

小型モータデバイスを用いた新スポーツの開発と運動特性の解明

佐藤綱祐

筑波大学グローバル教育院エンパワーメント情報学プログラム

Abstract: In this study, we propose a novel concept of "sense of locomotion based on an innate human capacity", that extends the sense of locomotion by moving through the body motion that is different from the walking motion. Ordinary vehicles, such as cars and motorcycles, are convenient, and provide joy of ride. However, users have to control high-powered output source which is exceeded human capacity. Therefore, they require special skills and give someone a lot of stress. Our device consists of a small motor-powered wheel, and a wagon. A user sits on the wagon and operates the wheel by using reins. The maximum speed of the device is limited under human walking speed. The user's eye level perspective also set within 70 cm from the ground. In spite of such low maximum speed, it can provide a sense of locomotion, exhilarating, and safety, by the effect of the user's low eye level perspective. We verified the expansion of the movement sensation and discussed about development of new sport with it.

1 緒言

2020年東京オリンピックパラリンピック競技大会の開催を契機として、一般の人の障害への理解がより一層深まることが期待されている。また同時に、障害者が身近に気軽にスポーツを楽しむことができる社会を実現していく必要がある。しかし現状においては、障害者スポーツの大会やイベントを実施している地域は一部に留まり、広く普及しているとは言い難い。それゆえ障害者のスポーツ実施率は非常に低い状況である。一方で高齢者に目を向けると、高齢者のスポーツ実施率は他の年齢層と比較して非常に高いことが明らかとなっている。しかしこれらはウォーキングやラジオ体操などの種目に留まっており[1]、スポーツ実施の選択肢が限定されていることが懸念されている。また60歳以下の健常者においては運動不足が社会問題となっており、肥満などの健康問題へと影響を及ぼしていると言われている。そこで本研究では、障害や年齢などの障壁を越えて誰もが楽しむことのできるスポーツを創造することより、皆が運動を楽しみ、定期的に行える社会を目指している。

著者はこれまでに小型モータデバイスを手綱で操作する、人機一体のスポーツ CarryOtto(Fig. 1)の開発を行っている[2][3][4]。これまでの体験会を通じて、若い健常者をはじめ、子供(最年少3歳)、高齢者(最高齢80歳)、車椅子使用者、知的障害者、視覚障害者などの方々が本スポーツを実施可能であることが明らかとなっている。今後、本スポーツを一般に広く普及させるためには、様々なダイバーシティに対応した競技可能性の追求と運動としての心身への影響や効果を検証する必要があるといえる。



Fig. 1 Overview of CarryOtto

そこで本研究は、本スポーツの競技可能参加者の間口をさらに広げるためにデバイスの開発、および本スポーツの運動特性を明らかにすることである。以降、2章でデバイスの開発、運動特性の計測について、3章で考察、4章でまとめと今後の展望について述べる。

2 研究方法

2.1 本スポーツについて

2.1.1 背景

近年、近距離移動を対象とした個人のための移動手段として、様々なパーソナルモビリティビークル(PMV: Personal Mobility Vehicle)が市販されている。これまで多様な形態のPMVの研究開発が行われているが、Segway(Segway Inc.)やWinglet(トヨタ自動車株式会社)に代表される平行二輪タイプの立ち乗り型PMVが特に注目を集めている。他の形態のPMVや自転車等と比較して、地面に対する占有面積が小さいこと、体重移動のみで速度や進行方向の変更ができること、手軽であることなどの特徴があり、今後社会へ広く普及すると考えられている[5]。一方で、立ち乗り型PMVは乗りこなすまでの上達時間を多く要することや、搭乗者の重心の位置が高いことにより、転倒時の事故・怪我の危険性が高いことが問題視されている。また、搭乗姿勢が立位姿勢に限定されていることで、身体が健康状態でない人、麻痺疾患、高齢者や子ども、車椅子利用者にとっては利用が困難である[6]。

そこで本研究では様々な身体状態の人が利用可能となるように搭乗姿勢を着座姿勢とし、従来のPMVと異なる身体動作による移動手段の確立を目的としている。これまでも座り乗り型PMVは、Marcus(産業技術総合研究所)やUNI-CUB(本田技研工業株式会社)、WHILL(WHILL株式会社)などが提案しているが、PMVにセンサを搭載して自律走行を行うタイプや、手先のコントローラ/ジョイスティックにより操作を行うタイプ、僅かな体重移動により操作を行うタイプなど、そのほとんどにおいて搭乗者の身体性が失われてしまっている。そのため移動手段としての利便性は高いものの、現代病として問題視されている運動不足による健康問題へと繋がると危惧

される。そこで本研究では、人間の身体性を保存したまま、その能力を PMV の制御に取り入れることにより、座り乗り型 PMV でありながらも身体性を支援することを目指している。

本研究では「ヒューマンスケールの移動」を新たに定義する。現代の移動手段は人間の能力をはるかに超えた性能を持つ動力源を使用したものがほとんどであり、長距離・長時間の移動を前提としているため人の負担を極力減らす方向に向かっている。これらは便利である反面、身体動作が減少し運動不足などへと繋がっているといえる。これに対して人間が生得的に持つ能力と同等程度の動力源を用いて、身体構造の特徴を考慮した移動手段(ヒューマンスケールの移動)を提供することにより、安全に身体動作を誘発することができる。また、従来の歩行動作とは異なる身体動作により走行することで移動感覚を拡張する。立ち乗り型 PMV と比較して、座り乗り型 PMV は搭乗者の視点が低いことで移動感・爽快感が十分に確保できる。さらに搭乗者の重心位置が低いことで安全性の向上にもつながる。

2.1.2 システム構成

これまでの PMV は動力を有するデバイスに人間が乗り込む形態がほとんどである。しかしこれらは乗り込む動力部に対して身体が拘束されるため、身体動作が制約される。また、動力部に対する身体動作の影響度が小さい。そこで本研究は動力部と搭乗部を分離することで、人間は搭乗部とのみ拘束され、動力部との拘束は疎になり身体動作の自由度が解放される。また人間と機械を手綱で連結することにより、走行のためのインタフェースとして全身の身体動作を必要とする PMV を提案する(Fig. 2(a))。本システムは動力部となるモータデバイス、人間が搭乗するキャリーデバイス、モータデバイスの速度を制御するコントローラから構成される(Fig. 2(b))。移動手段としての下肢からの入出力、手による物体操作、体感による頭部のバランス維持、以上の 3 つの身体的な役割を、ヒューマンスケールの動力を持つモータデバイス、手綱と速度コントローラ、キャリーデバイスでそれぞれ分担させることで全身運動を誘発させる。

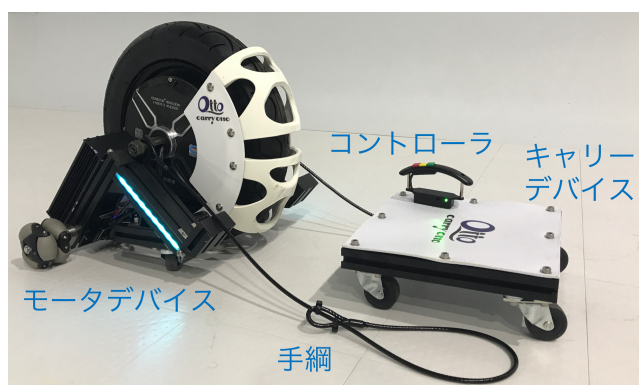


Fig. 2(a) System Configuration

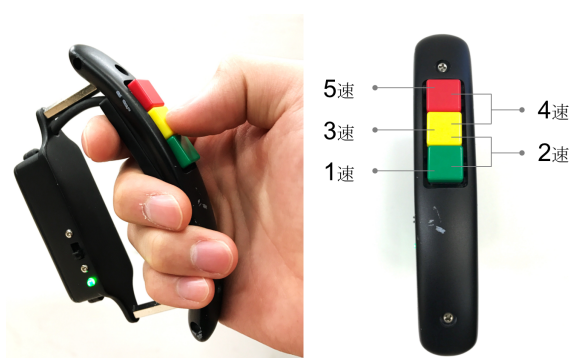


Fig. 2(b) Velocity Controller

2.1.3 モータデバイス

モータデバイスはバッテリー駆動可能なインホイールモータ(神戸電気自動車製, ブラシレス DC モータ, 600W, DC48V)を用いる. タイヤに関しては原付バイクのチューブレスタイヤ(直径 400mm)を流用してインホイールモータに取り付ける. 補助輪 4 輪支持によりタイヤが倒れないようにし, かつ鉛直軸周りに回転させることができる機構とする. フレーム重量などを含め, 総重量は 20kg となる. モータの最大回転速度とタイヤの直径から, 最大速度は 33km/h となる.

2.1.4 手綱インタフェース

モータデバイスのモータ軸の両端(軸の中心から 120mm の位置)に手綱(被覆付きワイヤ, 直径 6mm, 長さ 800mm)の片端を取り付ける. もう片端を搭乗者が把持しやすいように輪形状にし, ワイヤストッパにより搭乗者の身体のスケールに合わせて長さを調整可能とする.

2.1.5 速度コントローラ

モータの回転速度を制御するためのデバイスとして, ボタン式速度コントローラを用いる(Fig. 2(b)). 各 3 つのボタン単独押下と, ボタン間の 2 つ同時押下も含めて, 5 段階の変速が可能である. ボタンを押下している間, それに対応した回転速度でモータが回転し, 手を離すと速度 0 へ減速する. コントローラを把持する親指で, 1 速ボタンから押下しながら親指を前方へ滑らせて加速する. なお 1,2,3,4,5 速ボタンはそれぞれ 2,4,6,8,10km/h と対応する. 速度コントローラとモータデバイスの間は ZigBee ワイヤレスモジュールを用いて無線で通信を行う.

2.1.6 人間-機械インタラクション

搭乗者は鉛直軸周りに自由回転する 4 つのキャスタ付きのキャリーデバイスに着座する. なお, キャリーデバイスの 4 つのキャスタのうち, 後方二輪に対してはキャスタ角を 10 度傾けることで直進性を持たせる. 両足をモータデバイスにかけ, タイヤの両端に取り付けられた左右の手綱を引く動作と, 両足の屈曲/伸展運動により, モータデバイスの方向を制御することができる. また速度コントローラを用いて, 所定の速度となるよう制御する.

2.2 デバイスの開発

本研究ではこれまでの体験会を通じて, 様々な身体的多様性を持つ方々に走行体験を行ってもらい, その高い競技可能性を示している. 一方で走行困難なケースも多少観測されている. 1 つ目は車椅子使用者であり, 2 つ目は指先を思うように動かすことができない麻痺患者である. そこで以降, これら 2 つのケースに対応するために新しく開発したデバイスについて述べる.

2.2.1 全方位移動可能車椅子の開発

車椅子使用者の走行困難性について、通常的車椅子の走行自由度は前後・回旋方向となっており、左右方向の走行自由度を有していない。そのため本システムの走行時においてドリフト走行(横滑り走行)を行うことが困難であることがわかっている。これによりコーナ走行において思い通りの走行ができないとの意見が挙げられている。そこで前後・回旋方向の走行自由度に加えて、左右方向にも走行可能となる全方位移動可能車椅子を新たに設計・開発した。

従來の車椅子の後輪をメカナムホイールに置換し、メカナムホイールの特性を活用して前後・回旋・左右・斜め走行が行えるような仕様とした(Fig. 3)。本デバイスを用いた走行実験を行ったところ、車椅子使用者においても本競技に容易に参加できることが示された(Fig. 4)。

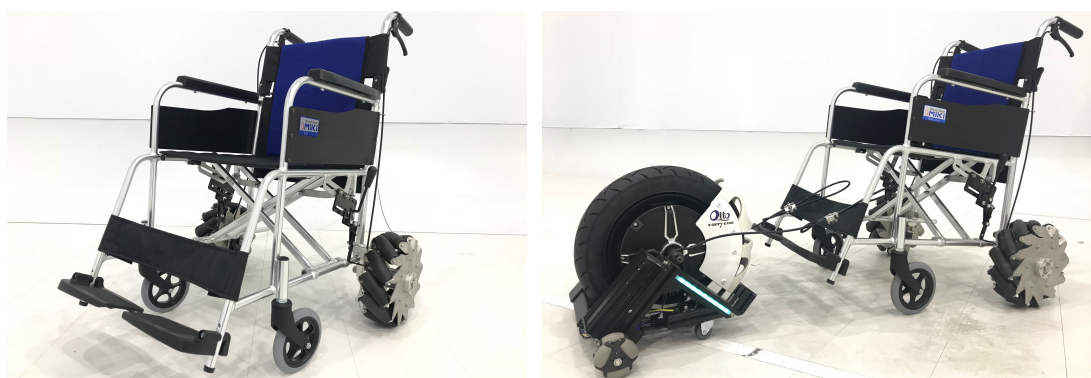


Fig. 3 Omnidirectional movable wheelchair



Fig. 4 State of running with the wheelchair

2.2.2 ハンズフリー速度コントローラの開発

麻痺患者の走行困難性について、従來の速度コントローラは指先の繊細な操作を要するため、指先を思うように動かすことが困難な方には走行をすることが困難であることがわかっている。そこで指先以外の動作を入力するインタフェースを新たに設計・開発した。

指先以外の入力動作をインタフェースとするにあたって、検討される身体部位として腕部、脚部、頭部が考えられるが、腕部は手綱インタフェースの操作に使用しており、また脚部は車椅子

使用者にとっては困難な動作となる。そこで本研究は頭部に着目し、頭部の動作をモータデバイスの制御に反映させるハンズフリーの速度コントローラとした。頭部動作の取得には JINS MEME(株式会社ジンズ)を用いる。JINS MEME はスマートフォンと連携し、3点式眼電位センサ、3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサを内蔵したウェアラブルメガネである。頭部のチルト軸(うなずき方向)の動作をリアルタイムで計測し、式(1)によってモータデバイスの速度 V_m を制御する。 θ_t は操作者の頭部のチルト軸角度、 ω はモータ加減速の定数、 α, β は閾値を表す。 α, β は最も操作しやすい角度を試行実験によって求めた。垂直上向きを 0[deg]とした時、 α はチルト軸前方 20[deg]、 β はチルト軸後方 5[deg]であった。

$$V_m += \begin{cases} \omega (\alpha < \theta_t) \\ 0 (\beta \leq \theta_t \leq \alpha) \\ -\omega (\theta_t < \beta) \end{cases} \quad \dots (1)$$

JINS MEME の計測値は BLE(Bluetooth Low Energy)により Android スマートフォンで取得することができる。そこで Android スマートフォンから本システムのモータデバイスを制御可能な回路を製作し、頭部動作をインタフェースとするシステムを開発した(Fig. 5)。本システムを用いることにより、指先を思うように動かすことができない麻痺疾患においても本競技に容易に参加できることが示された。

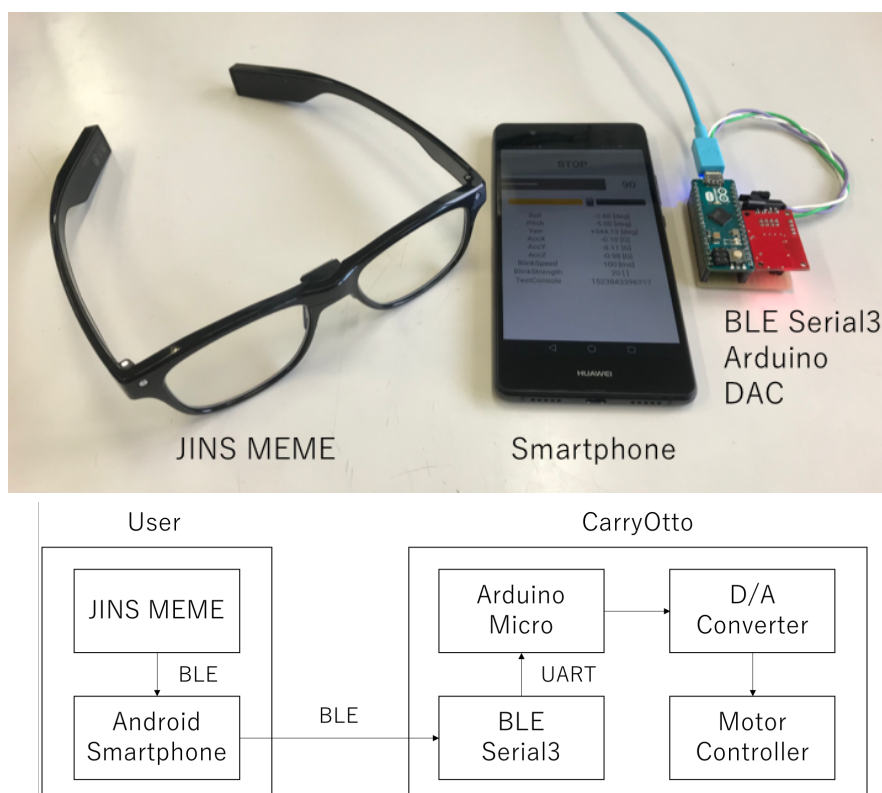


Fig. 5 Hands-free speed controller

2.3 運動特性の計測

2.3.1 筋電位活動の計測

本システムの走行における操作者の身体性を評価するため、走行中の操作者の筋電位活動の計測を行う。本研究における身体性とは、搭乗者の身体が拘束されずに全身の身体動作を有して走行を行える性質、と定義する。外的要因を受けないよう、屋内において6m離れた地点に2箇所のマーカを配置し、そのマーカを回る八の字走行を行うコースとした(Fig. 6)。本実験は、本システムの操作に慣れている健常な20歳代の男性1名を対象に行った。

全身の身体動作を把握するため、広背筋、三角筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋、尺速手根屈筋、橈側手根屈筋、大胸筋、腹直筋、脊柱起立筋、大腿四頭筋、大腿二頭筋、腓腹筋外側、腓腹筋内側の計13箇所(右半身のみ)の表面筋電位の計測を行った。なお表面筋電位の計測にはウェアラブル生体計測器(biosignals plux)を用いた。また比較検証のため、本システムの他、平行二輪タイプの立ち乗り型PMVであるHoverTrax(最高速度10km/h)および通常の歩行においても計測を行なった。各走行において、自然な流れでスタートできるよう複数回の周回を行なった後、Fig. 6中の開始/終了地点を通過したタイミングから再び通過するまでを1周とし、計5週の走行を行わせた。各走行の筋疲労が影響しないよう、各走行間には休憩時間を設けた。

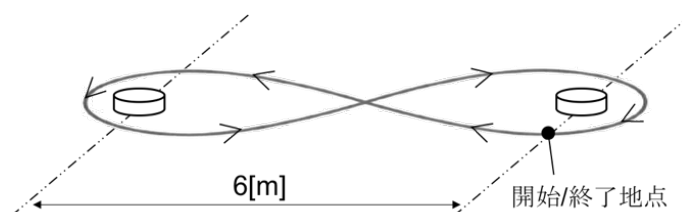


Fig. 6 Experimental course

本システム、HoverTrax、歩行の3手法において、それぞれ5周の時間正規化を行い、最大自発筋収縮に対する相対筋電位の平均を各部位に対して算出した(Fig. 7)。エラーバーは標準偏差を示す。また、各走行における1周の平均時間はそれぞれ15.3秒、12.1秒、15.7秒であった。HoverTraxの走行時間が短い理由としては、本システムと比較して加速度が高く、またブレーキの機能を有しているためである。Fig. 7より、HoverTraxや歩行において、上肢や体幹の筋活動がほとんど観測されなかった。またHoverTraxにおいては全身のほとんどの筋活動が観測されず、腓腹筋による体重移動のみで前後走行/回旋していることが見てとれる。5周を走行するのにかかる時間が最も短く、全身の筋活動が小さいことから、容易で楽な移動手段としての位置付けとなるが、継続使用した時のユーザの運動不足や筋力低下などの問題に対して懸念される。

一方、本システムは下肢だけでなく上肢や体幹も含め、全身が筋活動していることが見てとれる。また歩行時の腓腹筋のような分散が大きく特定箇所が強く活動することがな

いため、平均的に全身の筋肉を使って走行しているといえる。これより本システムは搭乗者の身体性を損なわず、全身運動を通じて走行制御を行なっているといえる。

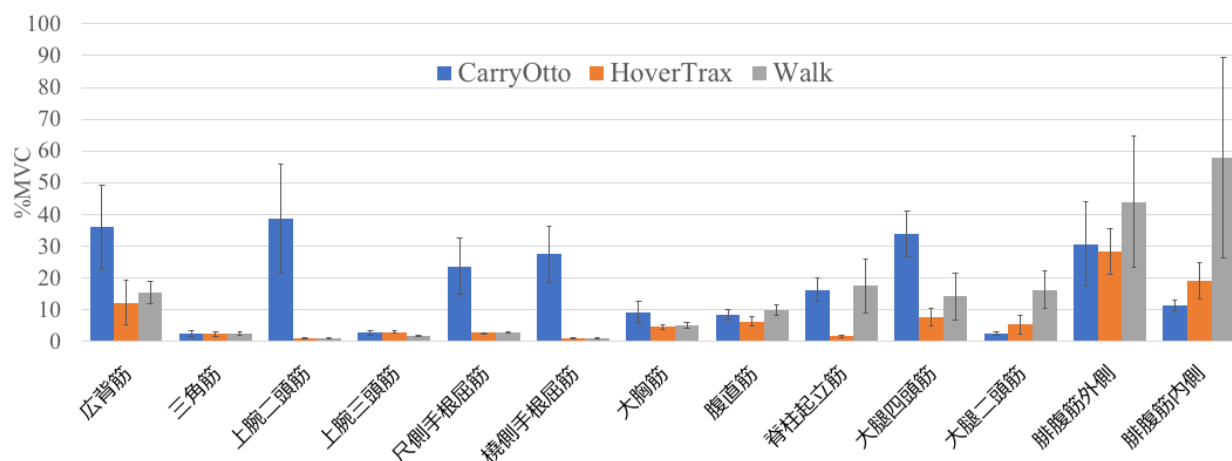


Fig. 7 Muscle Activity during CarryOtto(Blue), HoverTrax(Orange) and Walk(Gray)

2.3.2 心拍数の計測および主観評価

本章では、本システムによる操作者への心身への影響や効果の検証について述べる。本システムの走行における操作者の身体性を評価するため、走行中の操作者の心拍数変動の測定を行う。10m離れた地点に2箇所のマーカを配置し、そのマーカを回る八の字走行を行うコースを実験走行コースとした。本実験は健常な成人男性8名(21-26歳, 平均身長168cm)を対象に行った。被験者には胸部に心拍センサ(ユニオンツール株式会社製, WHS-2)を取り付け、走行中における心拍数変動の計測を行うことで、心拍数変動から運動強度の推定を行う。

被験者にはまず安静状態にさせ、心拍数が安定するまで楽な姿勢で待機させた。その後、本システムにより3分間八の字走行させた。その後再び心拍数が安定するまで楽な姿勢で待機させた後、今度は通常歩行により3分間八の字歩行させた。これにより本システムと通常歩行との心拍数変動の比較検証を行う。また実験終了後に下記9つの質問に対して主観評価を回答させた。

Table 1 Item of subjective evaluation

(1) 思い通りに進行方向を変えられた	(6) 体験後に汗をかいたように感じた
(2) 思い通りに速度を変えられた	(7) 運動(スポーツ)をしたと感じた
(3) 新しい乗り物に乗っている感覚を感じた	(8) もう一度体験したいと感じた
(4) 歩行より早く移動している感覚を感じた	(9) CarryOttoの運動強度に関して
(5) 体験の前後で体温が上がったように感じた	

(1)-(8)に関しては、1.非常に同意できない、2.同意できない、3.どちらともいえない、4.同意できる、5.非常に同意できる、の5段階で、(9)に関しては、1.非常に楽である、2.かなり楽である、3.楽である、4.ややきつい、5.きつい、6.かなりきつい、7.非常にきつい、の7段階で回答させた。

安静時、本システム走行時、通常歩行時における心拍数の平均値を Fig. 8(a)に示す。また安静時との差分の8人の平均は、本システムが8.3[回/分]増、歩行が11.2[回/分]増であった。本システム走行が歩行よりも心拍数が高い被験者、低い被験者とばらつきが表出したものの、本システム走行は通常歩行と同等程度の心拍数増加であり、運動強度としては日常における軽負荷であることが明らかとなった。

アンケートの(1),(2)から、被験者は思い通りに走行ができていることが Fig. 8(b)からわかる。また(4)に関して、本システムの走行速度は、実験時において通常歩行と同等速度を最大値としていたにも関わらず、歩行よりも早く走行しているように感じた結果となった。これは本システムの視点が低いことなどから、移動感覚が拡張されていることが示された。また心拍数増加の結果が(5)の結果を表しているといえる。一方で(6)の結果が否定的だったことから、実験の3分間だけでは汗をかく程度の運動ではなかったといえるため、今後はさらに長い時間走行した場合も検証を行う。(7),(8)から、運動(スポーツ)をしたと感じている被験者が多い。運動(スポーツ)後の心身への効果は、健康の増進や精神的充足、ストレス軽減など、多くのメリットが報告されている。(9)の結果が2.7 (SD=0.43)であったことから、本スポーツは運動強度が楽であると感じ、もう一度体験したいと感じている一方で、一定の運動効果が見込まれているため、今後のスポーツとしての普及が期待される。

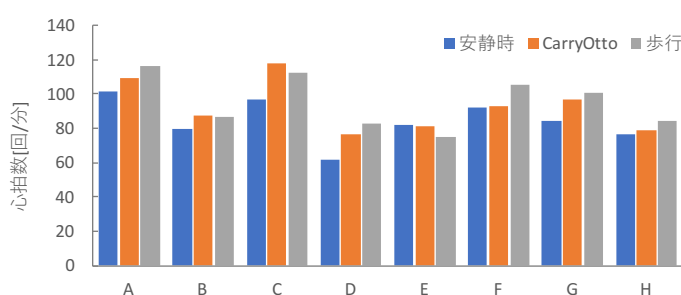


Fig. 8(a) Result of changes in heart rate

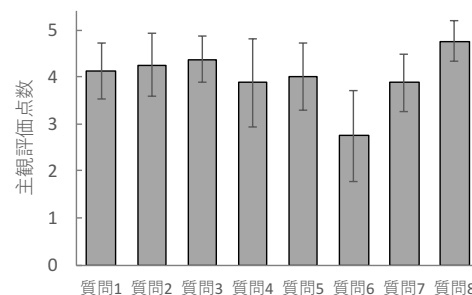


Fig. 8(b) Result of subjective evaluation

3 考察

本スポーツはこれまで様々な体験会を通じて、1500人以上の方々が走行体験した。3歳の子どもから80歳代のご年配の方、知的障害者や視覚障害者まで体験可能であることが明らかとなっている。本研究における全方位移動可能車椅子の開発とハンズフリー速度コントローラの新たな開発により、さらに本スポーツの参加の間口を広げ、競技可能性が向上したといえる。本報告

ではシステム開発論としての位置付けであるため、今後は詳細な操作性の評価を行なっていく必要がある。

2.3 章の運動特性の計測から、本スポーツの特徴として全身の身体活動の誘発および軽度の運動負荷であることがわかった。本実験は実験環境として 1 人走行による条件統制をとったが、競争競技として本スポーツを実施した場合、心拍数や主観評価が大きく変動することが考えられるため、今後は実践的な評価を行っていく必要がある。また本実験の実験対象者として若い年齢の健常者であったため、実験対象者を子どもや高齢者、障害者へと逐次展開していく。さらに、本報告では短期的な運動特性の計測にとどまっているため、中長期的な心身への効果についても検証していく必要がある[7][8]。

4 結言

本稿ではモータデバイスを用いた新しいスポーツを提案し、人間の身体と機械のインタラクションに関する議論を行なった。今回の実験から、本システムは全身の筋肉を使用して走行を行なっていることが明らかとなり、座り乗り型 PMV でありながら、移動における全身の身体性を支援しているといえる。また歩行時の腓腹筋のように特定筋箇所が瞬発的に強く活動することがなく、平均的に緩やかかつ適度な運動であることが観測されたため、健常者だけにとどまらず高齢者や車椅子使用者などの障害者における運動不足の解消に繋がると考えられる。

これまでの体験会から、年齢、性別、障害の有無を超えて本スポーツの参加が可能であることが明らかとなっている。そのため、各人の身体能力の差に関わらず、誰もがほぼ同等のパフォーマンスで競技可能となる。これにより、本スポーツの創造を通じて、様々な人が同一フィールドで競技を同時に行うことで各人同士のインタラクションが誘発されることが期待される。現在の日本における現代病として問題視されている運動不足の解消にとどまらず、スポーツにおける発展を通じて交流の場の創造や障害の理解の場へと繋がることが期待される。

5 参考文献

- [1] スポーツ庁, “スポーツの実施状況等に関する世論調査 (平成 28 年 11 月調査)”, 2018 年 4 月 16 日参照
- [2] 佐藤綱祐, 上林功, 小野田圭祐, 片桐祥太, 矢野博明, 岩田洋夫, "CarryOtto: 人と機械が一体化した移動デバイスの開発", インタラクション 2017
- [3] 佐藤綱祐, 上林功, 片桐祥太, 矢野博明, 岩田洋夫, "小型モータデバイスを用いた新スポーツの開発と運動特性", 第 18 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, Dec.20-22, 2017.
- [4] Ryoichi Ando, Mai Orikasa, Minato Takeda, Hirohiko Hayakawa, Kosuke Sato, Isao Uebayashi, Kouta Minamizawa and Masahiko Inami, "Superhuman Sports Games in

- Laval Virtual”, Laval Virtual ReVolution 2017, Vol.1, pp.60-68, 2018.
- [5] 西内裕晶, 塩見康博, “乗車経験に着目したセグウェイの走行挙動特性に関する基礎研究”, 土木学会論文集, Vol.68, No.5, pp.917-927, 2012.
- [6] Hashimoto Naohisa, et al. "An experimental study on changes of muscle fatigue among traveling by standingtype mobile vehicles and walking" 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2012
- [7] 蓑内豊, “運動に対する主観評価と感情変化の関係”, 大学体育学, Vol.6, pp.13-22, 2009
- [8] 山越健弘, 山越康弘, 松村健太, 廣瀬元, “モータスポーツ時の生体情報反応-レーシングカート走行による基礎的検討-”, 生体医工学, Vol.47, No.2, pp.154-165, 2009.