

補助事業番号 2017M-130

補助事業名 平成29年度 サイクリング用高精度下肢力覚センサシステムの実用開発  
補助事業

補助事業者名 工学院大学 工学部 機械システム工学科 生体計測制御研究室 桐山善守

## 1 研究の概要

ペダルとサドルに生じる3次元荷重を、作用位置と合わせて時系列に取得することができる高精度力覚センサの開発に取り組んだ。ペダルに生じる力は、内外側方向の力まで検出できるようにした。また、サドルについては、左右に分割したセンサを開発し、接触部の作用位置と合わせて3次元荷重まで左右別々に計測できるものとする。本センサを実際環境でも利用できるよう、小型・省スペースを実現し、実用的センサとして開発した。

## 2 研究の目的と背景

サイクリングパフォーマンスの向上には、適切な車輛設定に加えて身体負担が少なく力学的に効率的なペダリング動作を実現する必要がある。このため、パフォーマンスの評価に加えて健康維持の効果を含めた生体内力学的負担を明らかにするための定量的な解析手法が求められている。そこで本事業では、下肢の生体内力学負担を計算できるように、ペダルとセンサに生じる3次元荷重を計測できるセンサの開発を目的とした。この際、荷重中心も同時に計測できる詳細な力学センサの開発に取り組んだ。

## 3 研究内容

### (1) サイクリング用高精度下肢力覚センサシステムの開発

(<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1063/Bio3lab/cycling.html>)

サドルセンサ:

#### サドルセンサ

着座姿勢でのペダリング動作を理解する際、身体-自転車系において股関節の回転中心はサドル周辺で固定され、大腿はサドルと接触しないと仮定することが多い。こうすることで、解析を簡略化できるだけでなく、股関節まわりの関節モーメントの算出が容易になる。しかし、競技者によってサドルの好みが変われるのは、臀部を支える座面の大きさやサドル側面と大腿との接触に力学的な接点があるからである。このため、股関節モーメントを評価するためには、大腿とサドル側面との接触を無視できるわけではない。

逆力学解析によって関節モーメントを算出するには、外部から身体節に作用する力やモーメントをあらかじめ計測しておく必要がある。サドルと大腿との接触は、大腿から見ると外部からの力と見なさなくてはならない場合がある。実際、この部分の接触が、大腿との接触と見なすか股

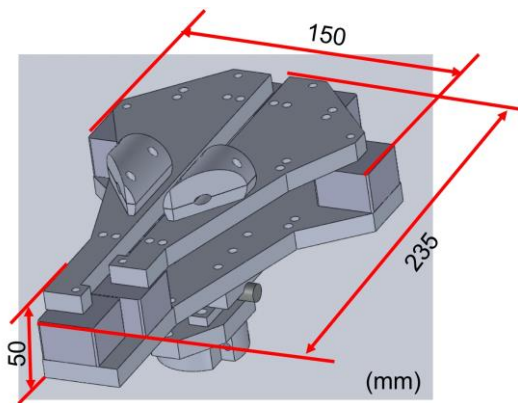


図1 サドルセンサの検出部寸法

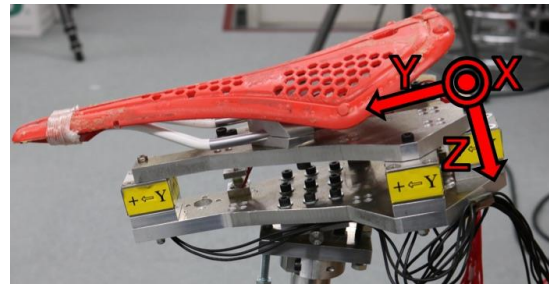


図2 サドルセンサの外観

関節より近位にあたる臀部との接触とみなすかは、剛体リンクと見なした際の大腿の構造をどのように定義するかによって変わってくる。接触部は恥骨周辺の大腿内側(いわゆる内股部分)に相当し、解剖学的には股関節の関節中心はより近位に位置する。このことから、サドルとの接触力を計測し逆動力学解析を行うことは、より厳密な想定とも言える。

外部からの力を逆動力学解析に利用するには、力の大きさ、方向、作用位置まで必要になる。サドルに生じる力と作用位置を求めるセンサはこれまでも発表されているが、サドル全体に作用する力を検出するものであり左右の区別はない。しかし、下肢の逆動力学解析を行うということは、左右それぞれの大腿に作用する力とその作用位置を別々に検出する必要がある。このため、サドルを左右に分割したセンサを開発することにした(図1および図2)。

本アイデアを実現するに辺り、必要最小限の構成でかつ計測原理を確認できれば良かったため、サドルセンサ内の荷重センサには市販の3軸荷重計を流用することにした。

本センサの基本構成は、荷重計をベースプレートとトッププレートが挟み込み、その上にサドル座面が取り付けられている。本センサが大腿の運動を邪魔することなく接触力を計測できるためには、ベースプレートとトッププレートがサドル形状の水平投影面内に収まる必要がある。このため、3軸荷重計の取り付け位置を工夫することでこの問題を解決した。設置した3軸荷重計の取り付け位置が既知の時、それぞれのセンサで検出された力によるモーメントのつり合いから荷重中心を求めることができる。また、力のベクトルは、3軸荷重計からの成分ごとに総和を求めることで得ることができる。これによりトッププレート上に作用する力のベクトルとその作用位置を求めることができる。実際には、大腿はサドル座面上で接触しているため、トッププレート上で得られた力を座面表面まで延長すると、座面上での荷重中心を求めることができる。

おおよそ2 [mm]の精度で力の作用位置位置を検出することができることがわかった。このセンサを用いて、健常被験者5名を対象にサイクリング動作を行わせた。ペダリング動作時の右側サドルにおける力の作用位置の軌跡を図5に示す。この軌跡は、クランクの角度と対応している。どの被検者もサドルの側方で前後方向に長い軌跡を示している。このような特徴は、サドル形状に大きく依存するものと考えられる。

### ペダルセンサ:

逆動力学計算においては、一般的に四肢の先端から計算を行う。身体-自転車系においては、ペダルから作用する力とその作用位置を求め、これを元に足部、下腿、大腿の順に計算を行う。前述のように、ペダルから足部に作用する力とは、足部による踏力の反力である。

一般的に、踏力の方向は下肢構造で基底される矢状面内に作用すると考えられるが、ペダリング動作時の荷重の方向がこの平面に含まれているとは限らない。実際、サドルから大腿に作用する力は3次的に計算でき、矢状面外に向かう力のベクトルとして検出されている。力のつり合いを考えるならば、ペダルからの力の向きも3次的になっていると考えられ、平面内の力になっている保証はない。すなわち、踏力を検出するにあたり、クランクの回転面内での力に加え、面外に作用する力の成分も検出できる必要性が考えられた。そこでペダル上に作用する力の大きさとその作用位置を検出できるセンサを開発することにした。この際、ペダルはペダル軸上で回転するため、軸外の力はクランクに対してペダルを回転させるために利用されると仮定し、ペダル軸上での作用位置として検出できることにした。また、クランクの回転角度については、濃淡をつけた円板を用いて、2つの明度センサからの出力差から求めた。濃淡は連続的に変化しており、1度以下の分解能でクランク角度を検出できる(図3)。

力とその作用位置を検出するために、クランク上に定義した座標軸ごとに力と捻りのモーメントを求め、そこからペダル上での力とその作用位置を求めた。また、実走時での利用を考慮し、増幅やデータ蓄積用の回路はクランク周辺のスペースを利用して配置することにした。

実際に、このペダルセンサを利用してペダリング時の状態を計測した。クランクー回転中におけるペダルからの反力は3次的に変化していた。また、面外への力については必ずしも無視できないことがわかった(図4)。サイクリングを行っていない健常成人を対象としたため、計測結果にはばらつきが大きかったが、熟練者になれば、面外方向の力が減少しくことも期待でき、初心者と熟練者との違いが面外力の大きさで評価できる可能性がある。

また、ペダル上での力の作用位置についても、決して1点で作用しているわけではなく、クランク角度に応じて変化している様子を確認できた。

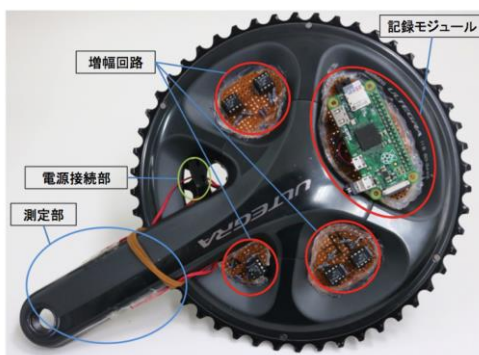


図3 ペダルセンサの検出機構

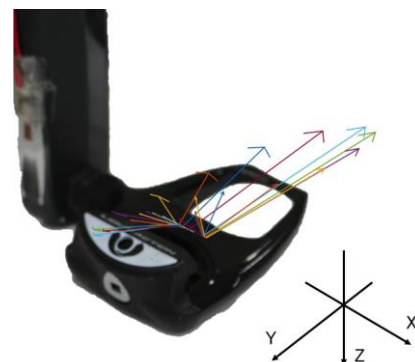


図4 ペダルセンサの検出力

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

健康志向の高まりを受け、スポーツ競技人口は年々増加している。無理と無駄の無いペダリングスキルを身につけることは、疾患がなく健康維持にもつながる。本事業で開発したセンサは、これまでのセンサの機能と性能を大幅に向上させたものである。簡略化されたセンサが製品として市販されているものの、真に有効なペダリングスキルを理解するには必ずしも十分でなかった。本センサの発表により、ペダリングスキル評価に対する生体力学的な認識が改められ、3次元的な評価の重要性が認識されると考えられる。

また、スポーツ競技としてだけでなく、日常的な移動手段としての自転車もある。下肢に疾患のある高齢者では、歩行に移動が難しい場合でも自転車ならば乗れる場合がある。本センサにより自転車における身体負担を明らかにすることができれば、超高齢社会に移行する本邦において高齢者のADLを高めることにもつながる。

本センサの開発が、生体内負荷を明らかにすることにもつながり、引いては自転車を介した高齢者の社会活動参加への一助ともなりうる。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本センサの開発は、ヒトの運動原理を理解するという事業責任者の研究方針と一致したものである。特に、自転車はヒトが動力として機能する必要もあり、スポーツという視点ではパフォーマンスの向上、身体負荷という視点ではスポーツ疾患の発症について解明するためのツールとなりうる。自転車は、車輻という道具を使いながらもヒト自身の身体能力が極めて重要であるため、今後も継続したい研究テーマである。また、本センサのような要素技術の開発は、自転車に限らず重要な研究テーマでもある。これまでも、様々な計測用センサを独自に開発してきたが、独自性の高い新たなセンサを開発することができ、技術・知識等のノウハウを蓄えることにもつながった。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

1) サイクリング競技のための三次元踏力及び作用位置計測システムの開発, 徳見真之助, 桐山善守, 日本機械学会スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017, 2017年11月9日(金沢)

2) スポーツに学びスポーツを支える, 桐山善守, 日本機械学会誌, 2018年4月号

3) 生体力学解析システム, 特開2018-72143(P2018-72143A), (本事業開始前に申請)

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

サドルセンサ, ペダルセンサ

(<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1063/Bio3lab/cycling.html>)

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 工学院大学(コウガクインダイガク)

住 所: 〒163-8677

東京都新宿区西新宿1-24-2

担 当 者: 准教授 桐山善守(キリヤマヨシモリ)

担 当 部 署: 工学院大学 研究推進課(コウガクインダイガク ケンキュウスイシンカ)

E - m a i l: kiriyama@cc.kogakuin.ac.jp

U R L: <http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~wwa1063/Bio3lab>