



聴覚フィードバックを利用したペダリングトレーニングシステム

奥川, 遼
村尾, 和哉
寺田, 努
塚本, 昌彦

(Citation)

コンピュータ ソフトウェア, 33(1):41-51

(Issue Date)

2016

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は日本ソフトウェア科学会に帰属します。本著作物は著作権者である日本ソフトウェア科学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」に従うことをお願いいたします。

Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by t...

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492852>



聴覚フィードバックを利用した ペダリングトレーニングシステム

奥川 遼 村尾 和哉 寺田 努 塚本 昌彦

近年、スポーツとしての自転車利用に対する関心が高まっている。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、回転数が高くかつ回転速度が一定のペダリングが理想とされている。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、初心者が一定の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である。そこで、本研究ではクランクが 1/4 回転することに音を発生させてペダルの回転速度を聴覚的にフィードバックするペダリングトレーニングシステムを開発した。ユーザは一定テンポの BGM にフィードバック音が合うようにペダリングすることで回転速度が一定に保たれていることを知覚できる。4 週間の実験の結果、システムを用いてトレーニングを行った被験者は、システムを用いずにトレーニングを行った被験者と比較して回転速度の分散が有意に減少した。

Recently, riding a bicycle as sport attracts a great deal of attentions. Previous researches suggest it is ideal that pedaling in high frequency and keeping pedal rotational speed constant to perform fully. It is difficult for beginners to acquire such skill because pedaling skill of expert cyclists is developed based on long-term training. We propose a bicycle pedaling training system using auditory feedback. The system makes a feedback sound every time a pedal crank turns quarter rotation. A user can keep pedal rotation speed constant by synchronizing the feedback sounds with background music that tempo is constant. We evaluate the approach while 4 weeks, and evaluation results confirmed that the variance of subjects trained by using the system decreased significantly comparing subjects trained in conventional method.

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、通学や通勤、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。2011 年の自転車の販売台数におけるスポーツ車の割合は 10.2%であり、2001 年の 1.8%から大幅に増加していることから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できる[1]。サイクルスポーツでは、特有のペダリングスキルとしてケイデンス (1 分間当たりのペダル回転数) が高く、かつ一定であるペダリングが適していると報告されており[4][6]、さらに機械的効率と筋肉疲労の観点からペダルの回転速度が一定でなければいけない[9]。また、部分的に強い踏み込みを行うような理想的でないペダリングの継続は膝蓋靭帯炎など負傷の原因とされており、改善が求められる。初心者と熟練者のペダリングの違いを指摘している研究は多く存在するが[2][6]、ケイデンスのみに着目しており、

Pedaling Training System for Bicycles using Auditory Feedback.

Ryo Okugawa, Masahiko Tsukamoto, 神戸大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Kobe University.

Kazuya Murao, 立命館大学情報理工学部, College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University.

Tsutomu Terada, 神戸大学大学院工学研究科, 科学技術振興機構さきがけ, Graduate School of Engineering, Kobe University, Presently with PRESTO, Japan Science and Technology Agency.

コンピュータソフトウェア, Vol.33, No.1 (2016), pp.41–51.

[研究論文] 2015 年 2 月 28 日受付。



図 1 自転車エルゴメータ

回転速度の揺らぎを考慮していない。ペダリングスキルは長期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く、筆者らの知る限りペダリングを改善する具体的な方法は提唱されていない。

そこで本研究では、回転速度の揺らぎに着目してサイクルスポーツ初心者と熟練者のペダリングの違いを調査し、サイクルスポーツ初心者のペダリングスキル上達を支援するシステムを提案する。具体的には、自転車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、加速度値、角速度値からクランク角度を算出し、クランクが1/4回転するごとに音を鳴らすことで、音の時間間隔からユーザに回転速度の揺らぎを聴覚的にフィードバックするシステムを実装する。ユーザは一定テンポのBGMにフィードバック音が合うようにペダリングすることで回転速度が一定に保たれていることを知覚し、そのペダリングを継続することでペダリングスキルが向上する。また、図1に示すペダリングトレーニングに使用される自転車エルゴメータを用いて提案システムの長期的な使用によるペダリングスキルの推移を評価し、その有効性を検証する。

以降、2章では関連研究を紹介する。また、本システムはペダリングスキルを評価する機構と聴覚的にフィードバックする機構の2つの部分から構成され、

3章でペダリング評価機構、4章でフィードバック機構について述べる。5章で評価実験を行い、最後に6章でまとめを行う。

2 関連研究

2.1 ペダリングの評価

自転車のペダリングの評価に関しては筋電位[2]、ペダル踏力[4]、酸素摂取量[10]、クランク角度[6]などの要素に着目した研究が行われている。高石の研究[5]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]で力学的に優位で作業筋への負担が軽減され、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[3]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]であるとしている。

Chapmanらの研究[2]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[6]は、ペダルに加わる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、回転速度の揺らぎまでは考慮していない。北協の研究[9]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に加えて回転速度の分散をペダリングの評価指標として用いる。

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。周期的な運動への誘導に関する研究としては、リズム知覚を用いた先行研究が多くみられる。渡邊ら[7]は、振動によってユーザにリズムを知覚させ、歩行周期を制御する靴型インタフェースを提案している。畑山ら[8]は、音楽に合わせて歩くことで、音楽の周期と同じ歩行周期が得られることを報告している。

歩行は、足が着地する際に感じる衝撃から周期を知

覚できるが、ペダリングは連続的な円運動であるため動作に区切りがなく、周期を知覚することが困難である。また、仮に周期を知覚できたとしても、ペダリングスキルの向上のためには任意のクランク角度での回転速度の計測および制御が必要である。そこで本研究では、クランクがある角度を通過するごとに音を発生させることで、ペダリング周期を聴覚的に知覚させる。

2.3 フィードバックを用いたスポーツ支援

穂刈ら[13]は、スポーツフォームを定量化するために角速度センサを用いてテニス、ゴルフ、野球の打球スポーツにおける体幹の回転を計測し、捻れエネルギーを算出している。渡辺[14]らは、身体に複数のコンデンサマイクを装着することでゴルフスイングのフォームの中で重要とされている頭部の上下方向の運動(ヘッドアップ)を定量化している。また、城田[15]は加速度・角速度センサを用いてゴルフの経験者と初心者のフォームの違いを示し、初心者のためのフォーム矯正システムを提案している。このシステムでは適切でないフォームでスイングすると音が発生し、音が発生しないようにトレーニングを継続することで適切なフォームに改善されることを確認した。これらの先行研究はいずれも単発運動であり、自転車のペダリングのような連続運動は対象としていない。

Murofushi ら[12]は、ハンマー投げのヘッドに加速度・角速度センサおよび張力センサを装着し、ハンマー投げ上級者の投擲動作におけるハンマー張力、ヘッドスピード、角速度および曲率半径を計測している。一般に、ハンマー投げのような連続する高速な運動のフォームを矯正することは困難とされているが、センサ値を提示することでフォームの指導に有効であることを示している。また、ヘッドの角速度をリアルタイムに聴覚フィードバックすることで新しいトレーニング方法を提案している。高速回転運動であるペダリングを対象とする本研究においても、リアルタイムな聴覚的フィードバックによりフォームを矯正するトレーニングシステムの構築を目指す。

3 ペダリング評価機構

ペダリングトレーニングは、自転車エルゴメータやローラを用いて室内で行なうトレーニング環境と、実際の自転車を用いて屋外の路上で実践的なトレーニングを行う実車環境の2種類に分類される。トレーニング環境では身体にかかる負荷を制御でき、勾配や風、路面状況などの外的要因を排除できるためペダリングスキル形成の基礎的なトレーニングに用いられる。

実車環境では、外的要因がペダリングに影響を及ぼすため、それらに対応できるようなより実践的なトレーニングに用いられる。提案システムは、これらのトレーニング環境での初期段階において使用することで理想的なペダリングを体得し、システムに依存せずペダリングスキルが維持されることを想定している。

本研究では、ペダリングのケイデンスおよびペダルの回転速度を計測するために、自転車の右クランクに3軸無線加速度・角速度センサ(ワイヤレステクノロジ社 WAA-010)を図2に示すように設置し、ペダリング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。クランクの鉛直上向き方向を0[deg]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3に示す。

3.1 角度と回転速度の計算

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それぞれかかるため、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 $\omega(t)$ でセンサが円運動しているとき、センサにかかる法線方向の加速度 $a_r(t)$ と接線方向の加速度 $a_\theta(t)$ は以下のように表せる。

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

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

センサは半径 $r = 0.03[\text{m}]$ 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



図2 センサの取り付け位置

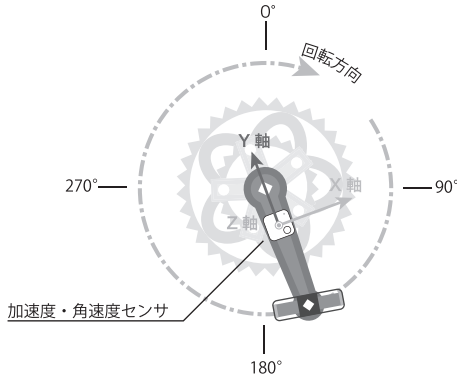


図3 自転車エルゴメータの右側から見た座標軸と角度の関係

$r \frac{d\omega(t)}{dt} \simeq 1.9 \times 10^{-3} [\text{G}]$ となるため、 $a_\theta(t)$ は重力加速度 $1[\text{G}]$ に比べて無視できるほど小さい。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。

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 3 より、 $0, 180[\text{deg}]$ 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 $90, 270[\text{deg}]$ 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ため、加速度は $a_r(t)$ のみになる。したがって、ペダリングの波形は図 4 に示すように正弦波状に現れる。また、安定して走行する自転車の進行方向の加速度の大きさも $1[\text{G}]$ と比較して小さく、常時一定方向に加えら

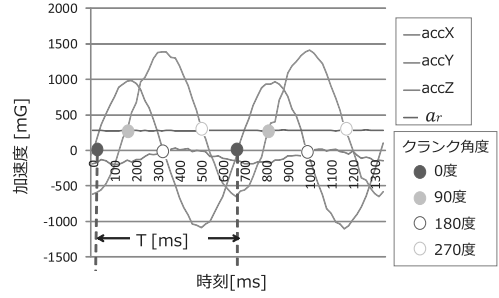


図4 ペダリング時の加速度波形とクランク角度の関係

れる。加速度値はケイデンス算出のための回転周期を測定するためにのみ使用することから、進行方向の加速度は周期の測定に影響を与えず正確に測定が可能と考えられる。

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。

$$\omega(t) = \frac{\pi \cdot angZ(t)}{180} \quad (4)$$

ペダルの回転方向は一方であるから、時刻 t におけるクランクの角度 $\theta(t)[\text{deg}]$ は角速度 $\omega(t)$ 、サンプリング周期 ΔT 、直前に $0[\text{deg}]$ の位置を通過した時刻 t_0 を用いて次のように求められる。

$$\theta(t) = \sum_{i=t_0}^t \omega(i) \cdot \Delta T \quad (5)$$

ただし $accX(t) > 0$ かつ $accX(t-1) < 0$ のとき $t_0 = t$ と更新する。また、このとき更新前の t_0 に対して $\theta(t) = 360[\text{deg}]$ となることを確認している。実車環境では、地面からの振動による影響を除去するために以下に示す式によってフィルタを設け、振動成分を除いたセンサ値で評価を行う。振動除去フィルタ通過後の $accX(t)$ を $accX'(t)$ とする。ただし、 w_1, w_2 は $w_1 + w_2 = 1$ となる定数である。

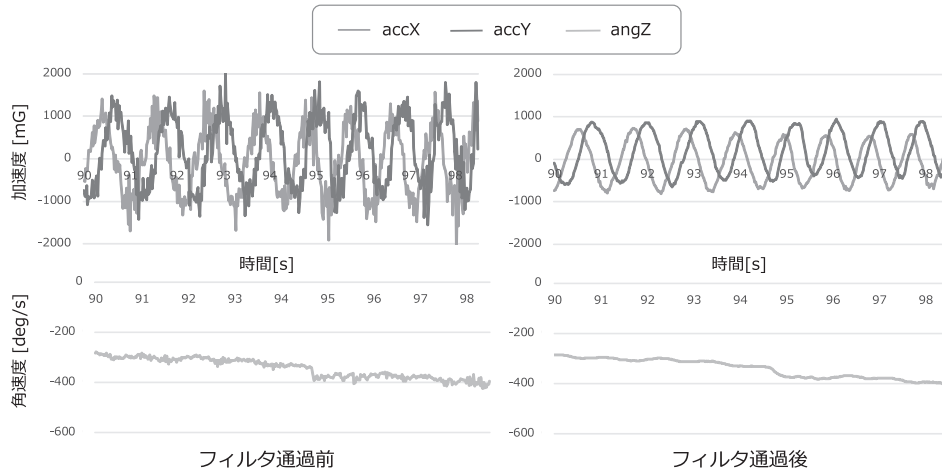


図5 振動除去フィルタ通過前後の加速度，角速度波形

$$accX'(t) = w_1 \cdot accX'(t-1) + w_2 \cdot accX(t) \quad (6)$$

なお、 $accX'(0) = accX(0)$ とし、本研究では w_1 , w_2 の値はそれぞれ 0.9, 0.1 を用いた。 $accY(t)$, $angZ(t)$ についても同様に算出する。フィルタ設定時の加速度値、角速度値の波形を図5に示す。加速度値の振幅が大きく変化しているが周期は変化していないため、(3)式で算出するケイデンスの値は変化しない。角速度値については振動の周波数とペダリングによる回転速度の揺らぎの周波数が異なるため、フィルタによる波形のゆがみは小さい。したがって、フィルタを設定することでトレーニング環境と同様に回転速度の揺らぎを正しく取得できる。フィルタの設定はユーザーがトレーニングを行う環境によって変更し、アプリケーション画面上で設定可能である。

3.2 評価指標

本研究では、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角速度 $angZ(t)$ を用いて、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

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

$$Var_{angZ}(t) =$$

$$\frac{1}{l} \sum_{i=0}^{l-1} (angZ(t-i) - Ave_{angZ}(t))^2 \quad (8)$$

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。ここで、実車環境におけるトレーニング時は $angZ(t)$ に代わり $angZ'(t)$ を評価指標として用いる。

4 フィードバック機構

本章では、3章で述べたシステムによりクランク角度を算出し、図6に示すようなユーザにペダリングをフィードバックするシステムの構築を目指す。

4.1 機能設計

サイクルスポーツ熟練者と初心者のペダリングスキルの違いを明らかにし、ペダリングスキルが向上する手法を決定するために3章で述べたシステムを用いて実験を行った。被験者はサイクルスポーツ経験歴3年以上の熟練者3名と、3年未満の初心者3名であり、サイクルスポーツで理想とされているケイデンス 90[rpm] で回転速度ができるだけ一定になるようなペダリングを継続するよう指示した。実験では、勾配や風、路面状況等に影響されることなく一定の負荷をかけられる自転車エルゴメータ (コンビ社、

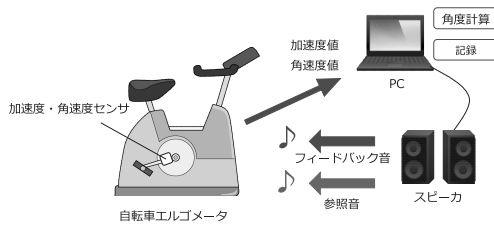


図6 ペダリングトレーニングシステムの構成図

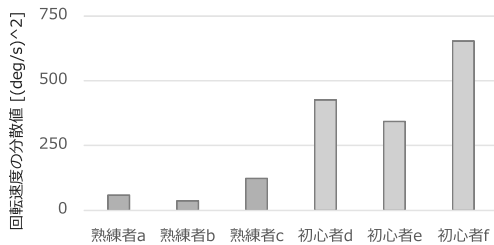


図7 初心者と熟練者での回転速度の分散値の違い

AEROBIKE AZ101) を用いた。ケイデンスの確認はエルゴメータに搭載されたケイデンス計の表示を見て行った。各被験者が安定してペダリングしている状態における30秒間の分散値を図7に示す。結果から、初心者の回転速度の分散値は、熟練者と比較して明らかに大きいことが分かる。図8に示す初心者の加速度、角速度波形の一部から、ペダルの踏み込み位置であるクランク角度90、270[deg]で回転速度の揺らぎが大きくなっていることが分かる。この回転速度の揺らぎによって機械的損失および筋肉疲労が発生するため、初心者のペダリングスキルを向上させるためには、すべての過程で等しい回転速度でペダリングを行うよう誘導する必要があることが分かった。

次に、回転速度を一定に保つトレーニング方法に関する実験を行った。サイクルスポーツ熟練者は、一定のケイデンスを保つために、メトロノームのクリック音にペダリング周期を合わせてトレーニングを行うことがある。この方法を初心者に適用したところ、1名の回転速度の分散値は減少したが、2名は踏み込み時に上述の実験と同程度の回転速度の揺らぎが現れた。これは、クリック音が鳴るタイミングに合わせてペダルを踏んでしまい、ペダリングに強弱が生じたためである。このように、メトロノームのような参照音に自

分の動きを単純に合わせようとした場合、初心者は回転速度の揺らぎを意識するのが難しいことが分かる。

そこで、クランク角度が0、90、180、270[deg]の位置を通過したタイミングでフィードバック音を鳴らし、ユーザに聴覚によって自身のペダリングの回転速度の揺らぎを知覚させる手法を考える。また、フィードバック音に加えて一定テンポの参照音を聴かせ、フィードバック音を参照音に合わせてペダリングすることでペダルの回転速度を一定にする機能を提供する。なお、フィードバックの方法としては、実車環境での利用を考慮すると視点の移動が厳しく制限され、走行時の振動に影響されることから視覚と触覚は不適とし、聴覚を用いた。屋外での使用の際は、周囲の環境音を遮断しないように骨伝導ヘッドフォンを用いて耳がふさがれないよう安全に配慮している。

4.2 参照音の決定

適切な参照音を決定するために実験を行った。本実験では目標ケイデンスを90[rpm]とし、参照音としてメトロノームのクリック音と音楽を比較した。なお、フィードバック音は、参照音に用いる音楽との親和性を考慮し、同時に聴いても違和感がないハイハットドラムの音を用いた。ペダル1回転で4回フィードバック音が発生するため、ケイデンス90[rpm]でペダリングを行うためにメトロノームのテンポは360[bpm]に設定した。音楽のテンポは、4.1節の実験におけるクリック音と同様に360[bpm]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ため、180[bpm]を用いた。音楽は拍、小節、拍子をもつため、一定テンポの参照音としての役割をもち、かつ単調でないため飽きずに長時間使用できると考えられる。使用した楽曲はPachelbelのCanonで、ドラムとベースの周期的なリズムが含まれ、エイトビートのテンポを基調に編曲されたものである。これら2つの手法および比較手法として提案システムを用いず、ケイデンス計だけを用いる通常のトレーニング(以下、従来の方法)を、4.1節で述べたサイクルスポーツ初心者3名に適用し、ペダリング時の加速度値および角速度値を採取した。なお、訓練効果による影響を排除するため、各被験者ともに従来の方法でトレーニ

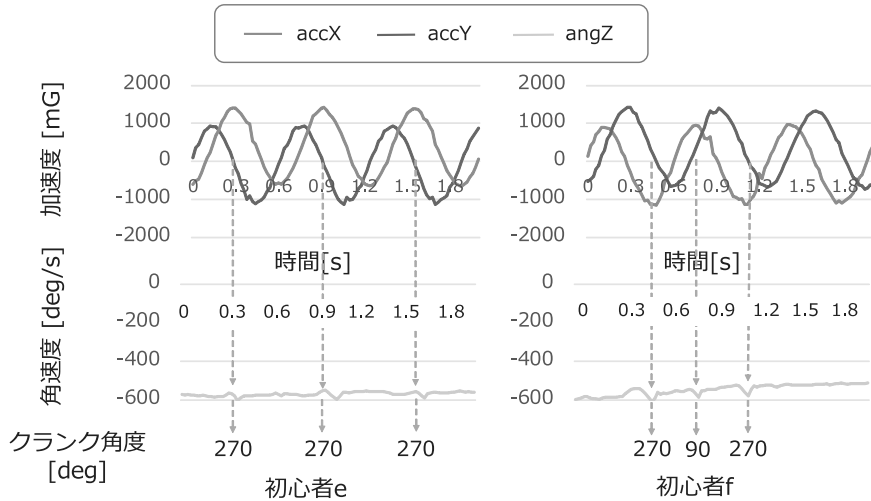


図 8 初心者の加速度・角速度波形

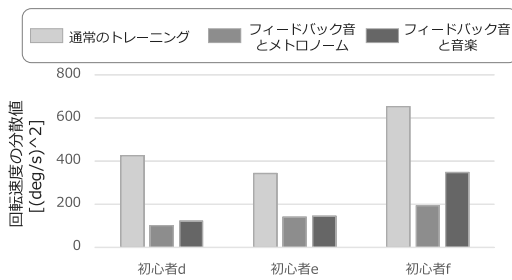


図 9 通常トレーニング時とフィードバック時における回転速度の分散値

ングを行った後、1 週間以上の期間を設け、初心者 d はメトロノーム、音楽の順で適用し、初心者 e, f は音楽、メトロノームの順で適用した。いずれの手法についても、被験者には理想的なベダリングを口頭で説明した上で、ケイデンスを 90[rpm] に維持するように指示した。採取したベダリングの回転速度の分散値を図 9 に示す。いずれの手法においても、システムを用いない場合と比較して有意 ($p < 0.05$) に回転速度の分散値が減少しており、フィードバック音と参照音を用いる提案手法が回転速度の揺らぎ低減に効果があることが分かった。一方、試行後の聞き取り調査において、メトロノームのクリック音は単調で集中力が低下し、長時間の使用にはふさわしくないとの意見が得られた。また、音楽を聴きながら運動を行うことで



図 10 Var の時間変化を表示した画面

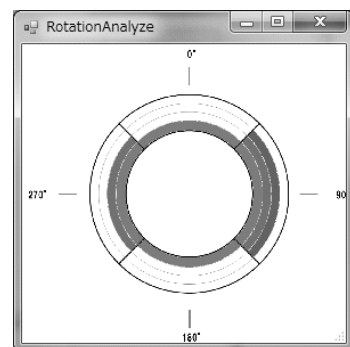


図 11 回転速度の揺らぎの大きさを区画別に表示する画面

主観的運動強度が減少することからも [11], 継続的なトレーニングとして参照音に用いるのは音楽が適していると判断し、提案システムは音楽を参照音とした。

4.3 トレーニングログの表示

提案システムは取得した $angZ$, Var_{angZ} , $cadence$ の時間経過による変化を記録し、トレーニングの後に視覚的にペダリングスキルを確認することで今後のトレーニングに活かせる機能をもつ。加えて、ペダルの回転を4区画に分割し、どの区画で大きな回転速度の揺らぎが生じているかの傾向を視覚的に確認する機能をもつ。表示画面の例をそれぞれ図10、図11に示す。

5 長期的な評価実験

前節に示した結果から、本システム使用時に回転速度の分散値が減少し、よいペダリングが行えることが分かった。しかし、本システムはペダリングスキルの鍛錬を目的としており、実際の走行において高いパフォーマンスを発揮するためにはシステムが存在しない環境でもペダリングスキルが発揮できる必要がある。そこで、本システムを長期的に使用し、定期的にシステムを利用しない場合のペダリングスキルを評価する実験を行った。なお、実際の路上での走行において提案システムを用いる場合は、勾配や風などによって自転車の変速装置を制御する必要がある。今回はそれらの要因を排除するため、評価実験は負荷が一定となる条件を満たす自転車エルゴメータによるトレーニング環境で行った。

5.1 実験内容

被験者はサイクリススポーツ経験歴3年未満のサイクリススポーツ初心者11名で、本システムを利用してトレーニングを行う「実験群」6名と、従来の方法でトレーニングを行う「対照群」5名にランダムに振り分け、両群においてペダルの回転速度の分散値を調査した。両被験者群に、理想的なペダリングを口頭で説明した上で、実験群の被験者(被験者A~F)は、ペダリングのフィードバック音がスピーカから聞こえる音楽のビートに合うようにペダリングすることでケイデンスを90[rpm]に維持することを課題とした。対照群の被験者(被験者G~K)は、エルゴメータ付属のケイデンス計を見ながらペダリングすることでケイデンスを90[rpm]に維持することを課題とした。使用

した楽曲は4.2節で使用したものと同様である。1回の実験時間は20分間で、1週間に3回のトレーニングを4週間行い、合計12回のトレーニングを行った。ペダリング時の負荷は、被験者がトレーニングを継続可能と感じる負荷を自身で設定した。トレーニングの経過とともに最適な負荷は変わる可能性があるため、1週間ごとに負荷を変更できるようにした。各週の最初のトレーニングを行う前と12回目のトレーニングが終了した時に、ペダリングのスキルチェックを行った。スキルチェックでは実際の走行を想定して、システムを用いずケイデンス計を見ながら約1分間ケイデンスを90[rpm]に維持するように指示した。スキルチェックにおいて3章で構築した評価システムを用いて加速度値と角速度値を採取し、回転速度の分散値を算出した。また、実験終了後に日常の運動頻度やトレーニングに関してのアンケートを行った。質問内容は、トレーニング時間20分間の長さの感じ方に関する主観的な評価(質問1)と日常的な運動頻度として1週間の活動回数(質問2)と自由記述式の感想である。質問2について、1以上と回答した人はその種目を回答してもらった。なお、この実験は神戸大学大学院工学研究科の研究倫理審査委員会の承認を得て行った。

5.2 結果と考察

実験群の回転速度の分散値の推移を図12、対照群の回転速度の分散値の推移を図13に示す。実験1~4週目のスキルチェックをそれぞれ1st, 2nd, 3rd, 4thとし、12回目のトレーニング終了後のスキルチェックをfinalと表した。ほぼすべての被験者について、1回目の測定と比較して2回目の測定で回転速度の分散値が減少している。これは、1週間トレーニングを行うことでペダリングそのものに慣れたことが原因と考えられる。

実験群の被験者D, Fはトレーニング開始前の回転速度の分散値が他の被験者と比較して著しく大きかったが、トレーニングを続けることで他の被験者の水準まで減少した。被験者A, B, Eについては、トレーニングによって回転速度の分散値が減少していることが分かる。被験者Cについては、減少したが他の実験群の被験者と比較すると減少量は小さい。対照群の

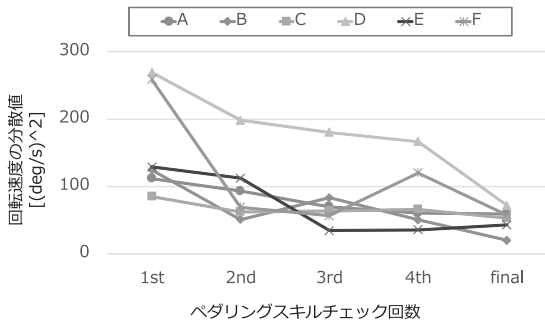


図 12 実験群のペダルの回転速度の分散値の推移

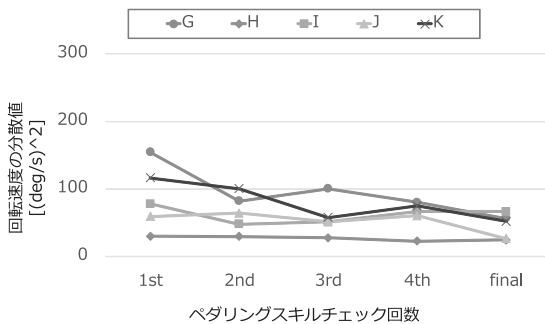


図 13 対照群のペダルの回転速度の分散値の推移

被験者 G, J, K についても、トレーニングを継続することで回転速度の分散値は減少しているが、その減少量は実験群と比較して大きくはない。よって、これは通常のトレーニングの効果が現れたものだと考えられる。被験者 I に関してはトレーニングを継続してもペダリングスキルを向上することはできなかった。また、被験者 H に関しては、ほとんど変化することなく、ペダリングスキルを向上することはできなかった。これらの結果について分散分析を行った結果、システムを用いてトレーニングを行った実験群は回転速度の分散値が有意に減少し ($p=5.8 \times 10^{-6}$)、対照群では有意差は現れなかった ($p=0.22$)。

実験終了後のアンケートの結果を表 1 に示す。質問 1 は 5 段階で評価し、数字が小さいほどトレーニング時間を長く感じたことを意味している。質問 1 では両群で大きな差は見られなかった。質問 2 では、回転速度の分散値の推移があまり変化していない被験者 C と H は日常的に頻繁に運動を行っていることが分かった。この結果より、4 週間で顕著な効果が現れたのは日常的に運動を行っていない被験者であり、

表 1 実験後のアンケートの結果

群	被験者	質問 1	質問 2	種目
実験群 (提案システムあり)	A	2	1	クロスバイク
	B	2	0	
	C	2	4	
	D	4	0	
	E	2	0	
	F	2	0	
対照群 (提案システムなし)	G	2	0	バレーボール 長距離走
	H	4	3	
	I	3	1	
	J	3	0	
	K	2	0	

また、提案システムでトレーニングすることにより、有意に回転速度が安定化することが明らかとなった。さらに長期的な使用によるスキル推移の観測や筋電センサを用いて動員される筋肉も矯正されているかなど、より詳細な考察を行うために継続的な実験を行う必要がある。自由記述式のアンケートでは、実験群の被験者からは「音楽のリズムとペダリングが合うときに漕ぎやすくなり、音楽があると楽しくトレーニングできた」や「音楽のバリエーションを増やすとより退屈が紛れるように思った」など音楽を用いることに積極的な意見が見られた。対照群の被験者からは、「無音の環境でのペダリングは無心でペダリングすることができ、集中できた」という肯定的な意見が見られた一方、「無音で長時間ペダリングを継続するのは集中力が維持できず苦痛であった」や「20 分間がいともよりも長く感じられた」という意見が多く見られた。アンケートの結果より、トレーニングにおいて重要な要素は単純な作業を退屈せずに継続して行えることであり、音楽は参照音としての機能だけではなく、ペダリングトレーニングのような単純な作業中の集中力を維持するように働くことが分かった。より高い効果を得るために音楽の雰囲気を変化させてユーザーに新鮮な印象を与えることで、トレーニング特有の退屈さを紛らわせることができると考えられる。

6 まとめ

本研究では、ペダリングの 1/4 周期ごとに発生するフィードバック音によりペダリング周期をユーザーに知覚させ、音楽のビートに合わせてペダリングすることで、ペダリング回転速度を一定に保つトレーニングシステムを提案した。提案システムを用いて 4 週間

のトレーニングを行ったところ、提案システムを用いた被験者群のペダルの回転速度の分散値が有意に減少したことから、本システムがサイクリス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示された。

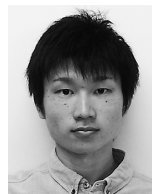
今後の課題は、踏力などの回転速度以外の能力を向上する方法を検討する。また、本システムによって得られたペダリングによって発揮する筋肉と、熟練者の筋電位の比較を行う予定である。加えて、本システムを使用しなくなった場合に永続的に理想的なペダリングが行えるかについても継続して実験を行っていく。また、本システムを実環境で用いた場合の評価については現在調査しており、ユーザの所望のケイデンスへ誘導するシステムの開発、勾配などの道路状況や負荷および周囲の環境音に対する安全性を考慮した情報の提示システムの設計が必要であると考えている。

参考文献

- [1] 一般財団法人自転車産業振興協会： <http://www.jbpi.or.jp>.
- [2] Chapman, A. R., Vicenzino, B., Blanch, P., Knox, J., Dowlan, S. and Hodges, P. : The Influence of Body Position on Leg Kinematics and Muscle Recruitment during Cycling, *Journal of Science and Medicine in Sport*, Vol. 11(2008), pp. 519–526.
- [3] Patterson, R. and Moreno, M. : Bicycle Pedaling Forces as a Function of Pedaling Rate and Power Output, *Medicine and Science in Sports and Exercise*, Vol. 22, No. 4(1990), pp. 512–516.
- [4] Redfield, R. and Hull, M. L. : Prediction of Pedal Forces in Bicycling Using Optimization Methods, *Journal of Biomechanics*, Vol. 19, Issue 7(1986), pp. 523–540.
- [5] 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(2004), pp. 42–51.
- [6] 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(1993), pp. 173–182.
- [7] 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(2005), pp. 1354–1362.
- [8] 畑山由佳，天賀典彦，市江雅芳：健康者歩行実験によるMIDIペーシング音楽の評価，バイオメカニズム学会誌，Vol. 32, No. 2(2008), pp. 83–89.
- [9] 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(2012), pp. 37–40.
- [10] 矢部広樹，今井正樹，久保裕介，安田幸平，西田裕介：自転車エルゴメータにおけるペダルの回転数の違いが

生体へ及ぼす影響，理学療法科学，Vol. 22, No. 2(2007), pp. 215–218.

- [11] 藤縄理，小海里恵，佐藤理美：音楽のリズムが自転車エルゴメータ駆動中の心拍数と主観的運動強度に及ぼす影響，埼玉県立大学紀要，Vol. 1(1999), pp. 15–20.
- [12] Murofushi, K., Sakurai, S., Umegaki, K. and Kobayashi, K.: Development of a System to Measure Radius of Curvature and Speed of Hammer Head during Turns in Hammer Throw, *International Journal of Sport and Health Science*, Vol. 3(2005), pp. 116–128.
- [13] 穂刈真樹，平岡史博，渡辺嘉二郎：ジャイロを用いた打球スポーツの体幹回転運動計測，ジョイント・シンポジウム講演論文集，No. 2003(2003), pp. 43–46.
- [14] 渡辺嘉二郎，小林一行，西沢真一：スポーツにおける上下運動の計測，計測自動制御学会論文集，Vol. 29, No. 1(1993), pp. 10–17.
- [15] 城田浩二，渡辺嘉二郎：バイオフィードバックを用いたゴルフスイングの改善，法政大学大学院工学研究科紀要，Vol. 55 (2014).



奥 川 遼

2014 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。同年より同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程前期課程，現在に至る。



村尾 和哉

2006 年大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科卒業。2008 年同大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。2008 年独国ダルムシュタット工科大学訪問研究員。2009 年より独立行政法人日本学術振興会特別研究員 DC2。2010 年大阪大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。同年より独立行政法人日本学術振興会特別研究員 PD。2011 年より神戸大学大学院工学研究科助教。2014 年より立命館大学情報理工学部助教，現在に至る。博士(情報科学)。ウェアラブルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングの研究に従事。

**寺 田 努**

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000 年同大学院工学研究科博士後期課程退学。同年より大阪大学サイバーメディアセンター助手。2005 年より同講師。2007 年神戸大学大学院工学研究科准教授。現在に至る。2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事。2005 年には同機構事務局長を兼務。2004 年には英国ランカスター大学客員研究員。2006 年 IPA 未踏クリエータ。2010 年より JST さきがけ研究員を兼務。博士 (工学)。ウェアラブルコンピューティング、ユビキタスコンピューティングの研究に従事。IEEE, ACM, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本データベース学会, ヒューマンインタフェース学会, 芸術

科学会の各会員。

**塚 本 昌 彦**

1987 年京都大学工学部理数工学科卒業。1989 年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年シャープ (株) 入社。1995 年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師。1996 年同専攻助教授。2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授。2004 年神戸大学工学部電気電子工学科教授となり。現在に至る。2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長を兼務。工学博士。ウェアラブルコンピューティングとユビキタスコンピューティングの研究に従事。ACM, IEEE 等, 8 学会各会員。