

# 聴覚情報による引き込み効果を利用した ペダリングトレーニングシステムの設計と実装

奥川 遼<sup>1</sup> 村尾 和哉<sup>2,a)</sup> 寺田 努<sup>1,3,b)</sup> 塚本 昌彦<sup>1</sup>

**概要:** 近年、健康意識の高まりを背景に自転車を利用する人が増えており、特にスポーツとしての自転車の利用に対する関心は年々高まっている。サイクルスポーツにおいて高いパフォーマンスを発揮するには、競技用自転車特有のペダリングスキルが要求される。サイクルスポーツでは回転数が高くかつ回転速度の揺らぎが小さいペダリングが理想とされているが、メトロノームの音を用いた従来のトレーニング方法では単位時間あたりの回転数を一定にすることはできるが回転速度の揺らぎについては評価できない。サイクルスポーツ熟練者のペダリング技術は長時間のトレーニングによって形成されるため、初心者が一定で揺らぎが小さい回転速度でペダリングする技術を習得することは容易ではなく、イメージを共有しにくいため指導も困難とされている。そこで本研究では、聴覚情報による引き込み効果を利用して、ユーザーがペダリングの回転速度を一定にすることを意識することなく、半無意識的にペダリングを誘導することで、サイクルスポーツ初心者のペダリングスキルの上達を支援するシステムを設計および実装する。実装したシステムを用いて行った実験の結果、従来のケイデンス計で回転数のみを提示した場合と比較して回転速度の分散値が3つの提案手法でそれぞれ46.7%、68.6%、58.8%減少したことから、提案システムによって非サイクリストのペダリングスキルが向上することを確認した。

## 1. はじめに

近年、環境問題への対策や健康ブームの影響を受けて自転車の人気が高まっている。自転車の利用形態としては、通勤や通学、買い物など日常生活で使用する街乗りと、長距離ツーリングや旅行などの余暇活動、市民レースなどスポーツとしての利用がある。特に、健康意識の高まりとともにダイエット、リハビリテーションへの応用も進み、自転車のスポーツとしての利用が注目されている。2013年に10代以上の10,420名を対象として行われた自転車利用に関するインターネット調査[1]で、普段主に使っている自転車がロードレーサなどの競技用自転車と回答した人の割合は、2006年の調査時の2.8%から5.4%と増加しており、サイクルスポーツに対する関心が高まっていることが確認されている。しかし、サイクルスポーツに用いられる自転車は、街乗りで一般的に利用されているシティサイクルなどと比較して形状や乗車姿勢が異なっており、競技用自転車に適した特有のペダリングスキルが求められる。サイクルスポーツにはケイデンス（1分間当たりのペダル回転数）

が高く一定であるペダリングが適している[2][3]と報告されており、さらに身体的負担の観点からペダルの回転速度の分散が小さい必要がある[4]との研究がある。このようなペダリングスキルは長時間のトレーニングや長距離の走行による経験によって形成されるため、サイクルスポーツ初心者にとって習得は容易ではない。また、初心者と熟練者のペダリングの違いを指摘している先行研究[2][5]は多く存在するが、初心者のペダリングを改善する方法は提唱されていない。加えて、先行研究ではケイデンスに着目してさまざまな要素を検証しているが、回転速度の分散まで考慮している研究は少ない。

そこで本研究では、回転速度を用いてサイクルスポーツ初心者と熟練者のペダリング運動の違いを調査し、サイクルスポーツ初心者のペダリングスキルの上達を支援するシステムを提案する。自転車エルゴメータのクランクに加速度・角速度センサを取り付けて任意の点で回転速度を計測するシステムを実装し、回転速度の分散値からペダリングを評価する。また、ユーザーに聴覚情報の提示を行うことで回転速度の分散を小さくし、適切なペダリングに誘導するシステムを実装し、その有効性を検証する。

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科

<sup>2</sup> 立命館大学情報理工学部

<sup>3</sup> 科学技術振興機構さきがけ

a) murao@cs.ritsumeai.ac.jp

b) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

## 2. 関連研究

### 2.1 ペダリングの評価

自転車のペダリング運動の評価に関しては筋電位、ペダル踏力、酸素摂取量、クランク角度などの要素に着目した研究が行われている。サイクルスポーツ熟練者を対象とした高石の研究 [6] では、高速回転のペダリングに慣れたサイクリストは仕事率一定の条件の下でケイデンス 90~100[rpm] で力学的に優位であり、発揮する作業筋に対する効率が最大になると報告されている。また、Patterson らの研究 [7] でも、負荷量にかかわらず筋疲労蓄積を最小化できるケイデンスは 90~100[rpm] であると結論づけている。

Chapman らの研究 [5] では、サイクルスポーツ初心者と熟練者の筋活動パターンの違いは、筋疲労と疲労回復に大きく現れることを示している。星川 [2] は、ペダル踏力において熟練者と初心者の差が現れることを示し、熟練者はエネルギー消費の観点からは多少不利であってもペダル合力を最小とするケイデンスを好むことを明らかにしている。しかし、これらの研究ではケイデンスに着目して検証を行っているが、回転速度の分散までは考慮していない。北脇の研究 [4] では、サイクルスポーツにおいてペダリング一回転中の角速度の変動を小さくすることが望ましいと示しているが、具体的なトレーニング手法は提案していない。本研究では、ユーザのケイデンスが一定に保たれ、さらに回転速度の分散が小さいことをペダリングの評価指標として用いて、ペダリングを向上させるシステムを提案する。

### 2.2 ペダリングの支援

自転車のペダリングは周期的に繰り返される運動である。心理学の分野では、リズム知覚は音楽などすべての時間的事象の形態化において広くみられる心理現象 [8] であり、特に音楽心理学の分野では、身体運動とリズムの関係として以下のことが報告されている。

- リズムは人間の同期反応を誘発しやすい。
- リズムは力の消費を最小化調整する要素として身体活動を支配する。
- 音響リズムは運動リズムを引き起こし、運動リズムは音響リズムを引き起こす。

身体運動とリズムの関係は「引き込み効果」または「引き込み現象」と呼ばれ、人間行動学や生物学などさまざまな分野で研究の対象となっている。引き込み効果の身近な例としては、歩行周期に近いマーチのリズムを聴きながら歩いていると、歩行リズムは聴覚を通して外部入力の影響を受け、いつの間にかマーチのリズムに歩行リズムが合ってしまうという現象が挙げられる [9]。また、入場行進で用いられる行進曲は、この現象を利用して集団の歩調を統一していることから、聴覚情報で行動を誘導している例の

一つといえる。引き込み効果を用いた行動の誘導に関する研究として、渡邊らは靴型インタフェースによるナビゲーションシステム [9] を提案している。所望の一定周期で振動入力を生じさせる靴型インタフェースを装着した歩行実験の結果、歩行周期に対する刺激周期を変化させることで装着者に心理的負担をかけることなく暗示的に歩行周期を変化できることを確認している。一定周期でペダルを漕ぐ自転車のペダリング運動においても、ユーザに一定リズムを含む入力を感じ覚へ与えることで暗示的にペダリング速度を制御できると考えられる。そこで本研究では、聴覚入力を与えた時のユーザのペダリングの回転速度を計測し、回転数が高く回転速度の分散が減少する感覚入力の方法を提案する。

## 3. ペダリング評価システム

### 3.1 システム構成

本研究では、ペダリング運動のケイデンスおよびペダル回転速度を計測するために、自転車エルゴメータ（コンビ社製、AEROBIKE AZ101）の右クランクに 3 軸無線加速度・角速度センサ（ワイヤレステクノロジー社製、WAA-010）を図 1 に示すように設置し、ペダリング運動中の加速度と角速度を計測するシステムを設計する。センサのサンプリング周波数は 50[Hz]、設置位置は回転中心から 0.03[m] の位置である。右クランクの鉛直上向き方向を 0 度とし、回転方向に対して正となるように角度を定義する。座標軸と角度の関係を図 2 に示す。エルゴメータにはケイデンス計が搭載されており、表示を見てケイデンスを確認できる。エルゴメータのケイデンス計は経過を記録する機能をもたないため、本システムで求めたケイデンスの推移と変化を記録する。表示計が示すケイデンスと本システムが示すケイデンスが一致することを確認している。

まずはじめに、ペダリングの回転によって法線方向に遠心力による加速度が、ペダリングの回転速度の変化によって接線方向に加減速による加速度がかかるため、それらの影響を求める。半径  $r$  の円周上を時刻  $t$  において角速度  $\omega(t)$  で円運動しているとき、センサにかかる法線方向と接線方向の加速度をそれぞれ  $a_r(t)$ 、 $a_\theta(t)$  とすると、以下のよう表せる。

$$a_r(t) = r\omega^2(t) \quad (1)$$

$$a_\theta(t) = r\frac{d\omega(t)}{dt} \quad (2)$$

センサは半径  $r = 0.03$ [m] と小さい円周上を回転し、またサンプリング周期は 20[ms] と短く、仮に 1 分間で 90[rpm] から 60[rpm] に大きく変化したとしても  $\frac{d\omega(t)}{dt} = 0.02\pi[s^{-2}]$  となるため、 $a_\theta(t)$  は重力加速度に比べ十分に小さく、無視できると考えられる。したがって、ペダリングが原因で生じる加速度は回転の遠心力による法線方向の成分のみを考える。

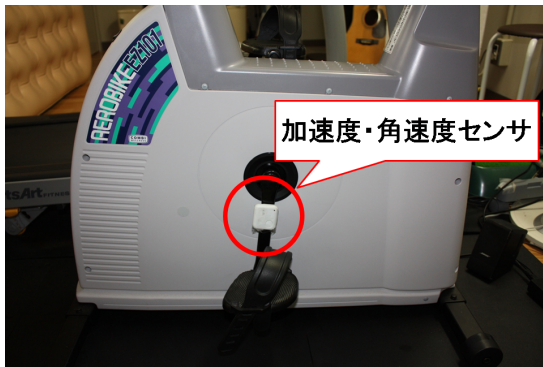


図 1 センサの取り付け位置

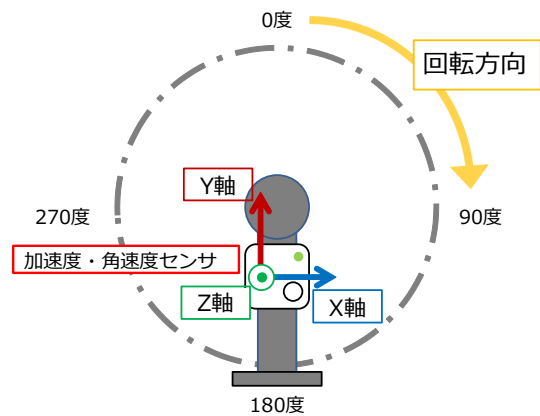


図 2 座標軸と角度の関係

時刻  $t$  における 3 軸の加速度を  $(accX(t), accY(t), accZ(t))$ , 角速度を  $(angX(t), angY(t), angZ(t))$  とすると, 図 2 より, 0 度, 180 度の点では接線方向 (X 軸方向) に関して重力加速度の影響を受けず加速度が 0 になる. 同様に 90, 270 度の点では法線方向 (Y 軸方向) に関して重力加速度の影響を受けないので, 加速度は  $a_r(t)$  のみになる. したがって, ペダリング運動の波形は図 3 に示すように正弦波状に現れ, クランクの角度  $\theta$  は次のように求められる.

- 0 度  $< \theta \leq 90$  度  
 $accX(t) > 0$  かつ  $accY(t) \leq a_r(t)$
- 90 度  $< \theta \leq 180$  度  
 $accX(t) \geq 0$  かつ  $accY(t) > a_r(t)$
- 180 度  $< \theta \leq 270$  度  
 $accX(t) < 0$  かつ  $accY(t) \geq a_r(t)$
- 270 度  $< \theta \leq 360$  度  
 $accX(t) \leq 0$  かつ  $accY(t) < a_r(t)$

1 分間あたりの回転数を表すケイデンスは, ペダル 1 回転に要する時間 (回転周期) を測定することで求められる. 回転の周期を  $T[\text{ms}]$  とすると, ケイデンス  $cadence[\text{rpm}]$  は次式で求められる.

$$cadence = \frac{60000}{T} \quad (3)$$

回転方向の角速度は  $angZ(t)[\text{deg/s}]$  であるから,  $\omega(t)[\text{rad/s}]$  は次式で表され,  $a_r(t)$  が求められる.

$$\omega(t) = \frac{\pi \cdot angZ(t)}{1800} \quad (4)$$

### 3.2 評価指標

本研究では, ケイデンスの安定性とペダリング一周内の回転速度の安定性をペダリングスキルの評価指標とする. 時刻  $t$  におけるペダリングのケイデンス  $cadence(t)$  と時刻  $t$  の角速度  $angZ(t)$  を用いて, ケイデンスの平均値  $Ave_{cad}(t)$  と分散値  $Var_{cad}(t)$  および回転速度の平均値  $Ave_{angZ}(t)$  と分散値  $Var_{angZ}(t)$  を以下の式に基づいて計算する. ただし,  $l$  は計算に用いるウィンドウサイズを示す.

- ケイデンスの平均値

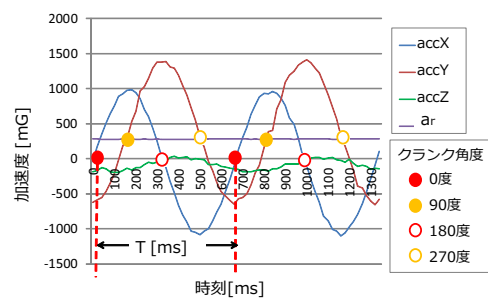


図 3 ペダリング時の加速度波形とクランク角度の関係

$$Ave_{cad}(t) = \frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} (cadence(t-i)) \quad (5)$$

- 回転速度の平均値

$$Ave_{angZ}(t) = \frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} (angZ(t-i)) \quad (6)$$

- 回転速度の分散値

$$Var_{angZ}(t) = \frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} (angZ(t-i) - Ave_{angZ}(t))^2 \quad (7)$$

ケイデンスの平均値  $Ave_{cad}$  と理想的なケイデンスとの差が小さければ, ユーザは理想的なケイデンスでペダリングを行っていることを意味し, ケイデンスの分散値  $Var_{cad}$  が小さければ, ケイデンスの変動幅が小さいことを意味する. また, 回転速度の分散値  $Var_{angZ}$  が小さいほど, ユーザは安定したペダリングを行っていることを意味する.

### 3.3 ペダリング評価実験

サイクルスポーツでは, ケイデンスが  $90[\text{rpm}]$  で一定となるペダリングが理想とされており [2][6][7], 実際にサイクルスポーツ熟練者の多くはこのようなペダリングを好んで用いている [2]. 本研究では, サイクルスポーツ参加歴 3 年以上の被験者を「サイクリスト」, 3 年未満の被験者を「非サイクリスト」と定義し, サイクリスト A, B, C と

非サイクリスト D, E, F の計 6 名に対して、聴覚情報なしの場合、一定テンポを持つメトロノームを聴きながらの場合、一定テンポを持ち連続音である音楽を聴きながらの場合の 3 つの異なる条件下で提案システムを用いて約 1 分間のペダリング運動のデータを採取した。ユーザに感覚入力の情報提示する方法としては触覚、視覚、聴覚が考えられるが、エルゴメータでの運動中はエルゴメータ自体からの振動の影響が大きく、振動デバイスなど触覚を用いた感覚入力の認識は困難である。また、引き込みを行うペダリングの回転周期が短いため、視覚情報では瞬きによって見逃す可能性がある。したがって、本研究での入力の情報提示方法は、環境に影響されず連続的に認識可能な聴覚情報が適切であると考えた。各実験でのペダリング運動の負荷は一定で、被験者にはエルゴメータの表示計のケイデンスを 90[rpm] に維持しながらペダリングを行うように指示した。

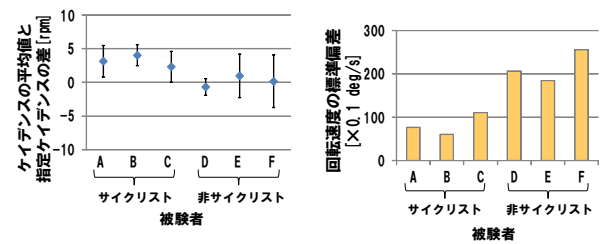
### 3.3.1 実験 1-聴覚情報なし

聴覚情報を与えない状況でのサイクリストと非サイクリストのペダリングの違いを評価するための実験を行った。実験 1 での各被験者のケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差を図 4、サイクリストの加速度波形と角速度波形を図 5、非サイクリストの加速度波形と角速度波形を図 6 に示す。図 4(a) のエラーバーは標準偏差を示しており、幅が大きいほどケイデンスが安定しておらず変動幅が大きいことを意味する。ケイデンスと回転速度の計算は採取したデータのうち最も安定した 30 秒間のデータを使用した。ケイデンスと回転速度を計算するためのウィンドウサイズ  $l$  は 1500 とした。

図 4(a) よりサイクリストのケイデンスの平均値は指定ケイデンス 90[rpm] よりも大きくなる傾向がみられた。これは、実験に参加したサイクリスト 3 名が普段から 90[rpm] より高いケイデンスでトレーニングを行っているためであると考えられる。図 4(b) より、サイクリストのペダル回転速度の標準偏差は小さく、回転速度の変化の幅が小さいことが分かった。一方で、非サイクリストは回転速度の標準偏差が大きいという特徴がみられた。これは、ペダリング中の回転速度の変化が大きいことを意味している。また、図 5 と図 6 の角速度波形を比較すると、非サイクリストの角速度に大きな変動が現れていることがわかる。結果より、サイクリストと非サイクリストのペダリングスキルの違いは回転速度の分散値に特徴的に現れ、非サイクリストはケイデンスと回転速度を一定に保つのが困難であるということが分かった。

### 3.3.2 実験 2-メトロノーム

サイクリストはローラー台やエルゴメータを用いたトレーニングの際、ケイデンスを一定にする目的でメトロノームのクリック音を聞きながらペダリングを行うことがある。この方法を非サイクリスト D, E, F に適用した際の



(a) ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差 (b) 回転速度の標準偏差

図 4 ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差 (聴覚情報なし)

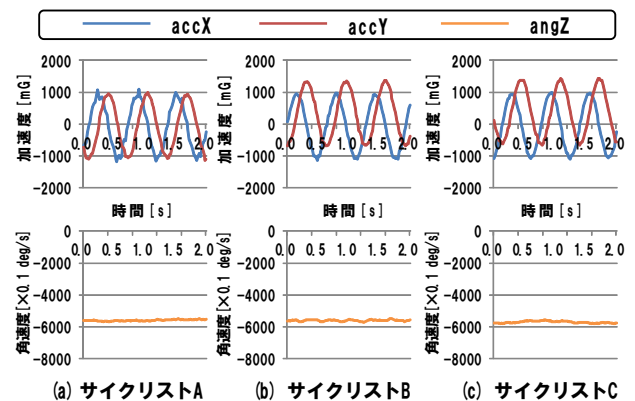


図 5 サイクリストの加速度波形と角速度波形 (聴覚情報なし)

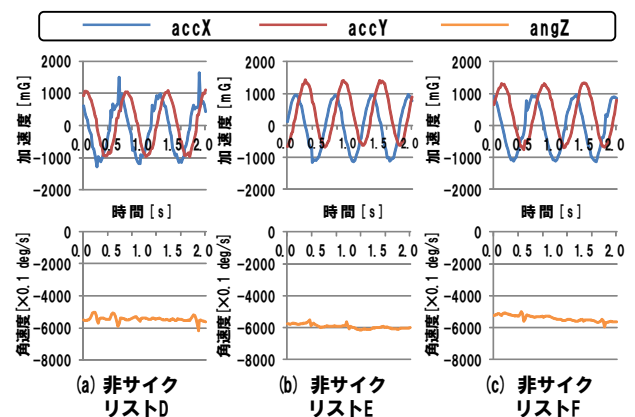
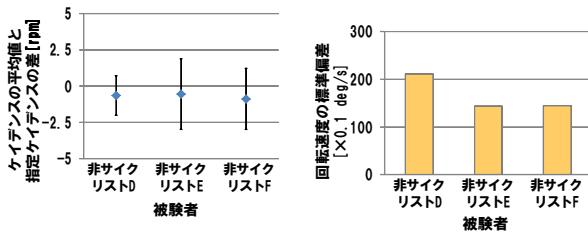


図 6 非サイクリストの加速度波形と角速度波形 (聴覚情報なし)

ペダリングを評価した。この手法でペダリングが改善されれば、メトロノームの周期的なクリック音は回転速度を一定にする引き込み効果を誘発すると考えることができる。メトロノームのクリック音はスピーカから再生し、ペダリング運動中のユーザが聞き取れる音量に設定した。クリック音と左右のペダリングを同期させるため、メトロノームのテンポを目標ケイデンスの 2 倍の 180[bpm] に設定し、ペダリングの周期がクリック音の周期に誘導されてケイデンスが維持されるかを観察した。被験者には、ペダリングのどこで角度でクリック音に合わせるかなどの指示はしな



(a) ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差  
(b) 回転速度の標準偏差

図 7 ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差 (メトロノーム)

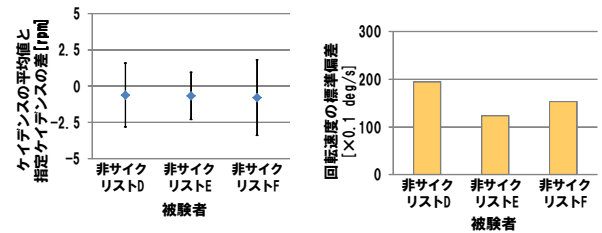
かった。これは、感覚入力に対して半無意識的にペダリング周期が合ってしまう引き込み現象を利用するため、ユーザの意識的な行動ではなく、半無意識的な行動を観察するため [9] である。

図 7 に実験 2 における各被験者のケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差を示す。図 7(a) より、実験 1 と比較して非サイクリスト E, F のケイデンスの平均値からの変動幅が小さくなり、一定に近づけることができた。非サイクリスト D に関してはケイデンスの平均値からの変動幅は差が現れなかったが、図 7(b) より回転速度の標準偏差は増加していることが分かる。非サイクリスト E, F は回転速度の標準偏差は減少しているが、サイクリストの水準には達していない。これは、メトロノームのクリック音が鳴る拍の部分で強い踏み込みを行い、拍と拍の間の無音の区間ではペダリングの誘導を示す情報が与えられなかったため、一回転中のペダル踏みに差が生じたのが原因であると考えられる。長嶋は、メトロノームのような単純なクリック音の羅列は引き込み効果を誘発する音楽的刺激として最適でないことを報告しており [10]、実験 2 の結果はこれと一致したといえる。実験 2 の結果より、ペダリングの誘導を示さない無音区間を短縮またはなくした聴覚情報を提示する必要があると考えられる。

### 3.3.3 実験 3-音楽

無音区間のない聴覚情報として音楽を感覚入力として用いた。ドラムとベースの周期的な繰り返しリズムが含まれ、コード進行が存在する音楽の感覚入力がペダリングスキルに与える影響を評価した。音楽はスピーカから再生し、ペダリング運動中のユーザが聞き取れる音量に設定した。使用した楽曲は Pachelbel の Canon で、エイトビートのテンポを基調に 180[bpm] に編曲されたものである。

図 8 に実験 3 でのケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差を示す。図 8(a) より、すべての被験者においてケイデンスの平均値は実験 2 の結果と大きな差は無く、指定ケイデンスに近い値を示した。非サイクリスト D はケイデンスの平均値からの変動幅が増



(a) ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差  
(b) 回転速度の標準偏差

図 8 ケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差 (音楽)

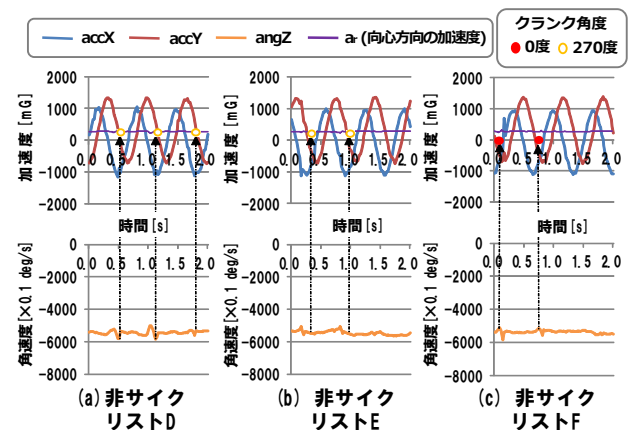


図 9 非サイクリストの加速度波形と角速度波形 (音楽)

加し、ケイデンスを一定に近づけることはできなかった。非サイクリスト E は、ケイデンスの指定地からの変動幅と回転速度の標準偏差が減少した。非サイクリスト F については、ケイデンスと回転速度ともに実験 2 と同様の傾向が見られた。図 9 に非サイクリストの加速度波形および角速度波形を示す。図 9 より各被験者の波形を解析すると、クランク角度と回転速度の変動の箇所との関係は、被験者によって現れるクランク角度はさまざまであるが、360 度ごとの一定のタイミングで回転速度の急激な変動が現れているということが分かった。これは、180[bpm] の音楽には 90[bpm] のタイミングで強拍が存在し、ユーザは強拍のテンポ 90[bpm] を引き込みのテンポとして知覚してしまい、強拍のタイミングで強い踏み込みを行ったため、回転速度に急激な変化が現れたと考えられる。したがって、ペダリング一回転中の回転速度を一定にする方法としては、弱拍を含む強拍以外の点を知覚させることが必要であると考えられる。

### 3.3.4 ペダリング評価実験のまとめ

聴覚情報を与えずペダリングを行った実験 1 では、非サイクリストのペダリングの特徴としてケイデンスと回転速度を一定に保つのが困難であるということが分かった。メトロノームのクリック音を聴きながらペダリングを行った

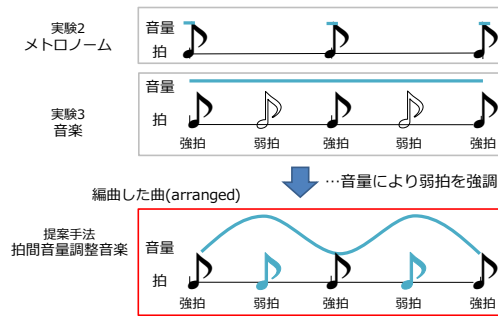


図 10 提案手法 arranged で用いる音楽のイメージ

実験 2 の結果より、提示する聴覚情報の無音区間はペダリングの誘導に寄与しないため、短縮またはなくす必要があるという知見が得られた。無音区間がなく連続音である音楽を聴きながら行った実験 3 の結果は、音楽の強拍部分は強調されてペダリングを誘導したが、弱拍部分は無視されてペダリングの誘導に寄与しなかったため、角速度波形は実験 2 の結果と同様の傾向を示した。したがって、回転速度を一定にするペダリングを誘導するような聴覚情報を提示するためには、ユーザに弱拍部分を知覚させる必要があることが分かった。

## 4. ペダリングトレーニングシステム

### 4.1 システム要件

前章のペダリング評価実験より、聴覚情報は以下の要件を満たす必要がある。

- 要件 1 一定のテンポが存在する。
- 要件 2 無音区間を短縮して情報を提示し続ける。
- 要件 3 ユーザに弱拍を知覚させる。

### 4.2 引き込み手法

#### 拍間音量調整音楽 (arranged)

要件 2 を満たすために、連続音である音楽を感覚入力として用いる。また、要件 1 を満たすために、音楽はドラムとベースのリズムを含むものを用いる。さらにコード進行とメロディが存在し、飽きの生じにくい音楽を選択する。楽曲はペダリング評価実験 2 で用いたものと同じものを用い、スピーカから再生する。要件 3 については、図 10 に示すように、強拍の音量を小さくし、無視される拍間 (弱拍) の音量を大きくして強調するように編曲することで知覚させる。

#### 聴覚的バイオフィードバックとメトロノーム (BFBI)

3.1 節で述べた評価システムを用いて右クラックが 0, 90, 180, 270 度の位置を通過したタイミングで 50[ms] のビーブ音を生じさせる。このビーブ音の時間間隔により、ユーザに対して自身のペダリングの回転ムラを聴覚によって知覚させることを目的とする。本来感知することのできない生理学的な指標を科学的にとらえ、知覚できるよう

にフィードバックして体内状態を制御することはバイオフィードバックと呼ばれており、本手法では回転速度を聴覚情報に変換することによって、バイオフィードバックを行う。

3.3.3 節で行った実験 3 の結果より、90 度、270 度の点の踏み込みのタイミングまたは 0 度、180 度の点のタイミングで 360 度ごとに回転速度の変動が大きくなることがわかったが、これはユーザが聴覚情報の弱拍部分を知覚しなかったためであり、聴覚的バイオフィードバックによりペダリングにおける回転速度の偏りを知覚することで、その周期が外部からの感覚入力に引き込まれてビーブ音の発生周期が一定となるようなペダリングに誘導できると考えられる。そこで聴覚的バイオフィードバックと感覚入力音の 2 つの音をペダリング中に同時にユーザへ与える方法を提案する。

聴覚的バイオフィードバックによる音は右クラックが 0, 90, 180, 270 度を通過した時に生じさせるため、回転速度に偏りがあると一定テンポの感覚入力とずれが生じ、ずれが補正されるように引き込まれると考えられる [10]。また、4 方向の角度でビーブ音を鳴らすため、弱拍を知覚させることもでき要件 3 を満たす。感覚入力音にはメトロノームのクリック音を用い、周期は 360[bpm] とする。3.3.2 節の実験 2 と比較して、感覚入力音のテンポを 180[bpm] から 360[bpm] に増加させることによって無音となる区間が短くなるため、要件 2 が満たされる。ビーブ音とクリック音はスピーカから再生し、ペダリング運動中のユーザがどちらも聞き取れる音量に設定した。

#### 聴覚的バイオフィードバックと音楽 (BFBI II)

BFBI II では感覚入力音としてメトロノームのクリック音を用いていたが、単調なリズムの繰り返しであり、長時間の使用を想定すると心理的負担が大きいとされる。また、単調なリズムである拍による飽きや慣れによって時間の経過とともに被験者の注意力が低下する可能性がある [10]。そこで、本手法ではバイオフィードバックによる音に加えて、感覚入力音としてクリック音ではなく、音楽を用いる手法を提案する。音楽は拍、小節、拍子をもつため、一定テンポであり、かつ単調でないので長時間の使用も可能であると考えられる。クリック音と同様に 360[bpm] のテンポを用いた場合、ユーザが 4 拍子を 2 拍子としてとらえてしまうことがあるので、本手法では 180[bpm] のテンポを用いる。用いる音楽は 3.3.3 節の実験 2 で用いたものを使用する。ビーブ音と音楽はスピーカから再生し、ペダリング運動中のユーザがどちらも聞き取れる音量に設定した。

## 5. 評価実験

### 5.1 実験内容

3.3 節の実験を行った非サイクリスト D, E, F の 3 名に、4 章で述べた提案手法を用いて聴覚情報提示してペダリン

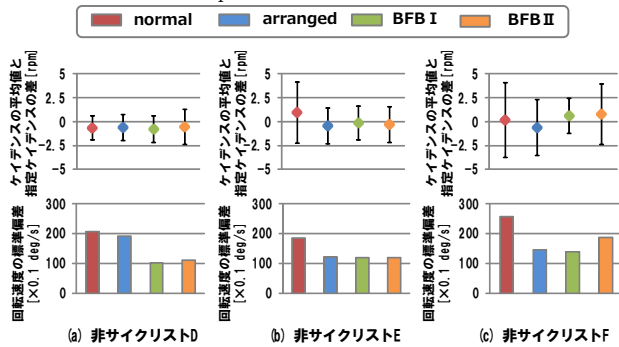


図 11 提案手法を用いた場合のケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差

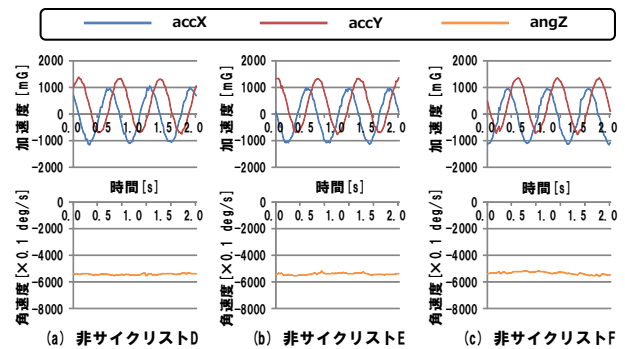


図 14 BFB II の加速度波形と角速度波形

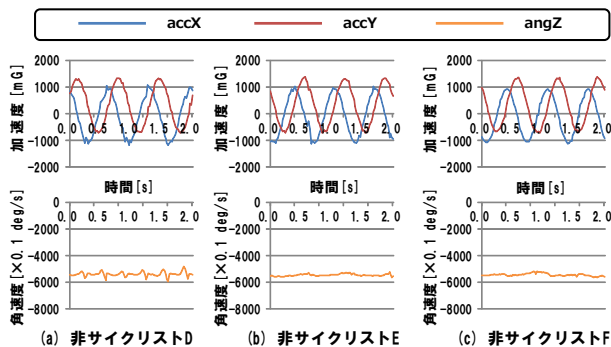


図 12 arranged の加速度波形と角速度波形

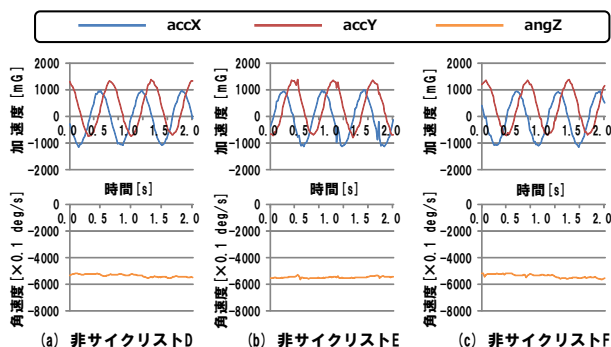


図 13 BFB I の加速度波形と角速度波形

グを行ってもらい、3.1 節で構築したシステムを用いて加速度値と角速度値を収集した。ペダリング運動の試行時間は約 1 分間で、負荷は一定とし、指定ケイデンスは 90[rpm]とした。実験終了後に手法別に心理的負担、漕ぎやすさ、漕ぎにくさに関して自由記述式アンケートを実施した。

## 5.2 結果と考察

各被験者の手法別のケイデンスの平均値と指定ケイデンスの差および回転速度の標準偏差を図 11 に示す。なお、図中のエラーバーは標準偏差を示し、ケイデンスの変動幅の大きさを意味する。また、arranged, BFB I, BFB II によって引き込みを行ったときの各被験者の加速度波形と角速度波形をそれぞれ図 12, 図 13, 図 14 に示す。

非サイクリスト D について、ケイデンスの変動幅は聴覚情報なしの場合と比較して各提案手法に大きな変化は見ら

れなかったが、回転速度の分散値は BFB I で 76.2%, BFB I I で 71.4%減少したことから、聴覚的バイオフィードバックによりペダリング周期が外部からの感覚入力に引き込まれ、ペダリングの回転ムラを減少させることができたといえる。arranged では回転速度の分散値は 15.1%減少し、一定の効果は得られたものの非サイクリスト D にとっては有効な方法ではなかった。これは、図 12(a)の角速度波形より強拍と弱拍ともに知覚させることはできたが、非サイクリスト D にとっては arranged による引き込みが回転速度を補正するように作用せず、むしろ踏力を増加させるように作用したため回転ムラが現れたと考えられる。

非サイクリスト E について、聴覚情報なしの場合はケイデンスの変動幅が大きかったが、提案手法によって聴覚情報を与えることで一定にすることができた。回転速度の分散値に関しても arranged, BFB I, BFB II それぞれ 56.9%, 58.9%, 58.1%減少した。非サイクリスト E は、いずれの手法を用いてもケイデンスを一定にし、回転速度を減少させる効果があったといえる。

非サイクリスト F については、聴覚情報なしの場合はケイデンスと回転速度の分散値が被験者の中で最大であった。ケイデンスの変動幅に関しては、BFB I のときに最小となり、それ以外の提案手法では十分な効果は得られなかったと考えられる。回転速度の分散値では、arranged で 68.1%, BFB I で 70.6%, BFB II で 47.0%減少し、聴覚情報がペダリング運動に影響を与えたことが分かる。

実験終了後に実施したアンケートの結果から、いずれの聴覚情報もペダリングを妨げたと答えた被験者はいなかったが、メトロノームのクリック音 (BFB I) が心理的負担になったと答えたのは 3 名のうち 2 名であった。また、心地よくペダリングを行うことができた手法を答える質問では被験者全員が音楽と回答し、トレーニングにおいて重要であるモチベーションの維持や主観的運動強度の軽減には音楽を用いるのが効果的であるということが分かった。したがって心理的な観点からは arranged や BFB II の手法が有効であると考えられる。

これらの結果より、聴覚情報を与えることによって、サイクルスポーツ初心者のペダリングスキルに変化が現れる

ことが分かった。聴覚情報なしの場合の図 6 の角速度波形と図 12, 図 13, 図 14 の各提案手法の角速度波形を比較しても、変動が小さくなっていることが明らかである。非サイクリスト D を除く被験者では、提案手法すべてにおいてケイデンスの変動幅が減少し、ケイデンスを一定にすることができた。非サイクリスト E, F について、アンケートの結果から聴覚的バイオフィードバックを提示した手法がペダリングしやすくなったことがわかり、図 11 に示す結果と一致している。また、聴覚情報なしの場合と比較して 3 名の回転速度の分散値の平均値が arranged では 46.7%, BFB I では 68.6%, BFB II では 58.8%減少した。したがって、BFB I が最もペダリングスキルを向上させる手法であると考えられる。心理的負担の観点からは、感覚入力に音楽を用いる arranged, BFB II の手法が有効であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、サイクルスポーツ初心者に聴覚的感覚入力を与えることでペダリングスキルを向上させるシステムを提案した。感覚入力として、拍間の音量を調節した音楽、ペダリングの 1/4 周期に発生するピープ音とメトロノーム、ピープ音と通常の音楽の 3 種類を提案し、3 名のサイクルスポーツ初心者に対してペダリングの回転速度の平均値と分散値の観点から比較、評価した。評価実験の結果、ペダリング運動において、聴覚入力による引き込み効果が確認され、提案手法を用いない場合と比較して、回転速度の分散値がそれぞれ 46.7%, 68.6%, 58.8%減少し、提案手法がサイクルスポーツ初心者のペダリングスキルの向上に有効であることが分かった。

今後の課題として、長期的に継続して用いた場合のペダリングスキルの変化や、踏力など回転速度以外の能力を向上する方法の検討が挙げられる。また、実環境での利用に向けて、ユーザの所望のケイデンスへ誘導するシステムの開発、負荷や安全性を考慮した情報の提示システムの設計が必要であると考えている。

## 参考文献

- [1] マイボイスコム株式会社: 自転車の利用に関するインターネット調査, <http://www.myvoice.co.jp/biz/surveys/17917/>.
- [2] 星川秀利, 木村裕一, 玉木啓一, 藤本浩志, 中村好男, 村岡功: ペダリング運動におけるスキル評価, バイオメカニズム学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 173-182 (Aug. 1993).
- [3] R. Redfield and M. L. Hull: Prediction of Pedal Forces in Bicycling Using Optimization Methods, *Journal of Biomechanics*, Vol. 19, Issue. 7, pp. 523-540 (1986).
- [4] 北脇知己, 岡久雄: 加速度・角速度センサを用いた新しい自転車ペダリング解析モデル, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 111-MBE, No. 482, pp. 37-40 (Mar. 2012).
- [5] A. Chapman, B. Vicenzino, P. Blanch, J. Knox, S. Dowlan, and P. Hodges: The Influence of Body Posi-

- tion on Leg Kinematics and Muscle Recruitment during Cycling, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol. 11, pp. 519-526 (Nov. 2008).
- [6] 高石鉄雄: 最適なペダリング速度, バイオメカニクス研究, Vol. 8, No. 1, pp. 42-51 (Mar. 2004).
- [7] R. Patterson and M. Moreno: Bicycle Pedaling Forces as a Function of Pedaling Rate and Power Output, *Medicine and Science in Sports and Exercise (MSSE 1990)*, Vol. 22, No. 4, pp. 512-516 (Aug. 1990).
- [8] 梅本堯夫: 音楽心理学, 誠信書房, p. 594 (Feb. 1968).
- [9] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 朝原佳昭, 杉本麻樹, 前田太郎: 靴型インタフェースによる歩行ナビゲーションシステムの研究, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 5, pp. 1354-1362 (May 2005).
- [10] Y. Nagashima: Drawing-in Effect on Perception of Beats in Multimedia, *Journal of the Society for Art and Science*, Vol. 3, No. 1, pp. 108-148 (Mar. 2004).