

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*

概要. 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回転するご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。

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、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、ペダリングのトレーニングに用いられ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、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、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し、3章でペダリング評価システムについて述べる。4章ではペダリングトレーニングシステムについて述べ、5章で評価実験を行い、最後に6章でまとめを行う。ここで、本システムはエルゴメータやローラーを用いたトレーニングルームにおいて、ペダリングスキルの鍛錬を行う状況を想定している。路上などでの利用も可能であるが、実際の走行では勾配や風に応じて走行速度やペダリング方法が変わるため、さまざまな周辺情報を用いた制御が必要になる。

2 関連研究

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

Copyright is held by the author(s).

* Ryo Okugawa and Masahiko Tsukamoto, 神戸大学大学院工学研究科, Kazuya Murao, 立命館大学情報理工学部, 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

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 [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、回転速度の揺らぎまでは考慮していない。北脇の研究 [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。

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、ペダリングは円運動であるため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。

3 ペダリング評価システム

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、自転車エルゴメータ（コンビ社、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 WAA-010）を図 1 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 2 に示す。エルゴメータに搭載された



図 1. センサの取り付け位置

ケイデンス計はケイデンス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を記録する。ケイデンス計が示すケイデンスと本システムが示すケイデンスは一致することを確認している。

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 $r \frac{d\omega(t)}{dt} \simeq 1.9 \times 10^{-3}[\text{G}]$ となるため、 $a_\theta(t)$ は重力加速度 1[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 2 より、0, 180[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[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 3 に示すように正弦波状に現れる。

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

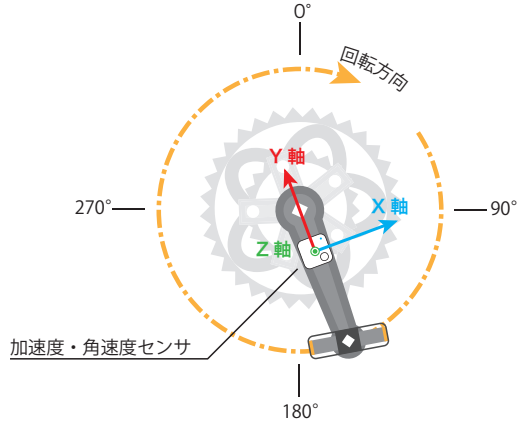


図 2. 自転車エルゴメータの右側から見た座標軸と角度の関係

ンス $cadence[rpm]$ は次式で求められる.

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

回転方向の角速度は $angZ(t)[deg/s]$ であるから, $\omega(t)[rad/s]$ 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向であるから, 時刻 t におけるクランクの角度 $\theta(t)[deg]$ は角速度 $\omega(t)$, サンプリング周期 ΔT , 直前に $0[deg]$ 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 $\theta(t) = 360[deg]$ となることを確認している.

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.

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

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

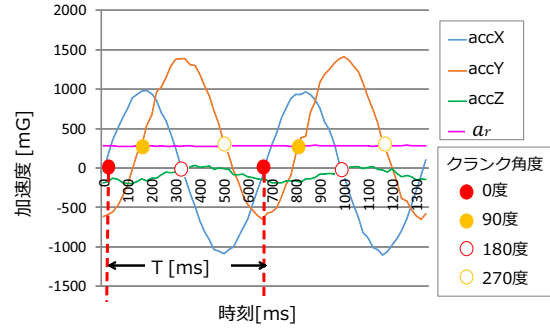


図 3. ペダリング時の加速度波形とクランク角度の関係

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.

4 ペダリングトレーニングシステム

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4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

サイクスポーツ熟練者と初心者と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. ケイデンスの確認は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5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6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応用したところ, 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

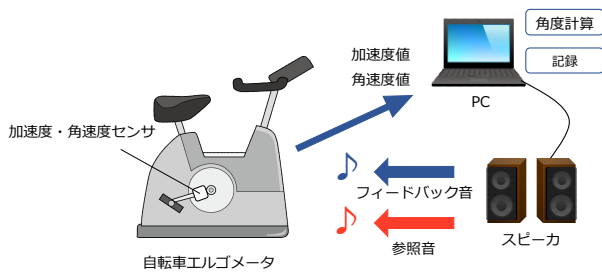


図 4. ペダリングトレーニングシステムの構成図

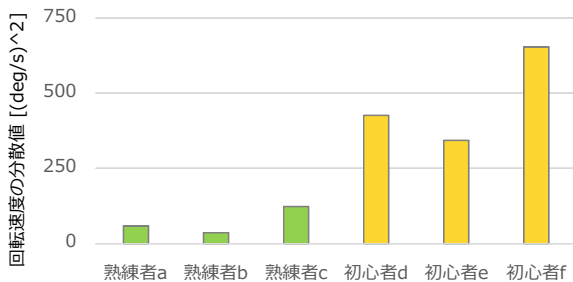


図 5. 初心者と熟練者での回転速度の分散値の違い

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。

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

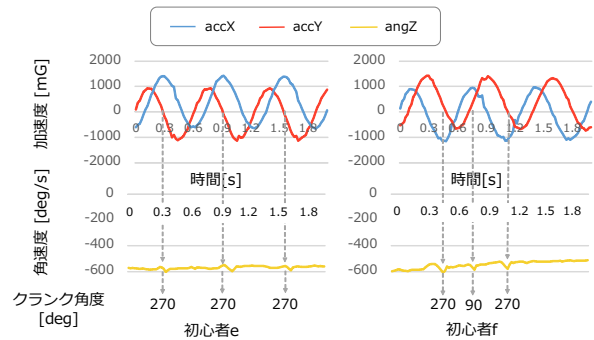


図 6. 初心者の加速度・角速度波形

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に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。いずれの手法についても、被験者には理想的なペ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。ペダリングの回転速度の分散値を図 7 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。

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。

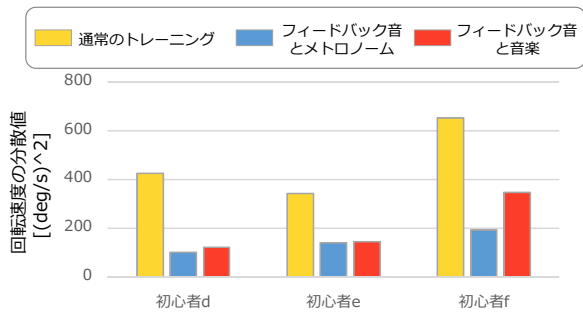


図 7. 通常トレーニング時とフィードバック時における回転速度の分散値

5.1 実験内容

被験者はサイクルスポーツ経験歴3年未満のサイクルスポーツ初心者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8、対照群の回転速度の分散値の推移を図9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、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が、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

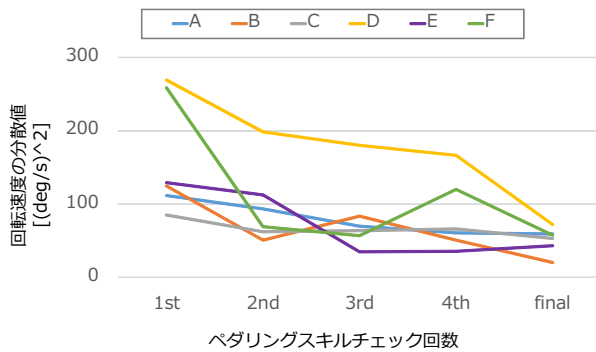


図 8. 実験群のペダルの回転速度の分散値の推移

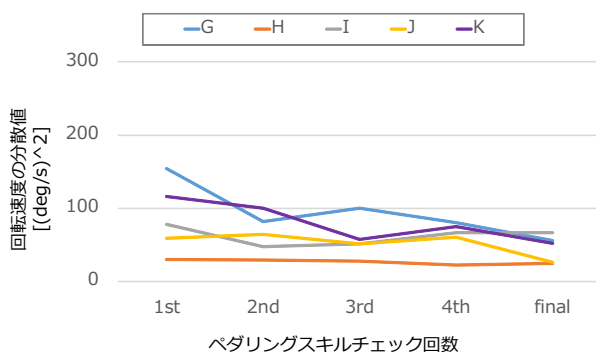


図 9. 対照群のペダルの回転速度の分散値の推移

つ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の検討する。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

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	クロスバイク
	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	

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る場合、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] A. R. Chapman, et al. The influence of body position on leg kinematics and muscle recruitment during cycling. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(6):519–526, 2008.
- [3] R. P. Patterson, et al. Bicycle pedalling forces as a function of pedalling rate and power output. *MSSE1990*, 22(4):512–516, 1990.
- [4] R. Redfield, et al. Prediction of pedal forces in bicycling using optimization methods. *Journal of biomechanics*, 19(7):523–540, 1986.
- [5] 高石鉄雄. 最適なペダリング速度 (特集:自転車運動). *バイオメカニクス研究*, 8(1):42–51, 2004.
- [6] 星川秀利他. ペダリング運動におけるスキルの評価. *バイオメカニクス学会誌*, 1993.
- [7] 渡邊淳司他. 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 (ユーザインタフェース). *情報処理学会論文誌*, 2005.
- [8] 畑山由佳他. 健康者歩行実験による MIDI ペーシング音楽の評価. *バイオメカニクス学会誌*, 2008.
- [9] 北脇知己他. 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 (MBE)*, 111(482):37–40, 2012.
- [10] 矢部広樹他. 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に及ぼす影響: 心拍一定負荷による検討. *理学療法科学*, 2007.
- [11] 藤縄 理他. 音楽のリズムが自転車エルゴメーター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*, 1:15–20, 1999.