

疲労時五感：疲労時の五感能力減少度合いの基礎調査と 五感拡張装置開発にむけて

大西 鮎美¹ 寺田 努¹

概要：眼鏡や補聴器といった五感を拡張する装具は、人々の生活の質向上に不可欠なものである。近年は、高度な五感拡張デバイスが開発されており、例として補聴器の環境に応じた音量調整機能などがあげられる。しかし、人間の五感は環境要因のみでなく疲労で日常的に変化する可能性があり、五感拡張装置が疲労を考慮しなければ、正確に現状の五感を予測できず深刻な問題を引き起こすと考えられる。具体的には、常に少しずれた制御だと人間にとっては五感を常に調整し続ける状態が起こり、かえって不快に感じてしまうことや異変に気づけないなど危ない場面が起こりうる。よって、疲れているといったユーザの状態を五感拡張装置の補正項に入れることが求められる。五感において、負担状態で一過性の低下が引き起こされて生体負担状態、つまり疲労による能力の低下がどの程度起こるかは筆者らが知る限り定式化されておらず、五感拡張装置に適用可能な形で知見がまとまっていない。そこで本研究では、疲労によって五感能力が変化した状態を疲労時五感とよび、身体や精神の疲労が五感に与える影響を調査してモデル化し、疲労時五感を推定することで、疲労を考慮した五感拡張装置を開発する。本論文では、この疲労時五感の取り組みと現在行っている五感の基礎調査について紹介する。

1. はじめに

眼鏡や補聴器といった五感を拡張する装具は、人々の生活の質向上に不可欠なものである。近年は、高度な五感拡張デバイスが開発されており、例として補聴器の環境に応じた音量調整機能などがあげられる [1], [2], [3], [4].

しかし、人間の五感は環境要因のみでなく疲労で日常的に変化する可能性があり、五感拡張装置が疲労を考慮しなければ、正確に現状の五感を予測できず深刻な問題を引き起こすと考えられる。具体的には、常に少しずれた制御だと人間にとっては五感を常に調整し続ける状態が起こり、かえって不快に感じてしまうことや異変に気づけないなど危ない場面が起こりうる。よって、疲れているといったユーザの状態を五感拡張装置の補正項に入れることが求められる。

五感において、負担状態で一過性の低下が引き起こされて生体負担状態、つまり疲労による能力の低下がどの程度起こるかは筆者らが知る限り定式化されておらず、五感拡張装置に適用可能な形で知見がまとまっていない。そこで本研究では、疲労によって五感能力が変化した状態を疲労時五感とよび、身体や精神の疲労が五感に与える影響を調査してモデル化し、疲労時五感を推定することで、疲労を

考慮した五感拡張装置を開発することを目指す。

本論文では以降、2章で関連研究を紹介する。3章で疲労時五感の調査と拡張デバイス開発のための研究方法を説明し、4章で五感変化の基礎調査の内容について述べ、5章で実験の結果を考察する。最後に6章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

ウェアラブルセンサを用いた疲労のセンシングに関する研究は数多く行われている。Mokaya らは、スポーツ等における骨格筋の過剰な運動による負傷を防ぐために、力覚センサ、加速度センサ、筋電位センサを用いて、運動環境における骨格筋疲労の度合いを定量化している [5]. Lee らは、ドライバの指に光学式心拍 (PPG) センサ、ハンドルに加速度・角速度センサを取り付けることで、スマートウォッチを通してドライバに眠気を警告するシステムを作成しており、最大 96.3% 覚醒指数の予測精度を確認している [6]. Tsao らは、手作業によるマテリアルハンドリング (MMH) の肉体的疲労を推定するために、呼吸・心電図 (RSPEC) センサ、皮膚電気活動 (EDA) センサを用いて、3つのレベルに分類された被験者の知覚疲労を推定している [7]. Ohnishi らは、手術ロボット操作時の医師の疲労度を、視線センサ、心電センサ、座面圧力センサ、両手につけた加速度センサおよび筋電位センサの値から推定する手

¹ 神戸大学大学院工学研究科

法を提案している [8]。Tagらは、眼電位センサを内蔵した眼鏡型デバイスで取得した瞬目の頻度のデータに基づいて一日の疲労度をモニタリングし、継続的な覚醒度の評価を行った [9]。また飯塚らは、心拍変動をモニタリングすることでスポーツ競技者の疲労の評価を行っている [10]。結果より、一流スポーツ競技者において、トレーニングによってもたらされる身体的な疲労を評価するうえで心拍変動モニタリングが有用であることが示唆された。三角らは、自動車運転中の運転者の疲労状態の評価をするため、生体信号評価装置を備えたドライビングシュミレータを構築した [11]。評価実験の結果、眼球運動の周波数分析から運転者の疲労や各精度の低下から作業能率が低下する状態を把握できることが確認された。

このようにセンサによる疲労度分析や疲労度推定の研究は多くあるが、メンタル・フィジカルに分けた疲労度の推定手法およびそれらを再統合するような疲労度推定技術は確立されていない。本研究で提案する疲労時五感の拡張デバイスは、先行研究でも用いられている呼吸センサや心拍センサを用いて疲労の指標となる値を取得して、その値に基づき疲労時の五感能力の変化を予測する。

五感を拡張する機器としては、眼鏡や補聴器などが一般に普及している。特に補聴器や集音器は、近年、デジタル信号処理、指向性マイクによる集音技術、オープンモールド設計のフィッティングなどの技術の革新により、様々な機能が実用化されつつある [12]。WIDEX MOMENT 440は、聞こえ方を環境に適応させる機能やリアルタイム語音強調機能がある [1]。Signia 7AXは、言葉と環境音を別々に処理するプロセッサを内蔵しているほか、歩いている、止まっているといった動きを感知し、より聞こえやすいように自動で音を調整する [2]。Olive Smart Ear Plusという集音器は、スマートフォンで自分の好みに合わせた集音設定ができ、医療機器である補聴器のように自分の知覚にあわせる個別設定機能がある [4]。このように現在製品化されている補聴器や集音器は環境音に応じた制御や装着者の動きを感知した制御機能を備えるが、疲労などによる能力低下を自動で補正するものは筆者らが知る限りない。

3. 研究方法

本研究では、疲労時五感の感覚特性を解明し、疲労に応じて五感を拡張する装具を開発する。この装具には、ユーザが疲労時も元気なときと同じような能力になるために機械学習を用いた疲労推定による能力拡張度合の制御をいれる。図1に研究全体の概念図を示す。以下、図1の各項目について説明する。

疲労時五感の発生要因の調査

疲労時五感推定手法を確立するために、まず疲労前後の五感の能力の低下度合いから何が五感の能力低下を引き起こしているかを明らかにする。被験者にメンタル・フィジ

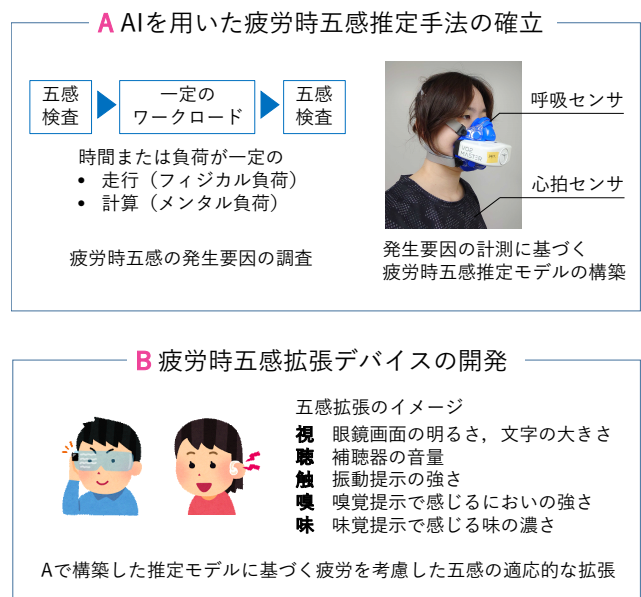


図1 研究全体の概念図

カルそれぞれのワークロードを一定に与え、疲労を与えた際の五感の変化を多人数に対して調査し、疲労時五感の存在やその個人差を確かめる。疲労度の指標には、フィジカルであれば呼吸、メンタルであれば心拍や瞬きなどが一般的に用いられているため、本研究でもこれらをウェアラブルセンサを用いて計測する。加えて、与える疲労の度合いや、急激に与えるかゆっくり与えるかを変化させ、疲労時五感モデルを定式化する。これにより、同じ疲労度でも急激に疲れることの方が視力にとってはよい、といったことが分かる期待できる。

発生要因の計測に基づく疲労時五感推定モデルの構築

次に、ウェアラブルセンサを用いて負荷と疲労の関係を明らかにし、機械学習によってセンサ値から五感変化率を推定するモデルを構築する。負荷に対する耐性は個人差があると想定されるため、負荷を与えたときのウェアラブルセンサ値と疲労の関係を個人ごとに調査し、基礎調査で得た能力低下率と、センサーデータの関係を表現する疲労時五感推定モデルを構築する。

疲労時五感の拡張デバイスの開発

そして、これらの調査結果をもとに、疲労の予兆を検知して能力を元気なときと同等となるような制御を行う日常利用可能な五感拡張デバイスを開発する。提案デバイスは、心電、筋電のほか、瞬き、呼吸などの疲労度指標となる値を取得し、図2の流れで疲労時五感推定モデルによって能力の変化率を推定して、周辺環境の変化と推定結果であるユーザの五感変化に合わせて五感を拡張する。日常生活での利用を想定すると、疲労度の計測は小型デバイスで行う必要がある。さらに、状況によって疲労時五感推定の確信度が異なると考えられるため、状況認識機能も求められる。加えて、小型化のために疲労度指標となるコンテキ

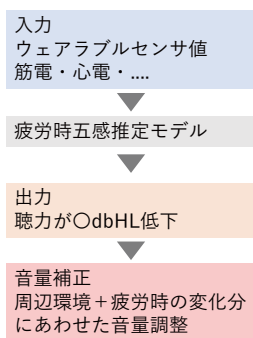


図 2 疲労時聴覚の拡張デバイスの機能



図 3 実験環境

ストの間接的な推定方法も検討する。よって心拍、瞬き、呼吸、筋電などの疲労度指標となる値取得と、およびデバイス小型化のための間接的な推定の検討に加え、状況認識が可能な小型ウェアラブルデバイスを開発し、従来の機械学習アルゴリズムや深層学習を活用してリアルタイムに疲労度を推定する。音量であれば周波数帯域ごとに変化が現れる可能性があるため、単純に全体の音量を大きくするといった制御だけではなく、人間の感覚変化にあった細かな制御項目を検討する。

4. 五感の変化に関する基礎調査

疲労前後で五感の能力が変化するかを確認するために実験を行った。実験では、被験者にメンタル・フィジカルそれぞれのワークロードを一定に与え、疲労を与える前後に感覚検査を行いそれらと比較することで、五感の変化を評価した。五感検査などワークロードの前後におけるタスクで被験者が疲れることを防ぐために、時間的な制約を考慮し、本実験は五感のうち比較的定量評価が行いやすい、聴覚、視覚、触覚の3種類について計測を行うこととした。なお本実験は、神戸大学大学院工学研究科人を直接の対象とする研究倫理審査委員会の承認を受けて行ったものである。

4.1 負荷の定量化

ワークロードは、図3のようにメンタルへの負荷としては計算問題への回答、フィジカルへの負荷としてトレッドミルでの走行とし、それぞれ20分ずつ被験者に行わせた。負荷なしの状態と比較して五感変化の程度が疲労の影響であるかを確かめるため、ワークロードを行わずに20分リラックスして座らせる試行も行った。これらの3種類のワークロードを行わせる実験はそれぞれ別日に行ったため、独立しているものとする。認知能力の日変動を考慮する必要があるため[13]、各日の試行は被験者ごとに1日のなかで同じ時間帯に行った。実験場所は防音設備のあるダンススタジオで、できる限り静かな環境をつくって実験を行った。

本実験における負荷の定量化はワークロードの時間を一

定にすることで統一するが、これに加えて被験者の生体データをウェアラブルセンサで、被験者の主観的な疲労感を質問紙によって調査する。また、反応速度も疲労指標として用いられているため、ワークロードの前後にリアクションタイムテストを行った。本実験で行ったリアクションタイムテストは、モバイル端末上に赤いドットが提示されたときにできる限り早く画面をタッチする、というものである。

計算実験では、被験者に心拍センサを装着させ、2桁と2桁の数の加算、2桁と1桁の数の乗算の問題が交互に出てくるものに答えさせた。被験者には筆記でこれにできるだけ多く回答するように伝えた。走行実験では、被験者は呼吸センサと心拍センサを装着し、20分間走れるペースでトレッドミル上を走行した。実験で使用した心拍センサはWHS-3[14]、呼吸センサはVO2 Master[15]である。被験者は計算実験4名、走行実験1名で、20代から30代の男女である。

実験の手順を以下に示す。1回の実験時間が前後の五感検査などを含めて約60分程度となるように実験を設計した。

- (1) 事前アンケート
- (2) 五感検査(聴覚, 視覚, 触覚)
- (3) リアクションタイムテスト(3分)
- (4) ワークロード 計算/走行/何もしない(20分)
- (5) リアクションタイムテスト(3分)
- (6) 五感検査(聴覚, 視覚, 触覚)
- (7) NASA-TLX
- (8) 事後アンケート

事前、事後のアンケート項目をそれぞれ表1と表2に示す。このアンケートへの回答のワークロード前後における比較と、ワークロード後に行ったメンタルワークロードの測定手法であるNASA-TLX[16]の結果から、ワークロードで感じた被験者の主観的疲労感を考察する。

4.2 五感の検査方法

五感の検査方法は、視力検査はランドルト環を用いた検

表 1 事前アンケートの項目

質問項目
1. 昨日の睡眠時間は何時間ですか
2. 1で回答した昨日の睡眠時間は十分ですか (十分/睡眠不足)
3. 今、疲れていますか? 5段階でお答えください (1: 全く疲れていない-5: とても疲れている)
4. 今、眠いですか? 5段階でお答えください (1: 全く眠くない-5: とても眠い)
5. 疲れに影響しそうな懸念事項があれば差し支えない範囲でお答えください

表 2 事後アンケートの項目

質問項目
1. 今、疲れていますか? 5段階でお答えください (1: 全く疲れていない-5: とても疲れている)
2. 今、眠いですか? 5段階でお答えください (1: 全く眠くない-5: とても眠い)
3. 実験について思ったことがあればお答えください

査, 聴力検査は純音聴力検査, 触覚検査は2点識別覚検査とした. 本実験で行った検査方法について, 詳細を以下に述べる.

ランドルト環を用いた視力検査: 「C」のようなランドルト環というマークが書かれたランドルト視力表を用いて, 円の途切れた部分が見えるかどうかで視力を判定する検査方法である.

純音聴力検査: 様々な周波数の音を提示して各周波数で聞こえる音の最小レベルを指定させることで聴覚感度を確認する検査方法である. 本実験では 250 Hz から 8000 Hz までを検査対象とした.

2点識別覚検査: ノギスなどを用いて皮膚の2点を同時に触れたり, 1点を触れたりするのを繰り返し, 閉眼時に2点と識別できる最小距離を計測する検査方法である. 本実験では被験者の文字を書かない方の手の甲に先端を細くしたノギスを当てて, この計測を行った.

5. 実験結果と考察

5.1 計算実験

聴力検査の結果を図4と図5に示す. 計算実験に参加した被験者4名のうち, 被験者4のみ走行実験にも参加したため, 計算, なにもしない, 走行の聴力検査結果を図5にまとめた. また, 視力および触覚検査の結果をそれぞれ表3, 表4に示す.

視力や触覚に関しては, 今回のタスクでは測定結果のばらつきはあるもののワークロードの前後で大きな変化はみられなかった. 実験では, 被験者ごとに同じ時間帯に計算, 何もしないの試行をそれぞれ行ったが, 図4のように聴力検査の結果にはばらつきがあった. 図4左の被験者3の結果をみると, 計算の前後で聴力があがっている. この被験者は, アンケートでも「計算後には集中力が上がっている

表 3 視力検査の結果

被験者 No.	左右	視力変化 (後-前)	
		計算	何もしない
1	R	0	0
	L	-0.1	-0.1
2	R	0	0.1
	L	0	-0.1
3	R	-0.3	0.1
	L	0	0
4	R	-0.1	0
	L	0.1	0.1

表 4 触覚検査の結果

被験者 No.	触覚変化 (後-前) [mm]	
	計算	何もしない
1	-5	0
2	2	2
3	5	4
4	0	1

表 5 走行実験前後の感覚検査結果

項目	計測結果
右視力変化 (後-前)	0.2
左視力変化 (後-前)	0.1
触覚変化 (後-前) [mm]	1

気がした」と回答しており, 20分の計算のワークロードにより集中力があがり, それが聴力検査の結果に影響している可能性がある.

今回の実験では計算, 何もしないの前後の両方で, 被験者らのヒアリングレベルに変化がみられた. 負荷によって聴力の変化が起こっていれば, 何もしないの前後では変化が小さいはずである. また, 20分間の何もしないタスクの試行後のアンケートでは, ほとんどの被験者が何もしないと眠くなったと回答した. よって計算による影響以外に, 何もしないことによっても何らかの変化が起こった可能性がある. よって, この聴力の変化が, 疲労以外のその他の要因での変化なのかを結論づけるために, さらに多くの被験者を集めて繰り返し実験を行っていく必要がある.

5.2 走行実験

走行実験前後の視覚, 触覚検査結果を表5に示す. また走行中の呼吸センサで取得した値の最大値, 平均値を表6に示す. 表5や聴力検査結果をまとめた図5より, 走行の前後で視力, 聴力, 触覚に大きな変化はみられなかった. しかし, 被験者数が1名と少ないため, さらに被験者を増やして実験を行う. また, 負荷の度合いの適切さに関しては, 被験者は走行後は少し疲れた程度であったと答えていたため, もう少し走行速度を上げたり, 走行時間を延ばしたりするといった改善が必要と考えられる.

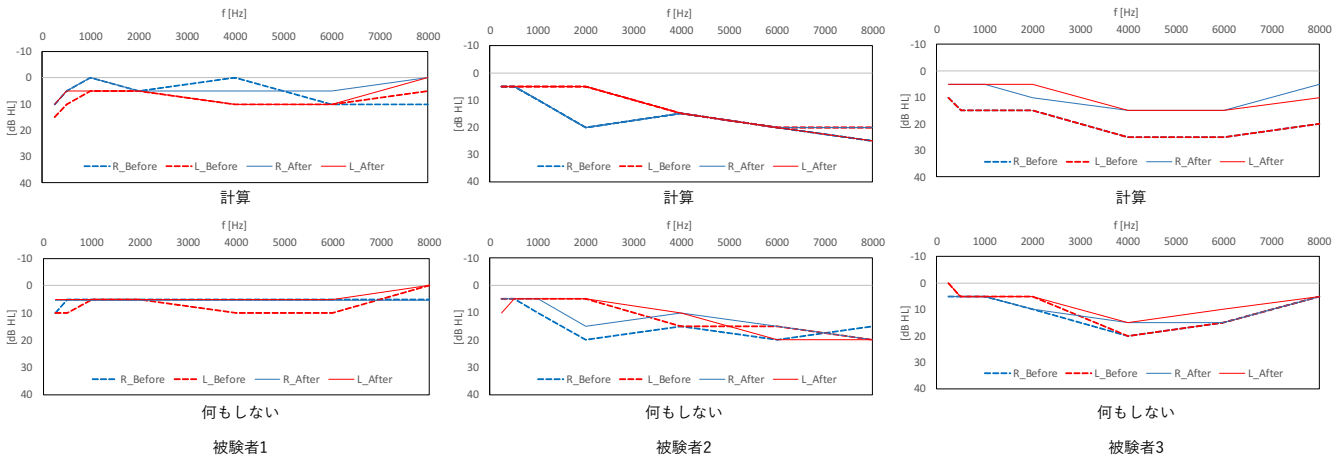


図 4 聴力検査の結果 (被験者 1 から 3)

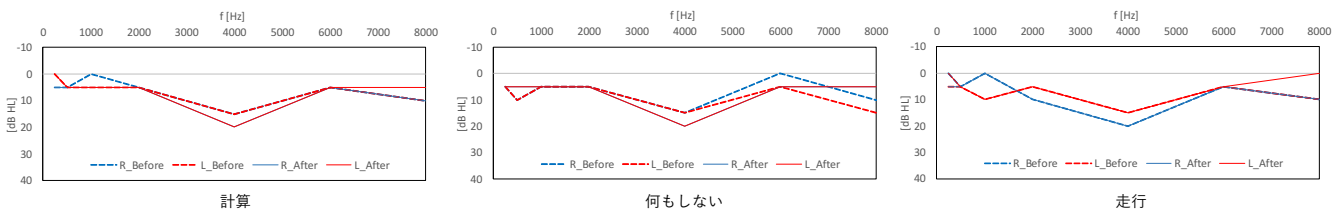


図 5 聴力検査の結果 (被験者 4, 走行あり)

表 6 走行実験における呼吸センサ値

項目	最大値	平均値
体重あたり酸素摂取量 VO2 [mL/kg/min]	44.7	31.1
呼吸数 Rf [bpm]	53.3	38.5
換気量 Ve [L/min]	81.0	49.8

5.3 今後の展望

実験の結果より、軽度のワークロードであれば目が覚めた、作業後に集中力が上がったと感じるといった回答が得られたため、適切な作業負荷について検討する必要がある。また、日常生活における疲労は複合的な要因によって起こり、複雑なものだと考えられる。このような実環境での計測も並行して行っていくことで、より感覚変化の規則性がわかると考えている。よって、今回の実験結果をふまえて手法を改善し、今後はより多くの被験者を集めて条件を変えて実験を行うことで、結果を一般化することを目指す。

本研究は、五感をセンシングしてそれに合わせて提供されるサービス全ての基礎的知見となると考えている。疲労時五感を拡張できれば日常生活が劇的に変わるだけでなく、筆者らがこれまで行ってきた内視鏡手術中の疲労度推定の研究 [8] などでも、疲労時と推定できたときには執刀医に休憩を促すことを想定していたが、現実的に交代ができない場面でも適応的に能力を拡張するという選択肢を増やせる可能性がある。

6. まとめ

本研究では、疲労によって五感能力が変化した状態を疲

労時五感とよび、身体や精神の疲労が五感に与える影響を調査してモデル化し、疲労時五感を推定することで、疲労を考慮した五感拡張を行うシステムを提案した。疲労時五感の基礎調査として、現在行っている実験とその結果を報告した。疲労と五感の関係を明らかにするためにはまだ様々な検証が必要であるが、本研究は五感をセンシングしてそれに合わせて提供されるサービス全ての基礎的知見となり、疲労時五感を拡張できれば、日常生活が大きく変わると考えている。

謝辞 本研究の一部は、JST ACT-X(JPMJAX21A6)、および JST CREST(JPMJCR18A3) の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] WIDEX: WIDEX MOMENT 440, <https://www.widex.com/ja-jp/hearing-aids/moment/>.
- [2] Signia: Signia 7AX, <https://www.signia-pro.com/ja-jp/product-portfolio/signia-ax/>.
- [3] Philips: ミニ RITE T R, <https://www.hearingsolutions.philips.com/ja-jp/hearing-aids/hearing-aids/minirite-tr>.
- [4] Olive Union: Olive Smart Ear Plus, <https://www.oliveunion.com/jp/>.
- [5] F. Mokaya, R. Lucas, H. Y. Noh, and P. Zhang: Burnout: A Wearable System for Unobtrusive Skeletal Muscle Fatigue Estimation, Proc. of the 2016 15th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), pp. 1–12 (Apr. 2016).
- [6] B. G. Lee, B. L. Lee, and W. Y. Chung: Smartwatch-Based Driver Alertness Monitoring with Wearable Mo-

- tion and Physiological Sensor, Proc. of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), pp. 6126–6129 (Aug. 2015).
- [7] L. Tsao, L. Ma, and C. T. Papp: Using Non-Invasive Wearable Sensors to Estimate Perceived Fatigue Level in Manual Material Handling Tasks, Proc. of the International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, pp. 65–74 (July 2018).
- [8] A. Ohnishi, H. Tohnan, T. Terada, M. Hattori, H. Yoshinaka, Y. Sumi, H. Egi, and M. Tsukamoto: A Method for Estimating Doctor’s Fatigue Level in Operating a Surgical Robot Using Wearable Sensors, Proc. of the 17th IEEE Workshop on Context and Activity Modeling and Recognition 2021 (CoMoRea 2021), pp. 38–43 (Mar. 2021).
- [9] B. Tag, A. W. Vargo, A. Gupta, G. Chernyshov, K. Kunze, and T. Dingler: Continuous Alertness Assessments: Using EOG Glasses to Unobtrusively Monitor Fatigue Levels In-the-wild, Proc. of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2019), No. 464, pp. 1–12 (May 2019).
- [10] 飯塚太郎, 大岩奈青, 舩田圭太: 心拍変動モニタリングによる一流スポーツ競技者の疲労評価に関する研究, デザントスポーツ科学, Vol. 35, pp. 53–60 (2014).
- [11] 三角育生, 長谷川将之, 佐々木健, 保坂 寛, 板生 清, 橋本芳信, 有光知理, 中川 剛, 河内泰司: 自動車運転者の疲労センシングのための携帯型評価システムの構築手法に関する研究, マイクロメカトロニクス, Vol. 47, No. 20, pp. 1–10 (2003).
- [12] H. H. Kim and D. M. Barrs: Hearing Aids: A Review of What’s New, Vol. 134, No. 6, pp. 1043–1050 (June 2006).
- [13] C. Schmidt, F. Collette, C. Cajochen, and P. Peigneux: A Time to Think: Circadian Rhythms in Human Cognition, Cognitive Neuropsychology, Vol. 24, No. 7, pp. 755–789 (Oct. 2007).
- [14] Union Tool Co.: 心拍センサ WHS-3, <https://www.uniontool.co.jp/product/sensor/whs3.html>.
- [15] VO2 Master Health Sensors Inc.: VO2 Master, <https://vo2master.com/>.
- [16] S. G. Hart and L. E. Staveland: Development of NASA-TLX (Task Load Index) Results of Empirical and Theoretical Research, *Advances in Psychology*, Vol. 52, pp. 139–183 (1988).