

重心移動が可能なダンベル型デバイスの製作と その知覚に関する実験

有菌 拓也^{1,a)} 橋爪 崇弘^{1,b)} 矢谷 浩司^{1,c)}

概要：筋力トレーニングは健康の増進に寄与することが知られている。しかしながら、従来の筋力トレーニングは単純な反復運動で構成されているため、ユーザが動機を維持しにくい課題がある。本研究では、この課題を解決するための手法として、重心の移動が可能なダンベル型デバイスを提案する。このデバイスでは左右のウェイトプレート間で水を移動させることにより重心の移動が可能である。重心を移動させることにより、デバイスの総重量に変化がなくとも、負荷が変化したような知覚を与えられる。この技術によって、ゲームをプレイしながら筋力トレーニングを行う新しい exergame などのアプリケーションが実現できる。本稿では、アクリルを用いて製作したダンベル型デバイスと、このデバイスがユーザに与える負荷の知覚に関する実験について報告する。

Examining Load Perception of a Liquid-based Weight-shifting Device

TAKUYA ARIZONO^{1,a)} TAKAHIRO HASHIZUME^{1,b)} KOJI YATANI^{1,c)}

1. 背景

筋力トレーニングが体力の向上に寄与することは広く知られている。例えば、アメリカ疾病予防管理センターは週に 150 分以上の有酸素運動と週に 2 回の筋力トレーニングを推奨している [1]。また、筋力トレーニングはサルコペニア^{*1}や腰痛の予防にも効果があり、体力向上のみならず健康増進の観点からも重要である。

しかしながら、以下に述べる 2 つの理由から筋力トレーニングの習慣化は難しい。まず、トレーニング理論に関する知識を持たない一般のユーザが効果的な筋力トレーニングを行うことは難しい。筋力トレーニングの効果を大きくするためには、自身の能力や目標に応じた負荷設定を行う

ための知識が要求される [2] からである。更に、従来の筋力トレーニングは単純な反復運動のみから構成されているため、ユーザが動機を失いやすい。

そこで本研究では筋力トレーニングの習慣化を支援するために、トレーニング中に負荷が変化したかのような知覚

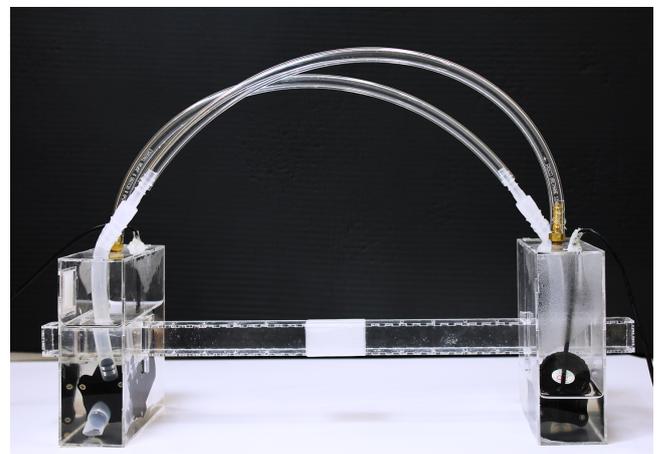


図 1: 本研究で製作したダンベル型デバイスのプロトタイプ。
Fig. 1 Our current dumbbell-like prototype device.

¹ 東京大学 大学院工学系研究科
Interactive Intelligent Systems Laboratory,
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

a) arizono@iis-lab.org

b) hashizume@iis-lab.org

c) koji@iis-lab.org

*1 サルコペニアとは、筋肉量や身体能力の低下を特徴とする症候群である。

を与えられる適応的な負荷制御システムを提案する。このシステムにより、従来の筋力トレーニングに負荷の変更という刺激が加わり、ユーザが動機を維持しやすくなると考えられる。このようなシステムの一例として、図 1 に示す重心移動が可能なダンベルを製作した。このダンベルは水の入ったアクリル箱をウェイトプレート*2として用いており、ポンプによって内部の水を一方から他方へ移動させることで重心を移動させる。これにより、ダンベルの総重量を変化させずとも負荷が変化したかのような知覚を与えられる。

重心移動が可能なダンベルがユーザに与える負荷感覚の知覚特性を知るために実験を行った。この実験では、ユーザが知覚できる最小の負荷感覚の差を求めた。本稿では、上述の重心移動デバイスと、その知覚特性を調査するための実験の結果について報告する。

2. 関連研究

2.1 運動の支援に関する研究

運動は健康の増進に寄与することから、HCI においては運動を支援する研究が広く行われてきた。このような研究は大きく次のように分類することができる。

- (1) ユーザの運動をトラッキングする手法についての研究
 - (2) ユーザの運動を補助するためのフィードバックの研究
 - (3) インタラクティブな運動ゲームの開発 (以下 exergame)
- これら各区分の研究を紹介した後、筋力トレーニングの支援に関する研究と比較する。

ユーザのランニングをトラッキングするために、Hao らはユーザのランニングペースを測定するシステムである RunBuddy [3] を製作した。スマートフォンのセンサから取得された加速度データと、マイクから取得された呼吸音のデータを用いてランニングのペースを測定している。このシステムを用いることで、ユーザはペースを保ちながら長時間のランニングが可能になる。

Khot らが製作した TastyBeats [4] はユーザの運動強度をスポーツドリンクの味として提示し、フィードバックを与えるシステムである。ユーザが運動をしている間、このシステムはコップにスポーツドリンクを注いでいく。このとき、ユーザの心拍数が高いほど味が濃く電解質が多く含まれているドリンクが注がれる。このシステムにより、ユーザは自分の運動量を自覚することで運動に対する動機を維持できた他、各自の運動により作られたドリンクを互いに交換するなどの社会的な動機づけにも成功した。Kosmalla らはウォールクライミング中のユーザに最も適したフィードバック手法を調査するための研究を行った [5]。この研究では音によるフィードバックが最も適した手法であり、次に振動によるフィードバックが好ましいと報告している。

Choi らの製作した SwimTrain [6] は公共のプールにおける水泳を補助するための exergame である。公共のプールにおいては様々な技術レベルのユーザが同じレーンで泳ぐことになる。したがって、衝突や混雑を避けスムーズな水泳を実施するためにはユーザ間の協調動作が重要である。この研究では衝突や混雑の回避をゲームの目的として組み込むために、ユーザを電車に模したゲームを製作した。ユーザは音声による指示に従って泳いで、電車の安全な運行を目指す。ゲームの目的達成のためにユーザは泳ぐ速度を調整し、衝突することなく同一レーンを使用できるようになる。この研究はあるスポーツ特有の問題点を exergame によって解決した例である。

2.2 筋力トレーニングの支援に関する研究

筋力トレーニングを支援するための研究も、運動の支援に関する研究と同様に、大きく 3 つに分類できる。(1) のトラッキング手法についての研究は盛んに行われてきたものの、(2) のフィードバックや (3) の運動ゲームの開発に関する研究はトラッキング手法に比べると数は少ない。また、フィードバックの知覚特性や動機維持の効果について詳細な調査がなされているとは言えないという問題がある。

トラッキング手法の研究として、Chang らはユーザが装着した加速度センサのデータを用いて、ユーザの行った筋力トレーニングの種目とその反復回数を判別するシステムを作製した [7]。トレーニング種目の識別には隠れマルコフモデルを用い、反復回数の数え上げには頂点検知を用いた。Muehlbauer らは Chang ら同様に加速度センサを用いた筋力トレーニング判別システムについて研究した [8]。この研究ではユーザが腕に装着したスマートフォンをセンサとして利用しており、種目の識別と反復回数の数え上げだけでなく、ユーザが運動しているかどうかの区別も可能である。Morris らの製作した RecoFit は腕に装着した加速度センサを用いて筋力トレーニング種目の識別、反復回数の数え上げ、および運動しているか否かの識別を実時間でを行うシステムである [9]。

Velloso らはユーザの筋力トレーニングに関する技能を評価し、画面に表示するシステムを作製した [10]。実時間でのフィードバックを実現するためにこの研究ではユーザの動きを肩の角度、肘の開き具合などの小さな部分に分割して評価している。Ding らの FEMO もユーザの技能を評価して画面に表示するシステムである [11]。このシステムはトレーニング器具に着けた RFID タグを利用して測定した動きの滑らかさや休憩の間隔を評価の指標として用いている。

2.3 インタラクティブ技術に関する研究

筋力トレーニングを支援するためにユーザに対して物理的なフィードバックを与える研究や、exergame を開発する

*2 重量調整のためにダンベルの両側に装着する板を指す。

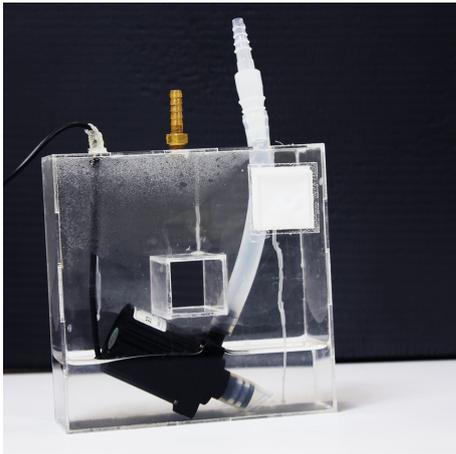


図 2: ダンベル型デバイスのウェイトプレート部。

Fig. 2 A weight plate component of the current prototype.

研究はあまり行われてきていない。筋力トレーニングを指向した exergame のために、ユーザとのインタラクション手法を考える必要がある。筋力トレーニングにおいては、負荷の調整が運動能力の効率的な向上や怪我の防止の上で重要な要素になるため [2], トレーニングの負荷に関するインタラクションを実現する必要がある。

Niiyama らは液体金属と空気の移動によって総重量と体積を制御できるデバイスを製作した [12]。このデバイスはガリウムインジウムスズ合金をゴムのうに出し入れて総重量を制御する。多くのトレーニング器具はその重量を変化させて負荷を調整しているため、総重量が変化するトレーニング器具を製作することで負荷の変更が実現出来る。Hammert らは重りを移動させて重心を制御できるモバイルデバイスを製作した [13]。筋力トレーニングにおいては器具のバランスを取ることも筋力を要するため、重心の移動によっても負荷を変更できると考えられる。

3. 重心移動が可能なダンベル型デバイス

本研究では、総重量を変化させずに負荷が変化したような知覚を与えるデバイスの製作を目指す。総重量を変化させるためには外部の貯水タンクとの接続が必要になるが、デバイスと貯水タンクとの接続に用いるチューブはユーザの自由な運動を妨げるからだ。そこで、重心の移動によって負荷が変化したような知覚を与えるダンベル型デバイスを製作した。

厚さ 2mm アクリル板を用いて製作したダンベル型デバイスの写真を図 1 に示す。左右のウェイトプレート間での水の移動により、重心を移動させることができる。Hammert ら [13] はデバイス内部の重りを移動させることで重心を制御していたが、本研究では液体の移動を用いる Niiyama らの手法 [12] を応用した。Hammert らの手法では内部のハードウェアが複雑になり、ダンベル全体の重量が増加してしまうため、重心の移動範囲が小さくなる

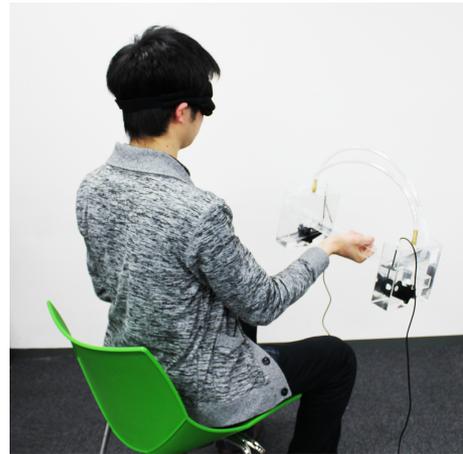


図 3: 実験時の様子。目隠しをし、着座している。

Fig. 3 In our experiment, participants were required to wear an eye mask and sit on a chair.

からである。ダンベル全体の重量は約 1800g であり、うち 900g は重心移動に用いる水の質量である。ウェイトプレート間の距離は 31cm である。

ウェイトプレートの内部寸法は、縦 150mm、横 150mm、奥行き 50mm である。市販のダンベルシャフトも装着できるように、中心には縦 30mm、横 30mm の孔が開けてある。ウェイトプレートの底面には水を移動させるためのポンプを設置した。ポンプは VOYVO Technology の DC40-2470 を利用した。また、ウェイトプレート内の気圧変化による水の逆流を防ぐために、PTFE フィルタをエアメントとして利用した。このポンプは約 20 秒で一方のウェイトプレート一杯の水を他方のウェイトプレートにほぼ全て移動させられる。

4. デバイスによる負荷の知覚に関する実験

4.1 実験方法

本章では、重心の移動によって発生する負荷の知覚に関する実験について述べる。実験参加者が持っているデバイスの重心を移動させ、負荷の変化を感じたときに報告してもらった。実験参加者は 3 人で、全員が 20 から 25 歳で右利きの健康な男性である。この実験の目的はデバイスが与える負荷感覚の just noticeable difference (JND) の測定である。デバイスが生じる力のモーメントを負荷感覚の目安とし、実験参加者が負荷の変化を感じるまでに左右のウェイトプレートの重量がどれだけ変化したかを測定する。

以下に具体的な実験の手順について述べる。

- (1) 実験者がデバイスのウェイトプレートの重量を調整する。
- (2) 参加者はダンベルを持つ。
- (3) 参加者は肘を直角に曲げたまま維持するか、あるいはダンベルを上下させる。
- (4) 実験者が無作為なタイミングでポンプを起動させる。

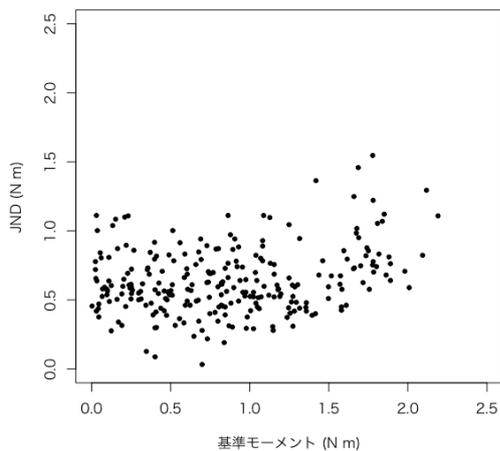


図 4: 基準モーメントの絶対値と、JND と基準モーメントの絶対値の比に関する散布図。

Fig. 4 A scatter plot of the absolute values of moment and JND.

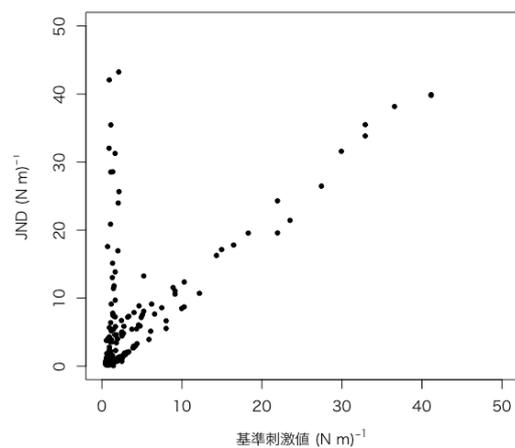


図 5: モーメントの逆数の絶対値と、その JND の絶対値に関する散布図。

Fig. 5 A scatter plot of the absolute values of reciprocal moment and JND.

- (5) 参加者は負荷の変化を感じたら報告する。
 - (6) 実験者は報告があればポンプを停止し、ウェイトプレートの重量を測定する。
- この測定を複数回繰り返した。

図 3 のように、実験参加者には着座した上で目隠しを着用してもらった。これはウェイトプレート内の水の量の視認によって重心移動による負荷の知覚が影響されるのを防ぐためである。また、今回の実験では実験参加者にはデバイスを手の甲が下になるように同じように持ってもらった。

4.2 結果

ポンプ起動時にデバイスが与えていた力のモーメントを M_s とし、基準モーメントと呼ぶこととする、このとき、実験参加者が負荷の変化を感じた時にデバイスが与えていた力のモーメントを M_e として、JND は $M_e - M_s$ となる。図 4 は本実験で測定された基準モーメントと基準モーメントに対する JND をプロットした散布図である。基準モーメントと JND の比はともに絶対値を取った。

次に、実験参加者が知覚する刺激をモーメントの逆数で表す。 $\frac{1}{M_s}$ を基準刺激値と呼ぶこととし、JND を $\frac{1}{M_e} - \frac{1}{M_s}$ とする。図 5 は基準刺激値とそれに対する JND をプロットしたグラフである。図 4 同様、どちらも絶対値を取った。

4.3 考察

心理物理学における重要な法則の 1 つに、ウェーバーの法則がある。これはある刺激の知覚できる最小の刺激差が基準となる刺激の強度に比例するという法則である [14]。JND が基準刺激に比例して増大するならば、その刺激においてはウェーバーの法則が成り立っていると言える。

基準モーメントと JND の比例関係について考察をする

ために線形回帰を行った結果を図 6 に示す。この直線に対する決定係数 R^2 は .0649 であり、基準モーメントと JND に明確な比例関係があるとは言えない。したがって、モーメントに関する実験参加者の知覚についてウェーバーの法則は成り立たないことがわかった。

次に、モーメントの逆数によって表される刺激値と JND との比例関係について考察をするため、閾値を $0 (N m)^{-1}$ から $0.1 (N m)^{-1}$ 刻みで増加させながら、基準刺激値がその閾値以上であるデータに対して線形回帰を行った。その結果、閾値が $2.2 (N m)^{-1}$ から $2.3 (N m)^{-1}$ になるときに、決定係数 R^2 が .482 から .997 に増加し、以降は決定係数が安定的になることがわかった。閾値を $2.3 (N m)^{-1}$ にした時の回帰式は以下の通りである。

$$y = 0.992x + 0.599 \quad (1)$$

$2.2 (N m)^{-1}$ 未満のデータを赤色、 $2.2 (N m)^{-1}$ 以上のデータを青色でプロットし、回帰した直線を引いた散布図が図 7 である。このことから、刺激値が $2.3 (N m)^{-1}$ 以上の範囲においては、モーメントの逆数に関する実験参加者の知覚についてウェーバーの法則が成り立つことがわかった。ウェーバーの法則に従っている範囲では、デバイスが与える負荷に対するユーザの知覚をある程度予測することができる。これを利用して、ユーザが気づかない内に負荷を大きくしたり、最小限の重心移動で動機づけのための刺激を与えたりできると考えられる。

次に、ウェーバーの法則に従っていないデータについて考察するため、データを (1) 刺激が減少する時、(2) 刺激が増大する時の 2 つに分けた。(1) を青点、(2) を赤点でプロットした散布図が図 8 である。式 1 で表される回帰直線を引いている。式 1 のモデルを用いた予測値と実際のデータと

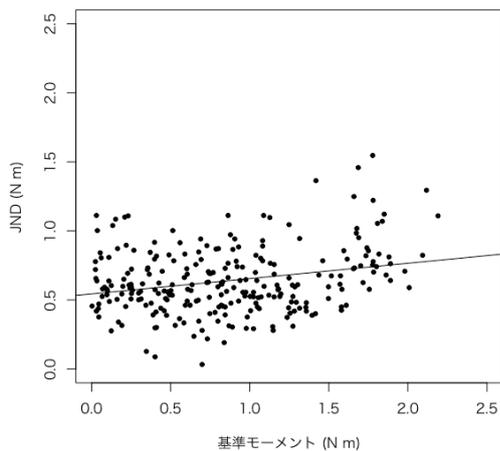


図 6: モーメントの知覚について、線形回帰を行った結果。
Fig. 6 A linear regression result on JND against moment values.

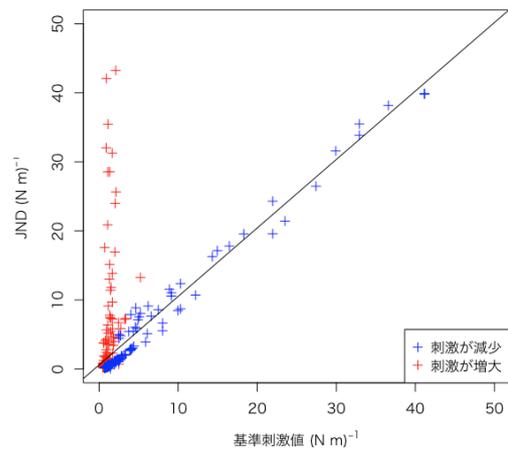


図 8: 刺激値が減少する時のデータと刺激値が増大する時のデータを分けた散布図。
Fig. 8 A scatter plot showing the differences between increase (red) and decrease (blue) of the reciprocal moment.

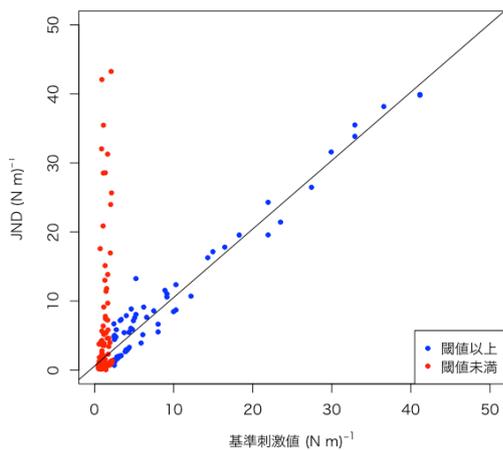


図 7: モーメントの逆数の知覚について、線形回帰を行った結果。青色のデータに関して線形回帰を行った。モーメントの逆数の値が 2.3 以上のときのデータを青色でプロットした。
Fig. 7 A linear regression result using only the blue points on JND against reciprocal moment values. The blue points represent data above the threshold of 2.3 for the reciprocal moment values.

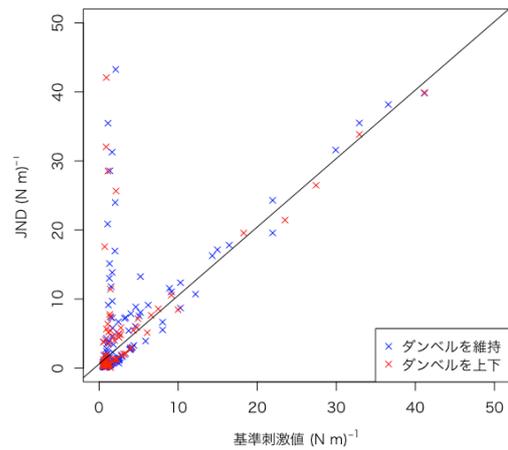


図 9: ダンベルを維持している時のデータと上下させている時のデータについて線形回帰を行った結果。
Fig. 9 Linear regression results between the two conditions of holding the device still and moving up and down.

のピアソンの相関係数は、(1) のデータで $0.661 (p < .05)$ 、(2) のデータで $0.998 (p < .001)$ であった。相関係数の違いにより、2つのデータでモーメントの逆数が減少する時と増大する時とでは、その刺激に関する知覚感覚が異なることがわかった。

図 9 はダンベルをその場で維持した時のデータを青点、ダンベルを上下させた時のデータを赤点でプロットしたものである。直線は式 1 で表される。式 1 を用いた予測値と実際のデータとのピアソンの相関係数は、その場で維持し

た時のデータで 0.971 、上下させた時のデータで 0.999 であり、 p 値はどちらも $.001$ 未満であった。今回の実験においては、維持した時と上下させた時とで明らかな違いは確認できなかった。

5. 結論と今後の展望

本稿では、液体を用いた重心の移動が可能なデバイスを作製し、そのデバイスがユーザに与える負荷感覚について調査をした。この実験により、次の知見が得られた。

- (1) 基準刺激値が $2.3 (Nm)^{-1}$ よりも大きい範囲において、モーメントの逆数に関する知覚はウェーバーの法則に従う。

(2) モーメントの逆数に関する知覚の感度は、刺激値が減少する時と増大するときとで異なる。

(3) モーメントの逆数に関する知覚について、運動中であるか否かによる明らかな違いは確認できない。

今後は今回得られた知覚特性に関する知見を深めるべく追加の実験を行い、重心移動を用いて実現できる exergame の領域を議論する。それから exergame を製作し、その exergame の使用感やモチベーション維持への貢献についてユーザスタディを行う。

追加実験では考察の節で述べたウェーバーの法則が成り立たない範囲とその原因についてより詳しく調査をする必要がある。デバイス側でコントロールできる要因によって知覚特性が変化するのであれば、それを exergame に利用することも可能であると考えられる。また、exergame のデザインによっては、プレイ中にユーザが行う動作について同様の知覚実験を行う必要がある。exergame のデザインとして、ダンベルを棒のように振るという動作を利用する可能性がある。したがって、デバイスの持ち方を今回の実験とは異なる状態にして、同様の知覚実験を行う予定である。

製作する exergame を用いたユーザスタディでは、ユーザの動機を維持する効果の他に、ユーザがゲーム中に感じた負荷と実際の負荷の関係についても調査をする予定である。このユーザスタディの結果から、製作する exergame が筋力トレーニングの支援としてどれほど有用なのかを検証する。

謝辞

多忙な中、実験に協力して下さった実験参加者の方々に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Centers for Disease Control and Prevention: How much physical activity do adults need?, <http://www.cdc.gov/physicalactivity/basics/adults/> (accessed 2016-12-26).
- [2] Kraemer, W. J. and Ratamess, N. A.: Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription, *Medicine and science in sports and exercise*, Vol. 36, No. 4, pp. 674-688 (2004).
- [3] Hao, T., Xing, G. and Zhou, G.: RunBuddy: A Smartphone System for Running Rhythm Monitoring, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '15*, New York, NY, USA, ACM, pp. 133-144 (2015).
- [4] Khot, R. A., Lee, J., Aggarwal, D., Hjorth, L. and Mueller, F. F.: TastyBeats: Designing Palatable Representations of Physical Activity, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '15*, New York, NY, USA, ACM, pp. 2933-2942 (2015).
- [5] Kosmalla, F., Wiehr, F., Daiber, F., Krüger, A. and Löchtefeld, M.: ClimbAware: Investigating Perception and Acceptance of Wearables in Rock Climbing, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 1097-1108 (2016).
- [6] Choi, W., Oh, J., Edge, D., Kim, J. and Lee, U.: SwimTrain: Exploring Exergame Design for Group Fitness Swimming, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, New York, NY, USA, ACM, pp. 1692-1704 (2016).
- [7] Chang, K.-H., Chen, M. Y. and Canny, J.: Tracking Free-weight Exercises, *Proceedings of the 9th International Conference on Ubiquitous Computing, UbiComp '07*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 19-37 (2007).
- [8] Muehlbauer, M., Bahle, G. and Lukowicz, P.: What Can an Arm Holster Worn Smart Phone Do for Activity Recognition?, *2011 15th Annual International Symposium on Wearable Computers*, pp. 79-82 (2011).
- [9] Morris, D., Saponas, T. S., Guillory, A. and Kelner, I.: RecoFit: Using a Wearable Sensor to Find, Recognize, and Count Repetitive Exercises, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '14*, New York, NY, USA, ACM, pp. 3225-3234 (2014).
- [10] Velloso, E., Bulling, A., Gellersen, H., Ugulino, W. and Fuks, H.: Qualitative Activity Recognition of Weight Lifting Exercises, *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference, AH '13*, New York, NY, USA, ACM, pp. 116-123 (2013).
- [11] Ding, H., Shangguan, L., Yang, Z., Han, J., Zhou, Z., Yang, P., Xi, W. and Zhao, J.: FEMO: A Platform for Free-weight Exercise Monitoring with RFIDs, *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '15*, New York, NY, USA, ACM, pp. 141-154 (2015).
- [12] Niiyama, R., Yao, L. and Ishii, H.: Weight and Volume Changing Device with Liquid Metal Transfer, *Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction, TEI '14*, New York, NY, USA, ACM, pp. 49-52 (2013).
- [13] Hemmert, F., Hamann, S., Löwe, M., Zeipelt, J. and Joost, G.: Weight-shifting Mobiles: Two-dimensional Gravitational Displays in Mobile Phones, *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '10*, New York, NY, USA, ACM, pp. 3087-3092 (2010).
- [14] Laming, D.: Weber's law, *Sensory analysis. Academic Press, London*, pp. 1-17 (1986).

正誤表

本稿において見つかった誤植について、以下に記載いたします。
著者の不注意を深くお詫び申し上げます。

有菌 拓也

訂正箇所	誤	正
本文中に登場する全ての語句	JND	刺激変化量
4ページ 図4 キャプション	JNDと基準モーメントの絶対値の比	刺激変化量の絶対値
4ページ右段4行目	ウェーバーの法則	明確なモデル
4ページ右段19行目	ウェーバーの法則	線形的な関係性
5ページ左段1行目	0.661 (p<.05)	0.998(p<.001)
5ページ左段2行目	0.998(p<.001)	0.661 (p<.05)
5ページ右段9行目	知覚はウェーバーの法則に従う	刺激変化量は線形的に 増大する