

# 博士学位論文審査要旨

2018年 1月16日

論文題目： ヒトの運動特性を考慮したゴルフクラブの設計に関する研究

学位申請者： 松本 賢太

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副 査：同志社大学 名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

個々のゴルファーに合ったクラブを設計するためには、スイング時のクラブの弾性変形挙動とゴルファーの協調動作をシミュレーション上で再現し、それらに基づいたクラブの設計が必要となる。本論文は、人体動特性を考慮したクラブの弾性変形挙動を再現可能なモデルを構築し、さらに、特異値分解法によるスイング時の協調動作抽出手法の有効性を示すことで、シミュレーションに基づく個々に合ったクラブを提案可能な新たな設計手法の確立を目的としている。

本論文は全6章で構成されている。第1章では、本研究の背景および目的について述べている。第2章では、ヒトの運動特性を考慮したクラブの弾性変形挙動シミュレーションモデルの構築手法について述べている。第3章では、構築したクラブモデルを用いて、スイング時の撓み挙動を求め、撓み挙動の結果に基づいてクラブヘッドの回転姿勢を算出し、計測値と比較することで、このモデルの有効性を検証している。第4章では、クラブ特性としてクラブ重量に注目し、異なる重量のクラブを使用した時のゴルフ上級者のスイングデータをもとに特異値分解を行い、そのスイングを複数のモードに分解することで、分解したモードとクラブ重量との関係性を明らかにしている。第5章では、構築した特異値分解手法によって、弾道の異なるスイング挙動を解析し、取得したモードをもとに弾道の異なるスイングの違いを明らかにすることで、本手法の有効性を示している。第6章では、ヒトの運動特性を考慮したクラブシミュレーションモデルの構築と特異値分解によるスイング時の協調動作抽出手法について、その結果の要旨をまとめている。これらの成果は、個々のゴルファーに合ったクラブを設計するために必要な、スイング時のクラブの弾性変形挙動のシミュレーションとヒトのスイングの分析手法を確立しており、本論文は工学的に極めて価値のあるものと評価できる。よって、本論文は、博士（工学）（同志社大学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2018年 1月16日

論文題目： ヒトの運動特性を考慮したゴルフクラブの設計に関する研究

学位申請者： 松本 賢太

審査委員：

主 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 辻内 伸好

副 査：同志社大学大学院理工学研究科 教授 青山 栄一

副 査：同志社大学 名誉教授 小泉 孝之

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院理工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2015年3月に修了し、2015年4月に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、Proceedings of the 2nd International Congress on Sports Sciences Research and Technology Support pp.27-33, Procedia Engineering vol. 112 pp. 10-15, Procedia Engineering vol. 147 pp. 360-365に掲載されすでに、十分な評価を受けている。

2017年12月16日午前10時30分より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、提出者は、英語による論文発表や語学試験にも合格しており、十分な語学能力を有すると認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博 士 学 位 論 文 要 旨

論 文 題 目： ヒトの運動特性を考慮したゴルフクラブの設計に関する研究  
氏 名： 松本 賢太

## 要 旨：

ゴルフの競技人口は国内では約 700 万人を超えといわれ、幅広い年齢層のゴルファーが競技を楽しんでいる。この競技を楽しむには、ドライバーと称されるウッドクラブが重要となる。ドライバーを巧みに操ることで、ボールをより遠くに、正確に飛ばせるようになり、競技を有利に進められるだけでなく、ボールを打撃した爽快感も得られる。そのため、ドライバーに関する様々な研究が行われ、その研究成果から、ゴルフクラブ（以後クラブ）に関する研究の有効性が明らかになった。

また、クラブに関する研究に加え、材料開発によって、クラブヘッドの体積、反発係数を変化させることで、ドライバーの飛距離や方向安定性を向上させることが可能となった。しかし、それらクラブヘッドの無制限の性能向上は競技の本質を損ねてしまうため、体積規制、反発係数の規制が設けられた。そこで、クラブヘッドの改良だけではなく、クラブに関する研究による競技能力の向上も進められた。

その一つに、クラブと腕の協調性に着目した研究がある。この協調性を明らかにすることで、個々のゴルファーのスイングとクラブの運動を関連付け、個々のゴルファーに合ったクラブを設計することができる。その手法の一つとして、「データベースフィッティング」がある。データベースフィッティングとは、適正シャフト診断の精度を高めるため、グリップエンドにセンサを装着してスイングを計測し、ゴルファーのスイングを分析することで、データベースの中から適正なシャフトを推奨する手法である。しかし、データベース上に無いクラブは提案できないため、この手法ではシャフトを完全に個々のゴルファーに合わせることができない。個々のゴルファーのスイングに剛性分布を合わせオーダーメイド製のシャフトを提供するためには、データベースに存在しないシャフトを使用しスイングした時の弾性変形挙動をシミュレーションによって再現することで、個々のゴルファーに合ったクラブを設計する必要がある。

クラブの弾性変形挙動を再現するためには、マルチボディダイナミクスを用いたモデルや有限要素法を用いた動力学モデルなどがある。マルチボディダイナミクスを用いたモデルでは、3次元空間上での動作を計算し、腕とクラブの相互作用を考慮してクラブの運動を解析可能である。また、設計変数を容易に反映可能なモデルを構築するために、有限要素法による解析も進められた。

また、こうしたシミュレーション技術の向上によって、クラブがスイングに与える影響に注目した研究もある。その影響を考慮してクラブ設計を行うために、クラブの設計変数とスイングの変化の関係を統計モデルによって定量化することでクラブの設計を行った研究もある。しかし、この研究では、手首、肩、腰などの個々の部位とクラブの運動との関係性を明らかにしているが、スイング動作は個々の部位が互いに協調して全体の動きが構成されるため、個々の部位とクラブとの直接的な相関を明らかにすることは困難である。そこで、身体の運動をいくつかの協調動作の組み合わせとして捉え、その協調動作とクラブ特性との関連性を明らかにする事が求められる。

歩行動作に関して、2次元平面の関節協調を抽出した研究があり、この研究では、歩行動作を3つの協調動作で表現可能であることが示唆されている。また、スイング動作を2次元平面で表現し、特異値分解法によって、スイング動作をいくつかの協調動作に分類した研究もある。しか

し、上述したようにスイング動作は3次元的な運動であり、クラブ特性とスイングとの関係を明らかにするためには、3次元空間における協調動作の抽出が必要になる。

以上より、個々に合ったクラブを提案するためには、クラブがスイングに与える影響を解明し、その影響によってクラブの変形を予測可能なモデルが必要となる。

本研究では、個々のゴルファーに合ったクラブを提案する手法を確立することを目的としている。具体的には、計測データに基づき、スイング時のクラブの弾性変形挙動を再現可能なモデルの構築とゴルファーのスイングの協調動作を抽出する手法を開発する。クラブモデルの構築には、有限要素法の梁要素を用い、設計変数を容易に入力可能なモデルを構築する。従来のモデルではクラブと身体との境界条件には、固定端またはピンジョイントを用い、把持機構がもたらす力学的な影響が考慮されていなかった。そのため、このモデルを用いて個々のゴルファーに合わせたクラブの弾性変形を再現するには、境界条件が異なるため精確に弾性変形を再現できない可能性があった。そこで、本研究では有限要素モデルに、把持機構がもたらす拘束の影響を考慮したモデルを組み込み、ヒトの運動特性を考慮したスイング時のシャフト弾性変形挙動を再現可能なシミュレーションモデルを構築する。

次に、スイング時の協調動作を抽出するため、3次元動作解析装置を用いてゴルファーのスイングデータを取得し、その3次元位置座標データに特異値分解を行うことによって、3次元空間での協調動作を単一のモードとして抽出することを試みる。また、クラブ特性としてクラブ重量に注目し、2名のゴルフ上級者に対し、異なる重量のクラブを2本用意し、各被験者の各クラブでのスイングを3次元動作解析装置により計測した。計測した3次元位置座標データをもとに観測行列を構成し、観測行列に特異値分解を行い、ゴルフ上級者のスイングを複数の単一のモードに分解する。そして、モードとクラブ重量との関係性を明らかにする。さらに、この特異値分解による協調動作抽出手法の有効性を明らかにするため、上級者に意図的に弾道の異なるスイングを打ち分けさせ、そのスイングの違いを本手法によって分析する。

以上より、本研究の目的は、シミュレーションに基づいて個々のゴルファーに合ったクラブを提案するために、計測に基づいたクラブの弾性変形挙動を再現可能なモデルの構築と、特異値分解手法によるスイング時の協調動作抽出手法の確立である。

本論は、緒論、本編4章および結論の全6章で構成されている。第1章では、個々に合ったクラブを提案するために、シミュレーションに基づいた解析手法に関する先行研究の事例について記述した。そして、シミュレーションに必要な構成要素を示し、クラブのシミュレーションモデルの構築とスイング時の協調動作抽出手法を確立するという本研究の目的を示した。

第2章では、ヒトの運動特性を考慮したクラブの弾性変形挙動シミュレーションモデルの構築手法について論じた。ゴルフクラブを有限要素法の梁要素を用いてモデル化し、また、ゴルファーの把持状態をバネで再現することで、ヒトの運動特性をモデルに組み込んだ。加えて、このモデルの有効性を検証するために、スイング計測実験によって計測した撓み挙動と、シミュレーションの撓み挙動との比較を行った。そして、入力した慣性力と撓み挙動に周波数解析を行い、周波数領域の観点から考察した結果を論じた。

第3章では、構築したシミュレーションモデルの有効性の検証結果について論じた。2章で構築したクラブモデルを用いて、スイング時の撓み挙動を求めた。さらに、スイング時の弾性変形により生じる、弾性変形と慣性力がもたらすトルクの効果を考察した。そして、算出した撓み挙動の結果に基づいてクラブヘッドの回転姿勢を求め、クラブヘッドの姿勢を計測値と比較することで、このモデルの有効性を検証した。

第4章では、スイング時の協調動作抽出手法について論じた。ゴルファーのスイングデータを3次元動作解析装置によって取得し、その3次元位置座標データに特異値分解を行うことで、3次元空間での協調動作を抽出した。そして、クラブ特性としてクラブ重量に注目し、ゴルフ上級者に対し、異なる重量のクラブを2本用意し、各被験者の各クラブでのスイングを計測した。計

測した3次元位置座標データをもとに特異値分解を行い、ゴルフ上級者のスイングを複数のモードに分解した。そして、分解したモードとクラブ重量との関係性を明らかにした。

第5章では、特異値分解による協調動作抽出手法の有効性について論じる。上級者に意図的に弾道の異なるスイングを打ち分けさせその動作を取得する。そして、第4章で構築した特異値分解手法によって取得したスイング挙動の解析を行った。取得したモードをもとに弾道の異なるスイングの違いを明らかにすることで本手法の有効性を示した。

第6章では、ヒトの運動特性を考慮したクラブシミュレーションモデルの構築と特異値分解によるスイング時の協調動作抽出手法について、その結果の要旨をまとめた。

本研究によって、ヒトの運動特性を考慮したスイング中のクラブの弾性変形挙動のシミュレーションが可能となった。さらに、ゴルファーのスイングをモードの重ね合わせとして表現し、ヒトのスイングの分析手法を確立した。これらの技術は、個々のゴルファーに合ったクラブを設計するための重要な指標となる。