

## 心拍を用いた自律移動型車椅子と搭乗者の同調手法の検討

A Study of Entrainment Method between Autonomous Wheelchair and User by Heartbeat

嶋野 太一 \*<sup>1</sup> 篠沢 一彦 \*<sup>2\*3</sup> 今井 倫太 \*<sup>1</sup>  
 Taichi Sono Kazuhiko Shinozawa Michita Imai

\*<sup>1</sup>慶應義塾大学理工学部情報工学科 \*<sup>2</sup>大阪教育大学  
 Dept. of Information and Computer Science, Keio Univ. Osaka Kyoiku University

\*<sup>3</sup>ATR 知能ロボティクス研究所

Intelligent Robotics and Communication Laboratories, Advanced Telecommunications Research Institute International

Humans react to their surroundings based on their evaluation of the environment sensed by their five physical senses. We refer to this as the recognition-evaluation-action (REA) cycle. On another front, autonomous personal vehicles base their evaluation of the surrounding environment on information obtained through their sensors. This cycle is called the action cycle. In this study, we aim to identify an entrainment method between humans' REA cycle and autonomous personal vehicle action cycle, analyzing what occurs when these cycles correspond. We focus on entrainment between human environment evaluation and those of autonomous personal vehicles. We utilized the entrainment between human environmental evaluation and autonomous personal vehicle environmental evaluation as the method to associate heart rate with the action updating frequency. In addition, we conducted a study using our personal vehicle. In the results, autonomous personal vehicles can be operated according to their user's environmental evaluations.

## 1. 緒言

人間は、何らかの行動をしながら、五感によって周囲環境を認識し、状況の評価、行動を変化させる認識-評価-行動ループを持っている。一方、電動車椅子において、自律移動を考える場合、自身の移動によって変化した周囲環境について、取り付けられているセンサで状況を認識し、目標との誤差を評価、アクチュエータを制御するという過程で動作する。本論文では、この一連の周期的処理を動作ループと呼ぶ。認識-評価-行動ループと動作ループは、周囲状況の認識を行動に反映するという構成が非常に似通っているが、車椅子の搭乗者の認識-評価-行動ループと、自律移動型車椅子の動作ループは互いに独立であり、車椅子は、人の認知と無関係に制御される。自律移動型車椅子において、搭乗者の環境評価と、車椅子のセンサによる環境評価を同調させ、車椅子の行動生成を行うことで、搭乗者に適した挙動が発生する可能性がある。本研究では、人の環境評価と車椅子の環境評価を同調させることで、どのような適応的な挙動が発生するかを検証する。

本研究の目的である、人と車椅子の同調と、それによる適応的な挙動の検証を行うには、まず、車椅子の制御システムと、人間の環境評価を同調する手法が必要となる。人の環境評価は、無意識に行われていることが多い。無意識の環境評価による人間の状態変化の取得のため、生理指標を用いたシステムと人の同調が必要となる。また、車椅子における人への適応について使用可能な手法を検討する必要がある。以上の2点について、従来研究を挙げていく。

従来研究において、まず、脳波と心拍を用いて、人とシステムの同調を行った研究がある [7]。この研究では、人の脳波と心拍データから、リラックスしているかどうかを計測し、人が聞いている音楽の選択に計測結果を反映するという形で、生理指標

を用いた人とシステムの同調を実現している。また、車椅子における人への適応として、[4] では、人の重心移動によって、全方向に移動する電動車椅子の開発を行っている。この車椅子では、人の重心移動の癖を学習することで、個人に適応、全方向への移動を可能としている。また、[5] では、予め曲がり角などの環境で人が操作した軌跡を学習し、似た環境で、学習した軌跡を元にした自律移動を行う車椅子の開発を行っている。この研究では、人の快適な移動軌跡に対する適応的制御を行っている。

従来研究における未解決点を提示する。まず、[7] では、人のシステムの生理指標を用いた同調を行ってはいないものの、自律移動するようなシステムとの同調を行っているわけではなく、自律移動制御に用いた場合に何が起こるか不明である。[4] においても、人の重心移動に対する適応を行ってはいないが、人間が重心移動という形で行動した結果を評価しており、車椅子の制御システム自体は、環境評価を行っていない。[5] では、過去に軌跡を学習した時点での搭乗者の環境評価に同調しているものの、同時に同じ環境を評価しているわけではない。

本研究では、搭乗者の搭乗中の心拍を取得し、自律移動型車椅子の制御に反映することで人と車椅子の同調を試みる。車椅子は、ゴールの指定と、緊急時の停止以外には、自律移動を行う。搭乗中の心拍を車椅子の制御ループに反映させることで、搭乗者の搭乗中の内部状態の変化への同調が可能となる。

## 2. アプローチ

## 2.1 心拍変化と人間の内部状態

心拍の変化は、人間の緊張の度合いと対応し、人間は、緊張の度合いにより、周囲の環境への認知、対応力が変化する。具体的には、緊張度合いが高まると、周囲環境の変化に対する認識精度と対応速度が高まり、緊張度合いが低くなると、環境変化への認識精度と対応速度が低くなる。緊張度合いによる、人間の認知、対応力の変化は、認識-評価-行動ループにおいて、以下の要素への影響として記述できるといえる。

- 認識時点での周囲環境の情報取得量

連絡先: 嶋野太一, 慶應義塾大学理工学部情報工学科今井研究室, 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, 045-560-1070, sono@ailab.ics.keio.ac.jp

- 評価開始から行動に移すまでの時間

この2つの要素が、心拍の変化から読み取れていると仮定できる。よって、これらの要素の変化について、自律移動型車椅子の動作ループにおいて対応するパラメータを考える。

## 2.2 人間の内部状態の変化に対する車椅子での同調

前節で挙げた、人間の認識-評価-行動ループ上での緊張度によって変化する要素は、自律移動型車椅子における動作ループで以下のパラメータに対応する。

- センサによる周囲状況の取得精度
- センサ値の処理開始からアクチュエータへの出力までの時間 (動作の更新周波数)

故に、センサの精度や動作の変更周波数が、心拍の変化に対応し、変化するシステムを構築すべきである。本研究では評価開始から行動までの時間に対して、車椅子での同調を行う。自律移動型車椅子における動作ループでは、センサ値の処理から、アクチュエータの動作変更までの時間を変化させることで、搭乗者の緊張状態への同調を行うこととなる。動作ループにおいては、通常は、アクチュエータの動作変更は一定の周期によって行われている。よって、動作ループにおける、搭乗者の緊張状態への同調は、動作の変更周期の変更となる。本論文では、周期の逆数である周波数を基にして、同調方法を策定する。

## 2.3 パラメータ変更による挙動変化

本研究では、搭乗者の緊張状態への同調方法として、動作ループにおける動作の更新周波数を変更する手法を取る。動作ループの更新周波数を変更した際の、車椅子の挙動の変化を図1,2に示す。前提として、自律移動型車椅子は、どちらの図においても、通路、もしくは障害物からなるべく距離を取りながら進行するプランを持っている。図1,2において、赤線が動作ループの更新周波数が高い場合、青線が更新周波数が低い場合の車椅子の軌道である。

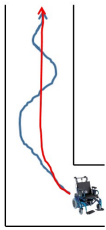


図 1: 直線における更新周波数による動作比較 [1]



図 2: 障害物出現時の更新周波数による動作比較

図1は、曲がり角の後の直線における軌道の差異である。図1において、更新周波数が高い場合は、曲がり角に入った際、すぐに動作が更新され、予定していた、通路の中心での直線軌道を取れている。対して、更新周波数が低い場合は、曲がり角に入った際、補正を繰り返すという処理が行われ、曲がり角から直線に入った後、蛇行する軌道を取る。

図2においては、通路を直進中に、通行人などの、想定していなかった障害物が現れたケースを比較している。更新周波数が高い場合は、障害物を認識してから、動作の更新が即座に起こるため、比較的安全的な間隔を取れた状態で、障害物を回避する。対して、更新周波数が低い場合は、障害物の認識から、動作の更新までに時間がかかるため、衝突寸前の状態での回避となる。

以上のように、動作ループの更新周波数の変化によって、自律移動型車椅子は、動作の補正や、突発的事態への対応力が変化することとなる。

## 2.4 問題設定

本研究では、搭乗者の心拍を利用して、自律移動型車椅子を制御することで、搭乗者の環境評価への同調が可能かを検証する。搭乗者の心拍に対しては、前述のとおり、動作ループの更新周波数を対応させることで、同調が可能であると考えられる。本研究では、搭乗者の心拍の諸パラメータ  $HR$  と、動作ループの更新周波数  $freq$  について、以下の式1による対応を考える。

$$freq = f(HR) \quad (1)$$

本研究では、式1中の関数  $f$  が、どのような関数であるときに、どのような同調効果が発生するかを検証する。式中の  $HR$  としては、心拍数を採用する。

## 3. システム構成

### 3.1 ハードウェア構成

図3に、自律移動型車椅子のハードウェア構成を示す。

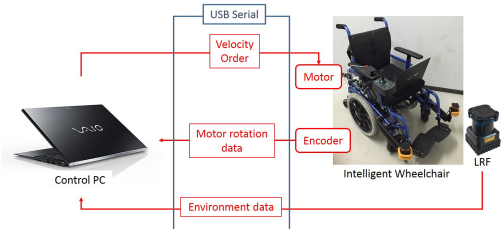


図 3: 自律移動型車椅子のハードウェア構成 [2][3]

### 3.2 ソフトウェア構成

本研究では、心拍と対応する、自律移動型車椅子のシステム内のパラメータとして、動作ループの更新周波数を想定している。

本研究では、自律移動型車椅子の動作ループの更新周波数としては、速度の指示に係る周波数 (以下、コントロール周波数) を採用する。

心拍データの利用を含んだシステム構成図は、図4のようになる。黒色で示された部分が、予め取得したマップ上において、現在位置から指定されたゴールまでを、障害物や壁をよけながら進行する、基本的な自律移動型車椅子のシステム構成で、赤色で示した部分が、心拍との同調を行うために追加されたモジュールである。モジュールの機能としては、Polar H7 心拍計から心拍データを受け取り、本研究で扱う心拍数のデータを、送られてきたパケットから抜き出し、設定された関数によって周波数を算出、更新周波数として適用するものとなっている。

### 3.3 心拍ループと動作ループ間の写像の決定

本研究では、搭乗者の心拍数に対応して、自律移動型車椅子の動作ループ内の、速度命令の変更周期に関わるコントロール周波数を変更する。本研究では、シグモイド関数に対して、調整用のパラメータを付与した以下の関数2を使用する。表1に、各定数パラメータの意味合いを示す。

$$freq = \frac{c - d}{1 + e^{-a(HR - HR_n - m)}} + d \quad (2)$$

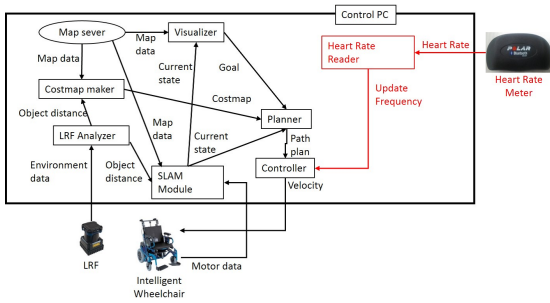


図 4: 心拍との同調を行う自律移動型車椅子のシステム構成

表 1: 関数パラメータの詳細

パラメータ	意味合い
$a$	心拍の変化に対する反応
$c$	周波数変動の上限
$d$	周波数変動の下限
$HR_n$	安静時に取得する基準心拍数
$m$	基準心拍数から閾値心拍数へのシフト

## 4. ケーススタディ

### 4.1 目的

本研究で行ったケーススタディの目的は、3.3 節で提示した関数によって、搭乗者の心拍と自律移動型車椅子の動作ループの更新周波数を対応させたとき、被験者の環境認識に同調した車椅子の挙動の変化が発生するかを検証することである。

### 4.2 条件設定

#### 4.2.1 被験者

ケーススタディにおいては、被験者として、20 代の 3 名の、自律移動型車椅子の搭乗の経験がない人を募った。

#### 4.2.2 環境設定

走行したコースは図 5 の通りである。図中の黄矢印は、進行方向を示している。



図 5: 実験マップ

上記のコースは、右折、左折、障害物の回避といった、動作の更新を必要とする箇所を含んでいる。動作の変更を必要とする箇所を含むことで、2.3 節で示したように、動作ループの更新周波数の高低による挙動の差が現れる。動作ループの更新周波数は、被験者の心拍数によって増減するため、上記のコースでは、被験者の心拍数の変化が、車椅子の挙動の差として表れやすいと考えられる。故に、ケーススタディの目的である、被験者の環

境認識に同調した車椅子の挙動の変化が発生するかどうかの検証が行える。

### 4.2.3 使用関数

ケーススタディでは、式 2 において、パラメータを  $a = 10, c = 10, d = 2.1, m = 3$  として、以下の式 3 を生成し、適用した。周波数変動の上限、下限となる  $c, d$  については、設定した値において、2.3 節で提示した。動作ループの更新周波数が高い場合と低い場合に対応する。

$$freq = \frac{7.9}{1 + e^{-10(HR - HR_n - 3)}} + 2.1 \quad (3)$$

また、本研究では、比較を行うために、 $a$  の符号を反転した関数 4 についてもシステムに適用し、検証を行う。

$$freq = \frac{7.9}{1 + e^{10(HR - HR_n - 3)}} + 2.1 \quad (4)$$

式 3 と式 4 について、心拍数の変化に対する周波数の変動をグラフによって示すと以下の図 6, 7 のようになる。グラフにおいて、縦軸が Hz 単位のコントロール周波数、横軸が基準心拍数と搭乗中の心拍値の差  $HR - HR_n$  である。

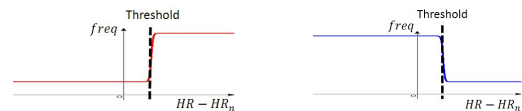


図 6: 式 3 における周波数の変化  
図 7: 式 4 における周波数の変化

図 6, 7 のように、式 3, 4 は、閾値心拍数を境に、周波数の値の大小が逆転している。4. で示す、本研究での今回の検討では、この 2 式について、心拍数の変化と自律移動型車椅子の挙動の変化が同調するかを確かめる。

また、今回の検討では、比較において参考とするため、心拍数によってコントロール周波数が変化せず、設定したパラメータによる周波数変動の上限と下限で一定となる以下の式を適用したケースも検証対象とした。

$$freq = 10(\text{Hz}) \quad (5)$$

$$freq = 2.1(\text{Hz}) \quad (6)$$

### 4.3 手順

ケーススタディは、以下の手順に従って行った。

1. 被験者の安静時の 10 秒間における平均の心拍数を取得し、基準心拍数とする。
2. 被験者を乗せた自律移動型車椅子を、基準心拍数と使用する関数を設定し、4.2.2 節で示した実験コースを走行させる。
3. 2 を、使用する関数を変更して 4 回繰り返す

関数は、式 3 → 式 4 → 式 5 → 式 6 の順序で使用した。



#### 4.4 結果

各被験者について、心拍の変化と、経路の対応を照合しながら、適応的な制御が発生したかを検証する。

被験者 A について、図 8 において、式 3 を適用した場合の軌跡と、その時の心拍の変化を、最初の通路の直線において照合した様子を示す。軌跡において、赤線部分が閾値心拍数以上の心拍数となっていた部分、青線部分が閾値心拍数以下の心拍数となっていた部分である。

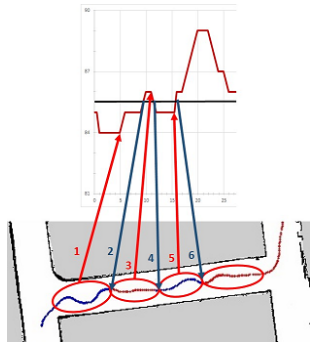


図 8: 被験者 A における式 3 適用時の軌跡の変化と心拍推移の対応

図 8 の 1 において、スタート直後、搭乗者の心拍数は閾値心拍数以下であった。式 3 では、閾値心拍数以下である場合、コントロール周波数は低い値となる。その結果、スタート直後に左折し、通路に入る際、直進への補正が遅れ、蛇行する軌跡となった。2 においては、1 で車椅子が蛇行した結果、搭乗者の緊張度が上昇し、心拍数も上昇し、閾値心拍数を超えた。結果、式 3 において、コントロール周波数が高い値に更新され、蛇行していた車椅子の挙動に迅速な補正がかかり、直線軌道となった。3 においては、2 で車椅子が直線軌道に入り、車椅子の挙動が安定したことにより、搭乗者の心拍数が低下し始めた。4 においては、3 で低下し始めた搭乗者の心拍数が、閾値心拍数を下回る、結果、コントロール周波数が低い値に更新されたため、直線中の微調整が間に合わず、再び蛇行し始めた。5 においては、4 で車椅子が蛇行し始めた結果、搭乗者の心拍数が上昇した。6 においては、5 で搭乗者の心拍数が上昇した結果、閾値心拍数を超えた。結果、コントロール周波数が 1 高い値となり、蛇行軌道に修正がかかり、安定した直線軌道となった。

以上の検証から、被験者 A において、式 3 を適用した場合においては、心拍数の変化と同調した車椅子の挙動が発生したといえる。

被験者 B, C については、心拍は変動したが、閾値心拍数以下での変動がほとんどである。そのため、心拍の変化に同調した挙動の変化が発生していない。心拍の変化に対して同調が出来なかった理由は、閾値心拍数が高すぎたためであると考えられる。

#### 5. 結論

本論文では、搭乗者の認識-評価-行動ループと、自律移動型車椅子の動作ループを同調させることによる、搭乗者への適応的な制御を行う手法の模索を行う。搭乗者の心拍の変化を車椅子の挙動に影響させることで、搭乗者の緊張状態を反映した制御手法を模索、検証した。心拍に対応させるパラメータとして、自律移動型車椅子における動作の更新の周波数である、コン

ロール周波数を選択し、両者をシグモイド関数で結ぶことで、どのような同調が発生するかを検証した。ケーススタディの結果、搭乗者の心拍の上下に応じて搭乗者の緊張状態に同調しているとみられる挙動の変更が発生した。より多く、同調したとみられる挙動の変更を発生させるためには、シグモイド関数を元にした関数において重要となる、基準値心拍数の決定方法の精査が必要となる。

#### 参考文献

- [1] Emc250. [http://www.imasengiken.co.jp/emc/emc\\_600\\_610.html](http://www.imasengiken.co.jp/emc/emc_600_610.html).
- [2] Utm-30lx. <http://en.manu-systems.com/UTM-30LX-EW.shtml>.
- [3] Vaio. <http://www.sony.jp/vaio/products/p2/>.
- [4] Wentao Guo, Songmin Jia, Tao Xu, and Xiuzhi Li. A new motion control method for omnidirectional intelligent wheelchair based on improved fuzzy support vector machine. In *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1567–1572. IEEE, 2015.
- [5] Komei Hasegawa, Seigo Furuya, Yusuke Kanai, and Michita Imai. Decores: Degree expressional command reproducing system for autonomous wheelchairs. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Human-Agent Interaction*, pp. 149–156. ACM, 2015.
- [6] Yoshinori Kuno, Yoshifumi Murakami, and Nobutaka Shimada. User and social interfaces by observing human faces for intelligent wheelchairs. In *Proceedings of the 2001 workshop on Perceptive user interfaces*, pp. 1–4. ACM, 2001.
- [7] Y. Maeda. Interactive sound generation for relaxation based on heartbeat and brain wave. In *Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2015 IEEE International Conference on*, pp. 1–6, Aug 2015.
- [8] E.B. Thorp, F. Abdollahi, D. Chen, A. Farshchiansadegh, Mei-Hua Lee, J.P. Pedersen, C. Pierella, E.J. Roth, I. Seanez-Gonzalez, and F.A. Mussa-Ivaldi. Upper body-based power wheelchair control interface for individuals with tetraplegia. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. PP, No. 99, pp. 1–1, 2015.
- [9] Atsushi Watanabe, Tetsushi Ikeda, Yoichi Morales, Kazuhiko Shinozawa, Takahiro Miyashita, and Norihiro Hagita. Communicating robotic navigational intentions. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5763–5769. IEEE, 2015.