

学位被授与者氏名	佐藤 拓広 (SATO Takuhiro)
学位の名称	博士 (工学)
学位番号	博 (一) 第57号
学位授与年月日	2020年3月20日
論文題目	ペダリング運動における筋シナジーを用いた両下肢筋協調制御の理解に関する研究
論文題目 (英訳または和訳)	A study on the motor control mechanism of bilateral lower limb coordination during pedaling exercise based on muscle synergy theory
論文審査委員	論文審査委員会 委員主査 : 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 徳安 達士 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻教授 利光 和彦 同審査委員: 福岡工業大学大学院知能情報システム工学専攻准教 福本 誠 同審査委員: 福岡工業大学大学院物質生産システム工学専攻教授 木野 仁
論文審査機関	福岡工業大学大学院工学研究科
論文内容の要旨 (和文)	<p>近年、スポーツ分野では、競技力向上に関する暗黙知の伝承や競技選手の育成を目的として、トップアスリートがもつ身体スキル (skill) を工学的に明らかにする研究がなされてきた。特に、自転車競技では、スキルの誤認知やオーバーユースの予防に最も重要な課題として、左右下肢による筋発揮力を効率的な推進力へと変換するペダリングスキルの形式知化が挙げられている。現状、ペダリング運動の運動制御を調査した先行研究では、片下肢を対象としたペダリング動作の計測と解析が行われており、左右の両下肢が対称的に運動することを前提としたスキルの議論が主軸を成している。この論点を支持する主要な知見に、両下肢における筋活動量の対称性が挙げられているが、いずれの先行研究もペダリング動作の運動制御を直接検討するに至っていない。</p> <p>そこで本研究は、ペダリング動作における両下肢の非対称性に着眼し、両下肢筋の協調制御メカニズムの理解を目的とした。具体的には、筋シナジーに基づき、両下肢の協調運動に関わる神経機構の存在を明らかとし、下肢の筋疲労を均等に分散する両下肢筋の協調動作を調査した。</p> <p>本研究の方法論として、まず、自転車競技の走行環境を模擬した実験条件の下、初心者と熟練者からペダリング運動において主要な両下肢の筋活動を計測した。次に、ウェーブレット変換を用いて筋活動の時間-周波数成分を算出し、神経筋の生理学的特性を可視化した。そして、次元縮減アルゴリズムの主成分分析と非負値行列因子分解を用いて、両下肢の筋シナジーを抽出した。</p> <p>本研究の結果は、抽出された筋シナジーに基づいて、ペダリング運動が両下肢で異なる機能的な役割を有した筋の協調動作によって構成されることを示した。さらに、ケイデンス (rpm) の変化や筋疲労への適応として、左右下肢のペダリング動作がペダリングフェーズ毎に切り替わることを明らかとした。以上より、本研究の考察では、ペダリング動作の切り替えが、局所筋疲労の低減に主要な役割を果たすことに加え、高いケイデンス下でも下肢筋の協調活動を保持し、ペダリング効率を高めていく上で重要なペダリングスキルを示唆した。</p> <p>本博士論文は、全5章から構成されている。まず、第1章では、研究背景、目的、構成を述べた。冗長自由度系の問題を起点とし、ヒトの巧みな運動制御と身体スキルに関する理論的背景を整理することで、本研究の要点をまとめた。次に、第2章では、左右の両下肢は対象かつ同程度に運動するという従来研究の仮説を検証すべく、筋シナジーの理解に基づいて、両下肢筋の協調活動を生み出す神経機構の存在を述べた。そして、第3章では、ケイデンスの変化が両下肢筋の協調動作に及ぼす影響を調査し、ペダリング動作の運動制御メカニズムについて述べた。以上の知見を踏まえて、第4章では、筋疲労に対して、ペダリング動作の切り替えがどのような役割を果たすかを明らかにするため、両下肢筋の代償動作メカニズムを調査した。第5章では、本研究のまとめとして総合考察を行い、主要な知見と学術的貢献について要点をまとめた。</p>
論文内容の要旨 (英文)	Much research has been done to clarify the sport-specific skills of athletes aiming to transfer their skills to others by formulating explicit knowledge. In the field of

competitive cycling, pedaling skills need the bilateral muscle coordination of the lower extremities, that is key to achieve high-efficiency pedaling motion with reducing non-traumatic injuries due to localized muscle fatigue. However, most of the researches that investigated the pedaling strategy under the assumption of that both legs move symmetrically. A few researches support the symmetry of muscular active mass in lower limb, however, none of them examined its mechanisms. Thus, this study aims to understand the motor control mechanism of inter lower limb coordination during pedaling exercise based on muscle synergy theory. In specific, this study investigates bilateral muscle coordination that evenly distributing muscle fatigue. This methodology consists of several steps. First, the surface electromyography (sEMG) of both leg muscles were measured to quantify the muscle activities under the experimental conditions simulating a competitive cycling environment. Second, the time-frequency component of sEMG that integrates the physiological characteristics of muscles in the both legs were extracted by using wavelet transform. Then, the muscle synergies were obtained from the wavelet power spectrums via dimensionally reducing algorithms; principal component analysis and non-negative matrix factorization, and it showed neuromotor mechanism of the bilateral muscle coordination. The results of this study clarified that the pedaling motion was accomplished by the asymmetric cooperation of the both legs. The switching of pedaling motion was also confirmed at every pedaling phases, in order to adapt to the change of cadence and muscular fatigue. The research outcomes suggested that the switching of pedaling motion between legs could contribute to alleviate localized muscle fatigue and maintain muscle coordination in a high cadence, which represented pedaling skills. This doctoral dissertation consists of five chapters. The first chapter briefly describes background, purpose, and structure of this study. The theoretical part of redundancy problem in musculoskeletal system introduces the neuromotor mechanisms of human's dexterity as motor skills. The second chapter shows the bilateral muscle coordination based on muscle synergy to validate the hypothesis that both legs move symmetrically. The third chapter investigates the effect of the change of cadence on inter lower limb coordination and clarifies the pedaling strategy. The fourth chapter describes compensatory muscle coordination to understand the switching of pedaling motion between legs. The final chapter provides the main findings and contribution of this dissertation.

論文審査結果

博士後期課程知能情報システム工学専攻3年生である佐藤拓広氏が提出した学位論文の審査結果と最終試験の結果について報告する。

学位論文では、競技自転車のペダリング運動を効率化する身体的スキル（ペダリングスキル）の工学的な理解あるいは定量的な評価方法の確立を目的として、身体の運動制御における筋の協調構造である筋シナジーの概念を用いた実験的な研究成果についてまとめられている。自転車のペダリング運動に関する研究は古くから行われているが、いずれの研究においても対象となる身体運動の理解を容易にするために、ペダリング運動における下肢の動作が左右対称であることを前提として取り組まれてきた。これに対して佐藤氏は、自らの生活習慣や競技縄跳びの経験に基づき、筋骨格長や関節自由度などの身体的特徴量は必ずしも左右称性ではないと考え、ペダリング運動は両下肢の協調動作によって成立することを仮説立てた。この仮説検証のために、佐藤氏は論点を3つに整理し、研究課題1：両下肢筋の協調活動を生み出す神経機構、研究課題2：ペダリング動作の運動制御メカニズム、研究課題3：筋疲労による両下肢筋の代償動作メカニズムについて、それぞれを実験的に明らかにしていくことを目標として掲げた。佐藤氏は、それぞれの研究課題に対して十分な先行研究調査を行い、調査結果に基づく独自の方法論を確立し、自ら開発したペダリング運動情報計測制御システムとプロトコルを用いて実験を行った。

その結果、研究課題1では、初心者群のペダリング運動においては、左右下肢で

単一筋同士を強め合うように協調活動している傾向が示され、熟練者群では左右下肢で複数筋同士を強め合うように協調活動している傾向が示された。このことは、ペダリング運動の効率化には左右下肢の複数筋を協調的に活動させることが有効であり、ペダリング運動を通して培われるスキルであることを示唆している。

研究課題2では、まずペダリング運動に動員される両下肢10筋の表面筋電位から筋シナジーの時間構造と空間構造を可視化する手法を提案し、これを用いて初心者群と熟練者群のペダリング動作の特徴的な違いを示した。特に、熟練者群が両下肢筋の協調活動形態を変化させることによって高回転や高負荷など高次のペダリング運動条件に適応していることを明らかにしたことは、ペダリングスキルの理解を深めるための有益な知見となり得る。

研究課題3では、持久運動条件下において筋疲労が一定のレベルに達した場合、被験者の競技経験を問わず、ペダリング運動を維持するための筋シナジーの変容が示された。この結果について、熟練者群の被験者数の少なさが説得力の脆弱さとして指摘されたが、佐藤氏は、疲労時にはすべての被験者において筋シナジーの変容が見られたことを全体傾向としてとらえ、筋シナジーの変容が意味する筋疲労の分散メカニズムとその個人差こそが、両下肢の協調動作がなしえるペダリングスキルを定量付ける要因であると結論づけた。

本研究の成果は、佐藤氏の博士後期課程在学期間において学術論文3編（いずれも第一著者）、国際会議6編（第一著者5編）にもまとめられている。また、国際会議 AROB2017 と AROB2019 においては、Young Author Award を受賞するなど、研究の新規性と有用性に加え、佐藤氏の研究者としての高い資質が認められている。

以上の理由により、審査委員会は本論文が学位論文の内容として適合すると判定した。

学位論文公聴会においては、論文内容に関連する種々の工学的及び技術的な質問があったが、いずれも適切な回答を行うことができた。また、公聴会后に口頭にて実施された最終試験においては、各審査委員からの問いに対して適切に回答することができた。これらを通して佐藤氏が学位論文に関連する分野の学識を有し、今後研究を進めていくための研究能力を備えていると判定した。

以上の結果から、学位審査委員会は、この論文が博士（工学）の学位に適格であると判定した。

主な研究業績

参考論文 27 編 1 冊

査読付き学術論文（第一著者）：3 編

1. “Motor control mechanism underlying pedaling skills: an analysis of bilateral coordination in the lower extremities”, *Journal of Artificial Life and Robotics*, 2019. doi:10.1007/s10015-019-00580-8  
Authors: Takuhiro Sato, Riki Kurematsu, Shota Shigetome, Taiki Matsumoto, Kazuki Tsuruda and Tatsushi Tokuyasu.
2. “両下肢の筋シナジーに基づいたペダリング技術の熟練度評価の試み”, *電気学会論文誌 C*, 139(7), pp. 774-779, 2019.  
著者：佐藤拓広，暮松利輝，徳安達士
3. “Pedaling skill training system with visual feedback of muscle activity pattern”, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 12(4), p.17-00234, 2017.  
Authors: Takuhiro SATO and Tatsushi TOKUYASU

査読付き国際会議論文（第一著者）：5 編

1. “CHANGES IN INTER-LIMB MUSCLE COORDINATION INDUCED BY MUSCLE FATIGUE DURING PEDALING”, Proceedings of the 37th International Conference on Biomechanics in Sport, 37(1), July 2019.  
Authors: Takuhiro SATO, Shigetome SHOTA and Tatsushi TOKUYASU
2. “Quantification of Different Pedaling Strategies in Inter-Lower Limbs between Cyclists of Different Road Racing Experiences”, Proceedings of the 5th International Symposium on Affective Science and Engineering, C00040, March 2019.  
Authors: Takuhiro SATO, Shigetome SHOTA & Tatsushi TOKUYASU
3. “Evaluation of Muscle Coordination in Lower Extremities during Pedaling Exercise”, Proceedings of the 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, GS12-4, pp.331-334, January 2019.  
Authors: Takuhiro SATO, Shigetome SHOTA and Tatsushi TOKUYASU
4. “Development of Training System for Pedaling Skill based on Real-time Visualization of Muscle Activity Pattern”, Proceedings of the 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics, GS11-1, pp. 262-266, January 2017.  
Authors: Takuhiro SATO, Shimpei MATSUMOTO, Tomoki KITAWAKI and Tatsushi TOKUYASU
5. “Development of Training System for Pedaling Skill by Visualizing Muscle Activity Pattern”, Proceedings of the 11th International Conference On Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications, pp.775-782, November 2016.  
Authors: Takuhiro SATO, Shoma KUSHIZAKI, Shimpei MATSUMOTO, Tomoki KITAWAKI and Tatsushi TOKUYASU

査読付き国際会議論文：2編

1. “Assessment of Upper Limb Skill for Pedaling Exercise”, Proceedings of International Conference on Information and Communication Technology Robotics 2018 (ICT-ROBOT2018), September 2018.  
Authors: Riki KUREMATSU, Takuhiro SATO, Tatsushi TOKUYASU
2. “Extraction of physical motion dictating the difference between skilled cyclist and beginner”, Proceedings of the 9th International Conference On Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications, pp. 509-513, November 2014.  
Authors: Tatsushi TOKUYASU, Takuhiro SATO, Shimpei MATSUMOTO & Tomoki KITAWAKI

査読付き国内会議論文：1編

1. “ペダリング技術の可視化による競技自転車訓練システムの開発”，第21回ロボティクスシンポジウム講演論文集，RS1B1，2016年3月。  
著者：徳安達士，佐藤拓広，松本慎平

**査読無し国内会議論文（第一著者）：9編**

1. “ペダリング運動における両脚の協調性評価”，平成30年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集，TC17-3，pp.614-616，2018年9月。  
著者：佐藤拓広，暮松利輝，徳安達士
2. “3軸加速度センサを用いたペダリングスキルの安定性評価”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2017講演論文集，2P1-M09，2017年5月。  
著者：佐藤拓広，徳安達士
3. “3軸加速度センサを用いたペダリング動作特徴の抽出と安定性評価”，スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2016講演論文集，C-28，2016年11月。  
著者：佐藤拓広，徳安達士
4. “下肢筋群活動分析に基づいたペダリングスキルトレーニングシステムの開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2016講演論文集，1A2-12b3，2016年6月。  
著者：佐藤拓広，徳安達士，松本慎平，北脇知己
5. “ペダリング技術の可視化によるスキルフィードバックシステムの開発”，第34回SICE九州支部学術講演論文集，104B1，2015年11月。  
著者：佐藤拓広，徳安達士，松本慎平，北脇知己
6. “下肢筋群活動分析に基づくペダリングスキルのリアルタイムフィードバック手法の提案”，平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集，GS12-5，pp.1425-1429，2015年8月。  
著者：佐藤拓広，串崎将麻，徳安達士，松本慎平，北脇知己
7. “競技自転車ペダリング技術の可視化の試み”，Proceedings of the 2015 IEEE SMC Hiroshima Chapter Young Researcher's Workshop，pp.39-42，2015年7月。  
著者：佐藤拓広，徳安達士，松本慎平，北脇知己
8. “下肢筋群活動分析に基づいたペダリングスキルフィードバックシステムの構築”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2015講演論文集，1P2-H02，2015年5月。  
著者：佐藤拓広，串崎将麻，徳安達士，松本慎平，北脇知己
9. “自転車運動中の下肢筋群活動パターンの分析に基づく初級者と上級者の技術評価の試み”，第22回電子情報通信学会九州支部学生講演会，A-27，2014年9月。  
著者：佐藤拓広，串崎将麻，徳安達士，松本慎平，北脇知己

**査読無し国内会議論文：7編**

1. “可視化された筋シナジーと人工知能によるペダリング技術の習熟度判定の検討”，第20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，2D2-11，香川県，2019年12月。  
著者：鶴田和己，重留正太，佐藤拓広，徳安達士
2. “乗車姿勢の異なるペダリング運動における上肢筋シナジー解析”，第20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，2D2-12，香川県，2019年12月。  
著者：重留正太，佐藤拓広，鶴田和己，徳安達士

3. “競技用自転車におけるハンドリング技術に関わる動作特徴の抽出”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019 講演論文集，1P1-Q05，2019年6月.  
著者：重留正太，鶴田和己，佐藤拓広，徳安達士
4. “縄跳び運動における回旋動作メカニズムに関する研究”，平成29年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集，GS8-1，pp.1448-1450，2017年9月.  
著者：暮松利輝，佐藤拓広，徳安達士
5. “縄跳び運動における回旋動作計測に関する研究”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集，2P1-M08，2017年5月.  
著者：暮松利輝，佐藤拓広，徳安達士
6. “縄跳び運動の動作計測に関する研究”，第35回SICE九州支部学術講演会講演論文集，204A3，2016年11月.  
著者：暮松利輝，江渕健人，佐藤拓広，徳安達士
7. “ペダリング回転中に変化する下肢筋群活動パターンの分析と理解”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集，3A1-P04，2014年5月.  
著者：徳安達士，佐藤拓広，串崎将麻，松本慎平，北脇知己

#### 受賞歴等

1. 公益財団法人 NEC C&C 財団 2019 年度前期国際会議論文発表者助成内定者，2019年7月21-25日
2. Young Author Award, The 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2019年2月
3. 優秀講演賞，日本ロボット学会ヒューマンセントリックロボティクス研究専門委員会第11回若手研究会，2019年1月
1. Young Author Award, The 22rd International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2017年2月