する．まず，心拍センサで得られる値を確認し，読み取り値や心拍数 (BPM)

[*1] FastLED. https://github.com/FastLED/FastLED
[*4] https://docs.m5stack.com/#/en/unit/heart
[*4] https://docs.m5stack.com/#/en/core/basic
[*4] https://docs.m5stack.com/#/en/unit/neopixel

© 2020 Information Processing Society of Japan

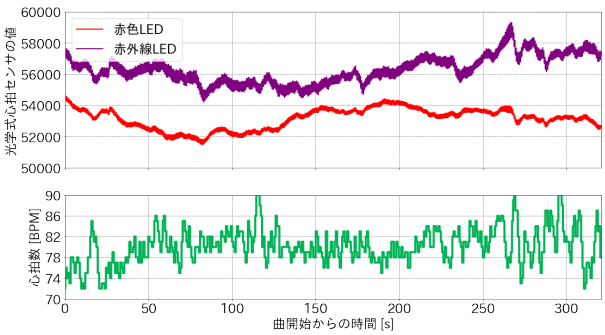


図 4: 曲開始から終了までの読み取り値と心拍数

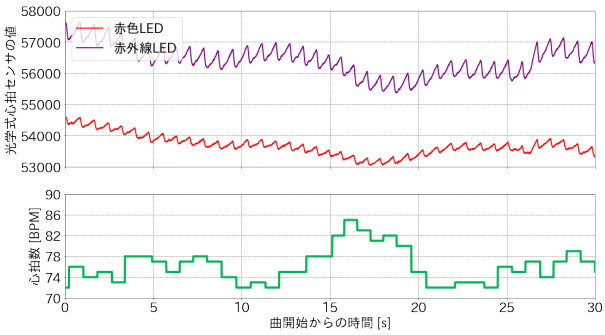


図 5: 図 4 の開始 30 秒の拡大

からの，発光パターンを構成する輝度・色へのマッピングを決める．

次に，一連の LED の発光パターンが時間でどう変化するか (=アニメーション) を考える．使用する LED 個数によって最適なアニメーションがあると考えられ，視聴者が受ける印象も変わると思われる．本稿では，アニメーションとしてウェーブ型とブリージング型を実装する．

4.1 心拍センサ読み取り値の発光パターンへの変換

本稿で使用する心拍センサは赤色光と赤外光の 2 つの波長で，100 Hz レートでセンシングを行う．このうち，赤色光は血中の酸素量の推定に利用される．これは血液の色味が血中の酸素量に依存するためである．赤外光の読み取り値は血液の量に依存して変化するため，心拍数の取得に利用される．センサから発した光は，皮膚内の血液量で反射の多寡が変化し，読み取り値に変化が生じる．図 4 は，ロックバンドのライブ映像のある 1 曲を視聴している際に，左手の人差し指にセンサを当てて記録した第一著者の心拍情報である．図 4 の開始 30 秒を拡大したものを図 5 に示す．図 5 より，鋸歯形状の波形が赤色・赤外光のどちらでも観測されており，脈波を検出していることがわかる．

LED の輝度・色への値の割り当てについて考える．我々は見ている色ごとに異なる印象 (例えば，青色であれば落ち着いた印象，黄色は危険，赤色は興奮など) を受けるため，緊張感や興奮に応じて変化する心拍数の情報を LED の発光色に割り当てる．心拍数から発光色への変換は，安静時

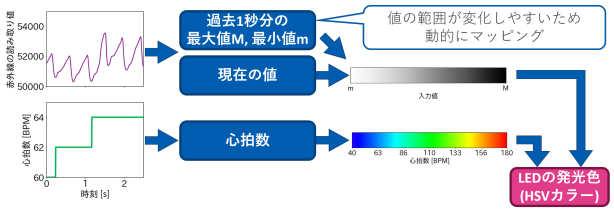


図 6: 読み取り値・心拍数から LED 発光パターンへの変換

に観測される BPM 60 が青色，強度の高い運動中や興奮では赤色になるよう，BPM 180 を赤色として HSV カラースペースに線形に割り当てる．

読み取り値そのものである脈波は，血管を流れる血液量の多寡，つまり心臓の拍動と関連して変化する．心臓が「ドクン」と脈を打った際に LED が鮮やかに光ると，デバイスの使用者がライティングとの一体感を強く得られると考えて，輝度に割り当てる．読み取り値から輝度への変換には，血中の酸素量に依存しない赤外光の読み取り値を利用する．血液は入射した光を吸収するため，読み取り値が大きい場合は血液が少なく，小さい場合は多い．したがって，読み取り値が小さく大量に血液がある場合は輝度を大きく，逆に値が大きい場合は輝度を小さくする．また，図 4 と図 5 より，赤外光での読み取り値には時間的なトレンドが存在している．これは，指の当たり方の変化や，外光の入射で生じる．そのため上限と加減を決め打ちして変換すると，時間の経過とともに読み取り値が範囲の外に出てしまう可能性がある．そこで，過去 1 秒の読み取り値の最大値・最小値を輝度の最小値・最小値に割り当てる．

以上を総合すると，生値と心拍数から輝度と色への変換は図 6 のようになる．計算した輝度と色を一連の LED に時間的にどう反映するか，つまりアニメーションについてもウェーブ型とブリージング型の 2 つを本稿では提案する．

4.2 ウェーブ型アニメーション

一連の LED 上を光が走るアニメーションをウェーブ型アニメーションする．このアニメーションは，波打つように明るい部分と暗い部分が移動していくため，血流が身体をめぐる様子を想起させる．時刻 t における i 番目の LED の輝度 b と色 c は次のようになる．ただし，数珠つなぎの先頭の LED のインデックスを $i = 0$ とし，時刻 t にプロセッサが生成する輝度と色を (B^t, C^t) とする．

$$(b_i^t, c_i^t) = \begin{cases} (b_{i-1}^{t-1}, c_{i-1}^{t-1}) & (i > 0) \\ (B^t, C^t) & (i = 0) \end{cases} \tag{1}$$

29 個の LED を使った場合の，このアニメーションの様子を 1/15 秒ごとに撮影した様子は図 7 のようになる．図より，先頭の LED の色を後続の LED が受け継いでいく様子がわかる．

© 2020 Information Processing Society of Japan

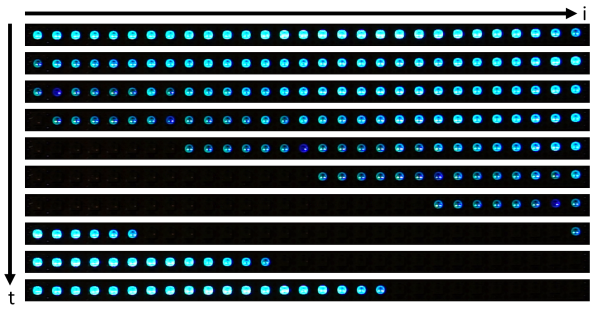


図 7: 実際のウェーブ型アニメーション

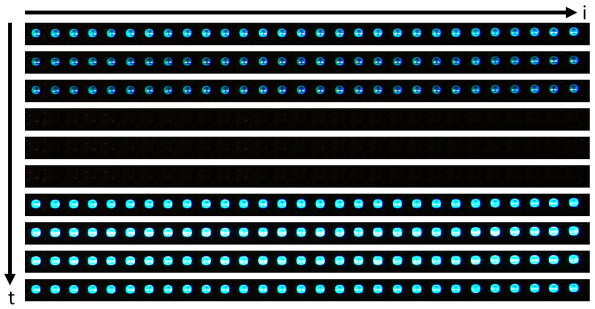


図 8: 実際のブリージング型アニメーション

4.3 ブリージング型アニメーション

一連の LED がすべて同じ輝度・色の発光パターンとなるアニメーションをブリージング型アニメーションとする．このアニメーションは，一連の LED が同時に点滅しているように見え，心臓の拍動を想起させる．時刻 t における i 番目の LED の輝度 b と色 c は次のようになる．

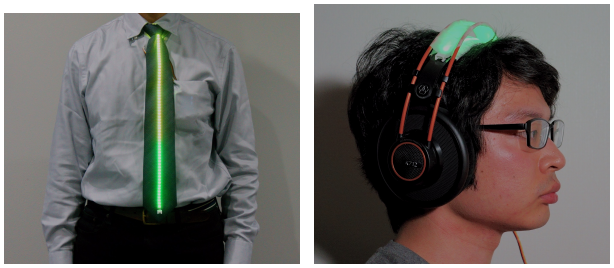
$$(b_i^t, c_i^t) = (B^t, C^t) \tag{2}$$

29 個の LED を使った場合の，このアニメーションの様子を 1/15 秒ごとに撮影した様子は図 8 のようになる．図より，各時刻ですべての LED が同じ輝度・色となっており，時刻によっては完全な消灯状態も生じることがわかる．また，図 8 は図 7 と同じタイミングで撮影した．したがって図 8 の各 LED の輝度・色は，図 7 の一番左側の LED と同じ輝度・色になっている．

4.4 ウェアラブル化の例

プロトタイプデバイスを実際に装着する例を考える．今回は，日常生活で利用する想定で，図 9 のような 2 つの簡単な例を示す．

会議に出席する場合や，大勢の聴衆の前で利用する想定で，図 9a のようなライトニングネクタイを提案する．フォーマルな場において身につける機会が多いネクタイに LED を取り付け，ウェーブ型アニメーションで上から下に光が流れるようにした．ライトニングネクタイは，周辺の人だけでなく，装着している本人の視界の端でも光が確認できる．周辺の人は使用者の緊張感をネクタイを見て判断でき，プレゼンテーションや議論の際により優しい質問を投げかけられる．使用者は例えば自らの発表前にネクタイを見ながら深呼吸して，リラックスする助けにできる．



(a) 緊張感を暗に示すネクタイ　(b) 脳天が光るヘッドホン

図 9: 考えられるウェアラブル化の例

ふたつ目の例として，ウェブ会議・ビデオ通話・ゲーム配信など，顔周辺のみを撮影する場面を想定し，図 9b のようなライトニングヘッドホンを提案する．このヘッドホンは，頭頂部を通るヘッドバンドに LED を取り付けたシンプルなものである．適用するアニメーションについて考える．ヘッドバンドの長さにより LED の個数が制限されるうえ，使用者は光を直接確認できない．また，ビデオ通話では相手が小さいウインドウで映像を見ると考えられるため，ウェーブ型アニメーションでは光が走っている様子がわからない．したがって，ネクタイの例とは異なり一斉に光るブリージング型が適する．画質に限界があり，小さいウインドウで相手の様子を見るウェブ会議では，顔色を読み取りづらい．ヘッドホンが光ることで，話題に対する反応を確認できたり，体調が悪くて動悸が出ている場合に光でそれを知れると考えられる．また，ゲーム配信でもゲーム映像に小さいウインドウを重ねている場合は，配信者の表情が読み取りづらい．このような場合でもヘッドホンが光ることで手に汗握る見せ場で配信者が興奮する様子を視聴者が見られ，より臨場感のある体験を共有できると考えられる．

上記の例以外に，運動中に適切に負荷がかかっているかをジャージに取り付けた LED から確認する・老人ホームの入居者の体調に合わせて衣服や車椅子が光るなどの使用シナリオが考えられる．本稿では安静時には青く，心拍数が高いときに赤く光るように心拍数から色への変換を定義した．運動中はターゲットとなる心拍数があるため，緑→黄→赤の範囲のみを用いて，目的の心拍数近辺ではより緑に発光し，低すぎたり高すぎたりする場合には赤色に発光するような発光パターンが考えられる．運動中に使用者の心拍数が公になるメリットとして，トレーニングメニューでかかる負荷を本人やコーチがリアルタイムで客観的に把握できる点が挙げられる．一方，老人ホームで入居者の体調に合わせて光る例について考える．今後，高齢化社会が

© 2020 Information Processing Society of Japan

より進行すると，老人ホームへの入居者数が増え，体調管理やモニタリングが難しくなると考えられる．そこで，入居者が光っていれば職員がひと目見て体調の悪い入居者を発見したり，入居者同士で体調を容易に確認できるようになると考えられる．本稿では血中の酸素量に依存する赤色 LED のデータは利用しなかったが，どちらの例においても血中酸素量に合わせて変化する発光パターンを定義できると使用者の状態をより適切に反映できる．また，センサを複数装着して脈波伝搬速度を計測し，血圧情報も可視化する応用も考えられる．

5. 実用化に向けて解決すべき問題点

プロトタイプデバイスの製作と，ウェアラブル化例で判明した問題点を整理し，今後の開発の助けとする．問題点としては，センシング精度およびセンサ装着，発光パターンの修正，物理配置の異なる LED への対応，配線とバッテリー・デバイス構成が挙げられる．

まず，センシング精度とセンサ装着についてまとめる．本稿で利用した光学式心拍センサはセンサと皮膚の触れ方や，外光の入射によって得られる値の範囲が容易に変化してしまう．したがって，使用者が動くと読み取り値が心拍とは関係なく変動してしまい，発光パターンに影響する．本稿で利用したセンサにはリストバンドやクリップのような，安定的に装着できる機能がなかったため，今後開発を進める際には比較的動きが少ない耳たぶのような部位に装着する工夫が求められる．また，センサ装着部位の加速度信号を取得し，使用者の動きで生じた心拍と関係ない変化をキャンセルするといった対策も考えられる．

発光パターンの修正について，輝度と色の両面で考える．輝度は過去 1 秒の読み取り値の最大値・最小値で範囲を設けて動的に変更したが，トレンドを推定して血流がより増える場面でより明るく発光するよう修正できると「脈の打ち方」に合わせた発光が可能になる．色については，得た心拍数から変換したが，10BPM 程度の変化では大きな色の差が発生せず，視覚的な認識が困難になる．そこで，心拍数に一定を超える変化が生じた場合に一度実際より大きく色を変化させるなど，心拍数の変化を認識しやすくする工夫が考えられる．また，センサの装着位置によっては心臓の拍動と脈波の読み取り値に時間差が生じるため，脈波伝搬速度を織り込んで時刻を修正して発光パターンを生成するとさらなる一体感を得られる．

物理配置の異なる LED への対応について考える．本稿で提示した実際のアニメーションとウェアラブル化の例では，すべて線形に並んだ LED を使用した．しかし，LED の物理配置については円周上や平面パネル状など様々なものがあり，それぞれに最適なアニメーションが異なると考えられる．例えば，円周上に配置された LED では心臓の拍動に合わせてタコメータの針が動くように点灯するアニメーション，平面パネルでは波紋が広がるようなアニメーションでより臨場感が増すと考えられるため，今後アニメーションの追加検討が必要になる，

配線とバッテリーについてまとめる．配線については，今回はひとつのプロセッサ部からセンサ，LED への配線が伸びた．今後，配線の取り回しは問題となる．特に，センサ部周辺の配線は使用者の動きの障害になりかねないため，無線化も視野に入れる必要がある．バッテリーとデバイス構成について，本稿では M5Stack をプロセッサ部に用い，バッテリモジュールも M5Stack 専用品を使用した．しかし，長時間動作を考えるとバッテリーはより大容量で容易に交換できるものが必要であり，また M5Stack はディスプレイや TF カードスロットなど，実際に LED を駆動する際には必要ない部品がある．したがって，今後開発するデバイスでは専用の基板設計が必要になる．

6. まとめ

モバイルデバイスの高性能化に伴って一般的になってきた心拍センシングではあるが，リアルタイム性や他者との共有の点では現在でも課題がある．本稿では，心拍の脈波信号に合わせて LED を駆動するデバイスを提案した．本稿では BPM で表される心拍数だけでなく，実際の波形を観測して LED の輝度と色に割り当てるプロトタイプデバイスを作成した．

プロトタイプデバイスは，ラピッドプロトタイピングに向いた M5Stack をプロセッサとして，光学式心拍センサとフルカラーシリアル LED で構成した．また，センサから得られる情報からの LED 輝度・色への変換として，読み取り値を輝度に，心拍数を色に割り当てた．さらに，一連の LED のアニメーションとして，ウェーブ型とブリージング型を定義し，ウェアラブル化の簡単な例を示した．

今後の課題としては，前章で示した問題点の解決と，実際に被験者を募っての印象の検証，4.4 節で示したシナリオでの使用可能性の検討などが挙げられる．

さらに，本稿ではすべてがローカルで完結していたが，心拍データをリアルタイムで，異なるシステム間で共有できると，より心拍データの活用が進むと考えられる．そのためには必要なセンサ情報の定義や，異なる方式の心拍センサのデータの変換可能性の議論，リアルタイム心拍データ共有プロトコルの設計なども必要である．

謝辞

この研究の一部は，JST CREST JPMJCR1882 および NICT 委託研究，総務省 SCOPE の支援を受けたものです．

参考文献

[1] Hyeryung Christine Min and Tek-Jin Nam. Biosignal Sharing for Affective Connectedness. CHI’14 Extended

© 2020 Information Processing Society of Japan

Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA' 14, pp. 2191–2196, 2014.

[2] Andrew Dekker and Erik Champion. Please Biofeed the Zombies. In *2007 DiGRA International Conference: Situated Play*, DiGRA'07, pp. 550–558, 2007.

[3] Gilad Lotan and Christian Croft. imPulse. CHI' 07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA' 07, pp. 1983–1988, 2007.

[4] Julia Werner, Reto Wettach, and Eva Hornecker. United-Pulse. In *10th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI'08, pp. 535–538, 2008.

[5] FLYING MOLLUSK. Nevermind (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://nevermindgame.com/`, 2015.

[6] Mariam Hassib, Daniel Buschek, Paweł W. Wozniak, and Florian Alt. Heartchat. In *2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI' 17, pp. 2239–2251, 2017.

[7] Jo Vermeulen, Lindsay MacDonald, Johannes Schöning, Russell Beale, and Sheelagh Carpendale. Heartefacts. In *2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS' 16, pp. 712–723, 2016.

[8] Rohit Ashok Khot, Jeewon Lee, Larissa Hjorth, Florian "Floyd" Mueller. Tastybeats. In *9th International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI' 15, pp. 229–232, 2015.

[9] Wouter Walmink, Danielle Wilde, Florian "Floyd" Mueller. Displaying Heart Rate Data on a Bicycle Helmet to Support Social Exertion Experiences. In *8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI' 14, pp. 97–104, 2014.

[10] PR TIMES. 史上初！プレイヤー同士の"心拍数"と"かけひき"が生死を分ける！？狂気のワンシチュエーション・ホラーハウス心音 (しんおん) 明日、楽市街道箱崎店にて本邦初開催！ (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000001.000020471.html`, 2016.

[11] NTT 西日本. スマート光お化け屋敷の実施について (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://www.ntt-west.co.jp/news/1607/160715a.html`, 2016.

[12] NTT 西日本. スマートお化け屋敷 2017 (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://www.ntt-west.co.jp/ikouze/obake2017/`, 2017.

[13] NTT 西日本. スマートお化け屋敷 2018 (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://www.ntt-west.co.jp/ikouze/obake2018/`, 2018.

[14] Number Web. 劇場に響く「WE WILL ROCK YOU」。フェンシング日本一決戦の超演出。(2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://number.bunshun.jp/articles/-/832809`, 2018.

[15] セガ. ゲーム大会実況システム『bi-e-Play』大会用リプレイ機能「Battle Timeline」を闘神祭で運用。 (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://sega.jp/topics/171019_arcade_1/`, 2017.

[16] 嵐〜ARASHI〜オフィシャルサイト. ARASHI LIVE TOUR 2014 THE DIGITALIAN (2020 年 5 月 14 日閲覧). `https://www.j-storm.co.jp/arashi/discography/arashi-live-tour-2014-digitalian`, 2015.

© 2020 Information Processing Society of Japan