

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

2018 年 3 月

松本 賢太

同志社大学大学院理工学研究科

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 従来の研究と本研究の目的	3
1.3 本論文の構成	4
第 2 章 ヒトの運動特性を考慮したクラブモデルの構築	6
2.1 緒言	6
2.2 クラブモデルの構築	6
2.2.1 変位	6
2.2.2 グリップ部, シャフト部の運動方程式	8
2.2.3 ヘッド部の運動方程式	11
2.2.4 クラブの運動方程式	16
2.3 把持モデルの構築	16
2.3.1 把持を考慮した運動方程式	17
2.3.2 把持剛性の変化	18
2.4 ヒトの運動特性を考慮したクラブ運動方程式	19
2.5 解析方法	20
2.5.1 計測	20
2.5.2 グリップ座標系の定義	21
2.5.3 シャフト挙動の計測	21
2.5.4 加速度, 角速度, 角加速度の算出	23
2.5.5 シャフト挙動予測	23
2.5.6 把持モデルのパラメータ推定	24
2.6 シミュレーションモデルの評価	24
2.6.1 慣性力の評価	24
2.6.2 固定端条件におけるクラブ固有振動数の比較	26

2.6.3	シャフト撓み挙動の比較	26
2.6.4	周波数解析	29
2.7	結論	32
第3章	クラブモデルを用いたスイング挙動解析	33
3.1	緒言	33
3.2	慣性力の成分分解による撓み生成メカニズムの解明	33
3.2.1	慣性力の成分分解	33
3.2.2	シミュレーション方法	34
3.2.3	撓み挙動の平均値の比較	34
3.2.4	グリップとシャフトの慣性力による撓み挙動	36
3.2.5	クラブヘッドの慣性力の加速度成分による撓み挙動	38
3.2.6	クラブヘッドの慣性力の角速度成分による撓み挙動	39
3.2.7	クラブヘッドの慣性力の角加速度成分による撓み挙動	41
3.3	撓みトルクによる撓み挙動の再現	42
3.3.1	撓みトルクの算出方法	42
3.3.2	シミュレーション方法	44
3.3.3	把持パラメータの検討	44
3.3.4	撓みトルクの有効性の検証	48
3.4	クラブヘッドの姿勢検証	50
3.4.1	クラブヘッド姿勢の定義	50
3.4.2	ヘッド姿勢の算出方法	53
3.4.3	ヘッド姿勢の比較	53
第4章	特異値分解によるスイング解析手法の提案	58
4.1	緒言	58
4.2	スイング計測実験	58
4.2.1	実験準備	58

4.2.2 実験方法	60
4.3 モーションデータの解析	60
4.3.1 スイングの抽出と時間の定義	60
4.3.2 アドレスのタイミングの定義	61
4.3.3 バック 9 時のタイミングの定義	61
4.3.4 トップのタイミングの定義	61
4.3.5 ダウン 9 時のタイミングの定義	61
4.3.6 インパクトのタイミングの定義	61
4.3.7 フォロー 3 時のタイミングの定義	61
4.3.8 モーションデータを用いた解析方法	62
4.3.9 3 元配置分散分析結果	63
4.4 特異値分解法	64
4.4.1 観測行列の構成	64
4.4.2 特異値分解	65
4.5 特異値分解結果	66
4.5.1 主要モードの検証	66
4.5.2 第 1 モードのスイング挙動	67
4.5.4 第 3 モードのスイング挙動	69
4.5.5 第 4 モードのスイング挙動	70
4.5.6 第 5 モードのスイング挙動	71
4.5.7 第 1 モードから第 5 モードまでのスイング挙動	72
4.6 クラブ重量と特異値分解結果との関係	72
4.7 被験者 T のクラブ重量と各モードのスイング挙動との関係	73
4.7.1 第 1 モードの挙動比較結果	73
4.7.2 第 2 モードの挙動比較結果	73
4.7.3 第 3 モードの挙動比較結果	74

4.7.4	第 4 モードの挙動比較結果	74
4.7.5	第 5 モードの挙動比較結果	74
4.8	被験者 N のクラブ重量と各モードのスイング挙動との関係	75
4.8.1	第 1 モードの挙動比較結果	75
4.8.2	第 2 モードの挙動比較結果	75
4.8.3	第 3 モードの挙動比較結果	75
4.8.4	第 4 モードの挙動比較結果	75
4.8.5	第 5 モードの挙動比較結果	76
4.9	重量違いによって影響を与える部位の特定	76
4.10	設計への応用の検討	77
4.11	結論	77
第 5 章	特異値分解によるスイングの評価	79
5.1	緒言	79
5.2	スイング計測実験	79
5.2.1	実験準備	79
5.2.2	実験方法	80
5.3	モーションデータの解析	80
5.3.1	スイングの抽出と時間の定義	80
5.3.2	フィニッシュの定義	80
5.3.3	モーションデータを用いた解析方法	80
5.4	特異値分解法	82
5.5	特異値分解結果	83
5.5.1	主要モードの検証	83
5.5.2	第 1 モードのスイング挙動の比較	84
5.5.3	第 2 モードのスイング挙動	85
5.5.4	第 3 モードのスイング挙動	86

5.5.5 第 4 モードのスイング挙動	87
5.5.6 第 5 モードのスイング挙動	88
5.5.7 ドローとフェードの軌道差とスイング挙動の関係	89
5.8 結論	90
第 6 章 結論	91
参考文献	93
謝辞	96

第 1 章 結論

1.1 研究の背景

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、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てきた。初期の研究では、飛距離や方向安定性を向上させるためにドライバーを如何に操ればよいか明らかにすることを目的として、上級者のドライバーショットを分析した。この研究では、ストロボ写真を用いて、スイングを 2 次元平面に投影し、幾何学的位置関係によって、腕の角速度やクラブヘッドのスピードを時系列で算出した。その結果、上級者は腕の角速度を変化させることでクラブヘッドのスピードを高め、飛距離を獲得していることが示唆された⁽¹⁾。また、腕とゴルフクラブ（以後、クラブと呼称）の関係性を詳細に分析することを目的として、ラグランジュの運動方程式により腕とクラブの 2 リンクモデルを構築し、2 次元平面上でクラブの運動を解析した研究もある。この研究では、クラブを振り上げる高さや、腕とクラブのなす角の大きさに応じて、ボール打撃時のクラブヘッドのスピードが変化することを示した⁽²⁾。上述した 2 つの研究成果によって、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、材料開発や構造解析によって、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⁽³⁾。そのため、クラブヘッドだけでなく、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。

クラブに関する研究は大きく 2 つに分類される。一つは、クラブの運動を生み出す要因を分析するためのスイングに関する研究であり、もう一つは、クラブ挙動に関する研究である。スイングに関する研究には、手首、肩、腰などの個々の部位の動作を分析することを目的として、マルチボディダイナミクスの観点より身体とクラブをセグメントモデルで表現し、各関節のトルクを分析した研究がある^{(4), (5)}。この研究では、ゴルファーのスイングを計測し、その計測データを用いて逆動力学計算を行い、手首、肩、腰などの個々の部位の連動によるクラブへのエネルギー伝達を示した。また、筋肉の動きとスイングとの関係を分析することを目的として、筋電センサによってスイング動作中の筋電位を分析した研究も見られる^{(6), (7), (8), (9)}。これらの研究では、個々のゴルファーはその熟練度や骨格の特徴に応じて、使用する筋肉が異なることを明らかにした。

次に、クラブの挙動に関する研究には、クラブの弾性変形挙動を分析することを目的として、有限要素法(FEM)によってクラブをモデル化し、スイングプレーンと呼ばれる 2 次元平面上でのクラブの弾性変形挙動を再現した研究がある⁽¹⁰⁾。この研究によって、個々のスイングに合わせた曲げ剛性を持つシャフトを選定することで、クラブヘッドのスピードを上げられることが示唆された。さらに、クラブに伝わるエネルギーの伝達を明らかにすることを目的として、クラブのマルチボディ解析が行われた⁽¹¹⁾。このマルチボディ解析によって、クラブのヘッドスピードを向上させるためにはスイングプレーン上から外れたスイングが必要であることが明らかとなった。

既存の研究に加えて、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可能となる。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に、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シャフト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することはできない。個々のゴルファーのスイングに剛性分布を合わせた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必要がある。

シャフトの弾性変形挙動を再現するためのシミュレーションモデルには、マルチボディダイナミクスを用いたモデル^{(11), (12), (13), (14)}や有限要素法を用いた動力学モデル^{(10), (15)}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たシャフトの運動を解析することができる。また、設計変数を容易に反映可能なモデルを構築することを目的として、有限要素法による解析も進められた。しかし、従来の有限要素モデルでは、非線形梁要素を用いて詳細に弾性変形を表現することは可能であるが、今後オーダーメイド製のクラブの設計に応用するためには、計算負荷を小さくする必要がある。

また、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着目した研究もある。その影響を考慮してクラブ設計を行うことを目的として、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⁽¹⁶⁾。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、全体の動きを構成しているため、個々の部位とク

クラブとの直接的な相関をと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ことが求められる．

これら協調動作を抽出する解析手法としてシナジー解析^{(17), (18), (19)}がある．シナジー解析には，身体各部の筋電位によって抽出した筋シナジー^{(17), (19)}と，関節角より抽出した運動学シナジー^{(17), (18)}がある．筋シナジーは，ヒトやサルの歩行・走行動作中の筋電位によって求められ，冗長多自由度系である筋骨格系を用いた複雑な運動の生成を説明する有力な理論であるとされている．この筋シナジーを用いることで，少数のシナジー構造によって運動を低次元化して表現することが可能となる．

また，筋の発揮力から生じる関節の運動にもシナジー構造があることが示唆され，それは運動学シナジーと呼ばれる．この運動学シナジーの仮説に基づいて，身体の運動をいくつかの協調動作に分ける研究がある．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⁽¹⁸⁾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⁽²⁰⁾．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次元空間での協調動作の抽出が必要になる．

以上より，個々のゴルファーに合ったクラブを設計するためには，クラブがスイングに与える影響を協調動作によって分析し，その影響によってシャフトが如何に変形するか予測可能なモデルが必要となる．

1.2 従来の研究と本研究の目的

本研究では，個々のゴルファーにあったクラブを設計する手法を確立することを目的として，計測データに基づき，スイング中のシャフト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．具体的には，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．また，従来の研究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^{(21), (22)}が考慮されておらず，このモデルを用いて個々のゴルファーに合わせたシャフトの弾性変形を精確に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中のシャフトの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，スイング中の協調動作を抽出することを目的として，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、取得したモードとクラブ重量との関係性を明らかにすることを目的として、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を3次元動作解析装置によって計測した。計測した3次元位置座標データに基づき観測行列を構成し、観測行列に特異値分解を行い、ゴルフ上級者のスイングから複数の単一のモードを抽出する。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に、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に合ったクラブを設計するために、計測に基づいたシャフトの弾性変形挙動を再現可能なモデルの構築と、特異値分解手法を用いたスイング中の協調動作抽出手法の確立である。

1.3 本論文の構成

本論文は、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設計することを目的として、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する。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中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す。

第2章では、ヒトの運動特性を考慮したシャフトの弾性変形シミュレーションモデルの構築手法について論じる。クラブを有限要素法の梁要素を用いてモデル化し、ゴルファーの把持条件をバネ要素で再現することで、ヒトの運動特性をモデルに組み込む。加えて、このモデルの有効性を検証することを目的として、スイング計測実験を実施し、計測データによって算出した撓み挙動と、シミュレーションの撓み挙動との比較を行う。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その結果を論じる。

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る。2章で構築したクラブモデルの有効性を検証することを目的として、新たにスイング計実験を実施し、スイング中の撓み挙動を求める。さらに、スイング中のシャフトの弾性変形と慣性力との外積によって生じるトルクの効果を検討する。そして、算出した撓み挙動の結果に基づき、クラブヘッドの姿勢を求め、計測データによって算出した結果と比較し、このモデルの有効性を検証する。

第4章では、スイング中の協調動作抽出手法について論じる。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。そして、クラブ特性としてクラブ重量に着目し、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を 3 次元動作解析装置によって計測する．計測した 3 次元位置座標データに基づき特異値分解を行い，ゴルフ上級者のスイングから複数の単一のモードを抽出する．そして，抽出したモードとクラブ重量との関係性を明らかにする．

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，意図的に軌道の異なるスイングを打ち分けさせ，その動作を 3 次元動作解析装置によって計測する．そして，計測したスイング挙動を第 4 章で構築した特異値分解手法によって解析し，モードに基づき軌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す．

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を用いたスイング中の協調動作抽出手法について，その結果の要旨をまとめる．

本論文において特に指定をおこなわない場合，国際単位系(SI)を用いる．

第2章 ヒトの運動特性を考慮したクラブモデルの構築

2.1 緒言

ゴルフの競技人口は国内では約 700 万人を超えるといわれ、幅広い年齢層のゴルファーがこの競技を楽しんでいる。この競技の特徴は、スイング動作という身体とゴルフクラブ（以後、クラブと呼称）を調和させた、しなやかなダイナミクスが存在することである。このダイナミクスを巧みに操ることで、ゴルファーは、ゴルフボールを遠く、正確に飛ばすことが可能となる。

ゴルフボールをより遠く、正確に飛ばすことを目的として、ドライバーのヘッド部分は「高反発」、「体積の上昇」という進化を遂げてきた。しかし、近年ヘッドの体積規定に加え、フェース面の反発係数に制限が設けられた⁽³⁾。そのため、ヘッド部分によるクラブの差別化が困難になりつつある。そこで、メーカーの対応としてシャフトのラインナップを増やし、個々のゴルファーに合ったシャフトを提供している。その手法の一つとして、「データベースフィッティング」が確立された。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ことを目的として、グリップエンドにセンサを装着しスイングを計測し、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。将来的には、データベース上には存在しない、ゴルファーのスイングに剛性分布を合わせたオーダーメイド製のシャフトを提供したいと考えている。そのためには、データベースに存在しないシャフトを使用した時のシャフトの弾性変形挙動をシミュレーションによって再現する必要がある。

シャフトの弾性変形挙動を再現する研究には、マルチボディダイナミクスの概念からクラブ挙動を再現する研究^{(11), (12), (13), (14)}や、有限要素法によるシミュレーション手法を用いた研究^{(10), (15)}がある。しかし、これらの研究ではクラブと身体との境界条件に、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^{(21), (22)}されていない。

そこで、本章ではシャフトの弾性変形挙動を再現することを目的として、有限要素法のオイラー・ベルヌーイ梁要素によってシャフトをモデル化し、ヘッド部を剛体要素としてモデル化する。さらに、ゴルファーの把持をモデルに組み込み、ヒトの運動特性を考慮したスイング中のシャフトの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。

2.2 クラブモデルの構築

2.2.1 変位

シミュレーションモデル構築のために、クラブの物理モデルを図 2.1 に示す。グリップ部、シャフト部はオイラー・ベルヌーイ梁の多段円筒梁要素、ヘッド部

は剛体要素としてモデル化する．梁要素は 22 要素に分割され，グリップ部は 6 要素，シャフト部は 16 要素を持つ．このモデルを 2 つに分割し，グリップ部からグリップ部とシャフト部が結合している要素までの領域を物理領域，それ以外を弾性変形領域とする．次に，節点変位を求めるために，モデルの第 i 要素を図 2.2 に示す．この要素の両端の節点を第 i 節点，第 $i+1$ 節点とし要素間長さを L とする．無変形時における第 i 節点にシャフト座標系の原点をとる．この座標系の x 軸はシャフト軸に対して平行で，原点からヘッド部への向きを正とする． y 軸はヘッドのトゥ方向に対して平行で，トゥ方向逆の向きを正とする． z 軸はフェース方向に対して平行で，フェース方向正の向きを正とする．そして，第 i 要素に生じる x 軸， y 軸， z 軸方向の変位をそれぞれ u ， v ， w と置き，これらの変位をまとめた列ベクトルを \mathbf{n} とする．シャフトの変形を 3 次の多項式で近似し，形状関数を $[N]$ ，節点変位を $\mathbf{d}_{(i)}$ とすると，変位は以下の式で表される^{(23), (24), (25), (26)}．

$$\mathbf{n} = [u \quad v \quad w]^T = [N] \mathbf{d}_{(i)} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{d}_{(i)} = [x_{(i)} \quad y_{(i)} \quad z_{(i)} \quad \theta_{x(i)} \quad \theta_{y(i)} \quad \theta_{z(i)} \quad x_{(i+1)} \quad y_{(i+1)} \quad z_{(i+1)} \quad \theta_{x(i+1)} \quad \theta_{y(i+1)} \quad \theta_{z(i+1)}]^T \quad (2.2)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_{x1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_{x2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{y1} & 0 & 0 & 0 & N_{y2} & 0 & N_{y3} & 0 & 0 & 0 & N_{y4} \\ 0 & 0 & N_{z1} & 0 & N_{z2} & 0 & 0 & 0 & N_{z3} & 0 & N_{z4} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$N_{x1} = 1 - \frac{x}{L}, \quad N_{x2} = \frac{x}{L}, \quad N_{y1} = 1 - 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 = N_{z1} \quad (2.4)$$

$$N_{y2} = L \left\{ \left(\frac{x}{L}\right) - 2\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right\} = -N_{z2}, \quad N_{y3} = 3\left(\frac{x}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 = N_{z3} \quad (2.5)$$

$$N_{y4} = L \left\{ -\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \left(\frac{x}{L}\right)^3 \right\} = -N_{z4}$$

式(2.2)内, x , y , z は x 軸, y 軸, z 軸方向の節点変位, θ_x は x 軸まわりのねじり角を表し, θ_y , θ_z はそれぞれ y 軸, z 軸まわりの撓み角を表す. 下添え字(i)および($i+1$)はそれぞれ第 i 節点と第 $i+1$ 節点を表す.

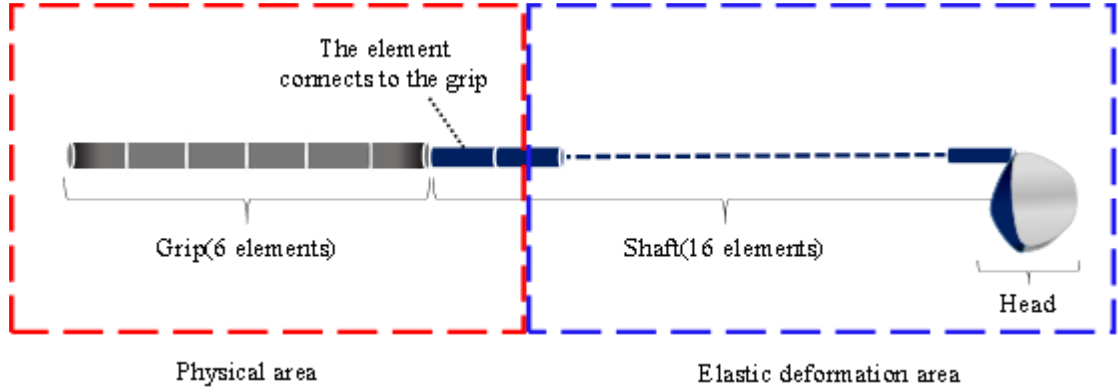


図 2.1 クラブの物理モデル

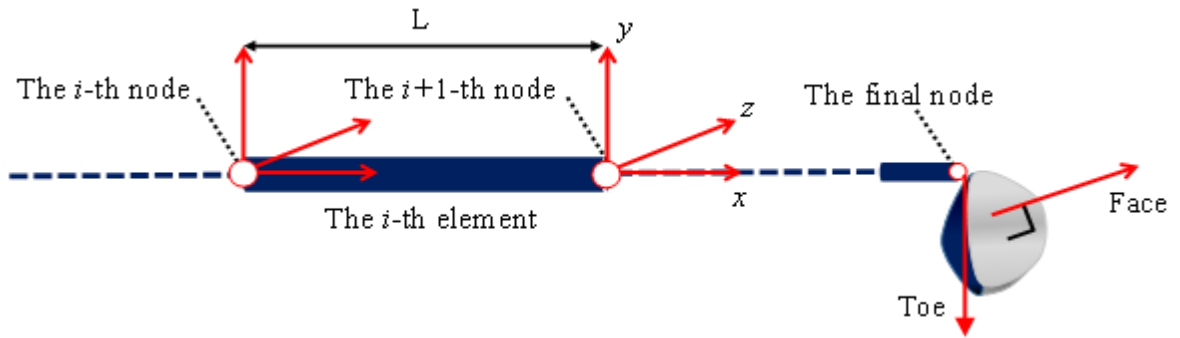


図 2.2 クラブの要素と節点

2.2.2 グリップ部, シャフト部の運動方程式

本項では, グリップ部, シャフト部の運動方程式を, リンクモデルに基づき導出する. リンクモデルと導出に必要なベクトルの関係を図 2.3 に示す. 慣性座標系 $[\vec{a}]$ の原点をゴルフボールの位置にとり, X 軸は背-腹方向, Y 軸は飛球線方向, Z 軸は地面に対して鉛直方向とする. 次に, グリップ部に物体固定座標系 $[\vec{b}]$ の原点をとる. この慣性座標系の原点から物体固定座標系の原点までの幾何ベクトルを \vec{r} , 物体固定座標系の原点からシャフト座標系の原点までの幾何ベクトルを $\vec{\rho}$, シャフト座標系からの変位を表す幾何ベクトルを \vec{n} とする. 慣性座標系の原点から第 i 要素の任意点までの幾何ベクトル \vec{u} は以下の式で表される.

$$\vec{u} = \vec{r} + \vec{\rho} + \vec{n} \quad (2.6)$$

$$\vec{r} = [\vec{a}] \hat{\mathbf{r}}, \quad \vec{\rho} = [\vec{b}] \mathbf{p}, \quad \vec{n} = [\vec{b}] \mathbf{n} \quad (2.7)$$

式(2.7)内, $\hat{\mathbf{r}}, \mathbf{p}, \mathbf{n}$ はそれぞれ $\vec{r}, \vec{\rho}, \vec{n}$ の代数ベクトルを表す. また, 慣性座標系から物体固定座標系への座標変換行列を $[S]$ とし, 座標系の関係は以下の式で表される.

$$[\vec{b}] = [\vec{a}][S] \quad (2.8)$$

$$[S]^T [S] = [S][S]^T = [I_{3 \times 3}] \quad (2.9)$$

式(2.9)内, $[I_{ij}]$ は i 行 j 列の単位行列を表す. また, 式(2.1)と式(2.7)より, 変形によって生じる仮想変位 $\delta \vec{n}$ は以下の式で表される.

$$\delta \vec{n} = [\vec{b}][N] \delta \mathbf{d}_{(i)} \quad (2.10)$$

ダランベールの原理に基づき, 式(2.10)より, 以下の式が得られる.

$$\langle \delta \vec{n}^T \cdot (\ddot{\vec{u}} - \vec{g}) \rangle = 0 \quad (2.11)$$

式(2.11)内, $\langle \rangle$ は質量積分, \vec{g} は重力加速度ベクトルを表す. 式(2.6), 式(2.10)を式(2.11)に代入し, 式(2.11)は以下の式に変形される.

$$\langle \delta \vec{n}^T \cdot (\ddot{\vec{u}} + \vec{g}) \rangle = \delta \mathbf{d}_{(i)}^T \langle [N]^T [\vec{b}]^T (\ddot{\vec{r}} + \ddot{\vec{\rho}} + \ddot{\vec{n}} - \vec{g}) \rangle = 0 \quad (2.12)$$

式(2.12)が常に成り立つためには, 以下の式が成り立たなければならない.

$$\left\langle [N]^T [\vec{b}]^T \left(\ddot{\vec{r}} + \ddot{\vec{\rho}} + \ddot{\vec{n}} - \vec{g} \right) \right\rangle = 0 \quad (2.13)$$

式(2.13)の各項はそれぞれ以下の式で表される．

$$\ddot{\vec{r}} = [\vec{a}] \ddot{\vec{r}} \quad (2.14)$$

$$\ddot{\vec{\rho}} = [\vec{b}] \left([\tilde{\omega}] [\tilde{\omega}] \mathbf{p} + [\dot{\tilde{\omega}}] \mathbf{p} \right) \quad (2.15)$$

$$[\tilde{\omega}] = [S]^T [\dot{S}] \quad (2.16)$$

$$\ddot{\vec{n}} = [\vec{b}] [N] \ddot{\mathbf{d}}_{(i)} \quad (2.17)$$

$$\vec{g} = [\vec{a}] \hat{\mathbf{g}} \quad (2.18)$$

式(2.15), (2.16)内, $[\tilde{\omega}]$ は角速度テンソル, 式(2.18)内, $\hat{\mathbf{g}}$ は慣性座標系における重力加速度の代数ベクトルを表す．そして, 式(2.13)に式(2.14)～式(2.18)を代入することで, 式(2.13)は以下の式に変形される．

$$\left\langle [N]^T [N] \right\rangle \ddot{\mathbf{d}}_{(i)} = - \left\langle [N]^T \left([\tilde{\omega}] [\tilde{\omega}] \mathbf{p} + [\dot{\tilde{\omega}}] \mathbf{p} + [S]^T (\ddot{\vec{r}} - \vec{g}) \right) \right\rangle \quad (2.19)$$

さらに, ねじりを考慮し, 運動エネルギーから質量マトリクス $[M]$, ポテンシャルエネルギーから剛性マトリクス $[K]$ を導出すると, 以下の第 i 要素の運動方程式が得られる．

$$[M]\ddot{\mathbf{d}}_{(i)} + [K]\mathbf{d}_{(i)} = -\langle [N]^T ([\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p} + [\dot{\tilde{\omega}}]\mathbf{p} + [S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}})) \rangle \quad (2.20)$$

式(2.20)より，全ての要素の運動方程式を算出し，以下の全体運動方程式が得られる．

$$[M_t]\ddot{\mathbf{d}}_t + [K_t]\mathbf{d}_t = -\langle [N_t]^T ([\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p} + [\dot{\tilde{\omega}}]\mathbf{p} + [S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}})) \rangle \quad (2.21)$$

式(2.21)内，下添え字 t は，各マトリクス，ベクトルを全要素で加算していることを表す (25), (26) ．

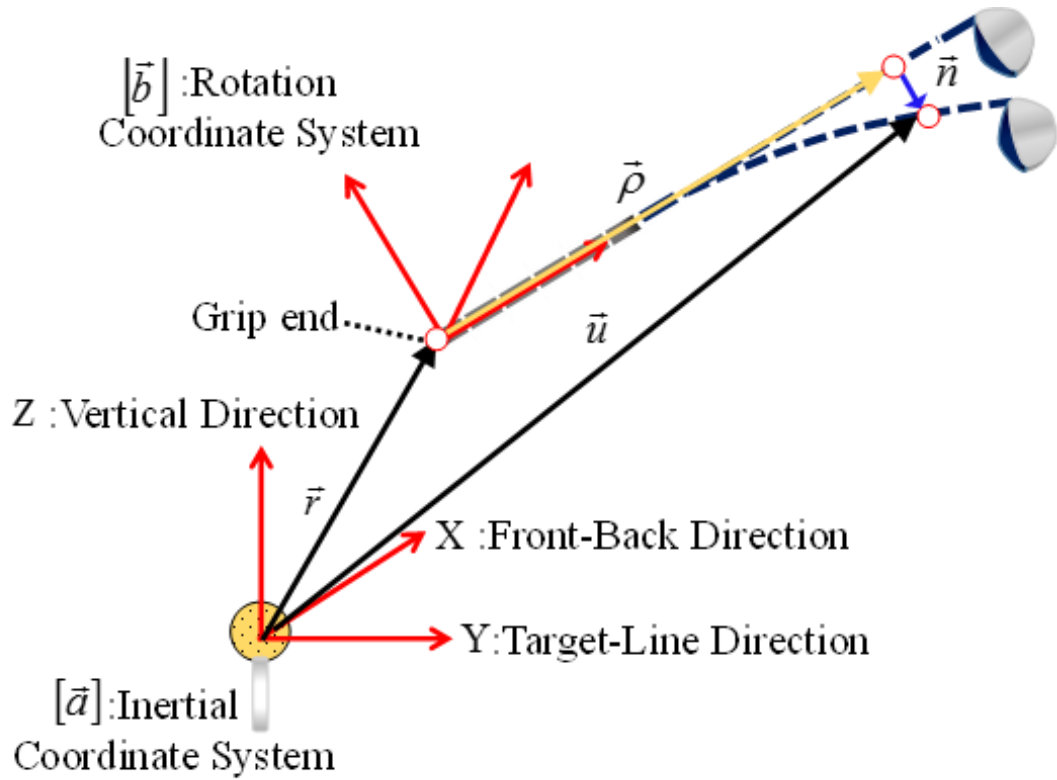


図 2.3 リンクモデルと各ベクトルの関係

2.2.3 ヘッド部の運動方程式

本項では，ヘッド部の運動方程式を剛体モデルに基づき導出する．剛体モデルと導出に必要なベクトルの関係を図 2.4 に示す．慣性座標系 $[\vec{a}]$ からヘッド部の任意点までの幾何ベクトルを \vec{u}_{head} とする．手首部にとった物体固定座標系原点から

無変形時のシャフト最終節点までの幾何ベクトルを $\vec{\rho}_e$ ，シャフト最終節点の変形による幾何ベクトルを \vec{n}_e ，変形後のシャフト最終節点からヘッド部の任意点までの幾何ベクトルを $\vec{\rho}_{head}$ とすると， \vec{u}_{head} は以下の式で表される．

$$\vec{u}_{head} = \vec{r} + \vec{\rho}_e + \vec{n}_e + \vec{\rho}_{head} \quad (2.22)$$

$$\vec{\rho}_e = [\vec{b}] \mathbf{p}_e, \quad \vec{n}_e = [\vec{b}] \begin{bmatrix} x_{(e)} & y_{(e)} & z_{(e)} \end{bmatrix}^T \quad (2.23)$$

式(2.23)内， \mathbf{p}_e は， $\vec{\rho}_e$ の物体固定座標系における代数ベクトルを表し， $x_{(e)}$ ， $y_{(e)}$ ， $z_{(e)}$ はそれぞれ x 軸， y 軸， z 軸方向のシャフト最終節点の節点変位を表す．また，図 2.4 に示すように，ヘッド部の任意点はシャフト最終節点の回転変位によってその位置が変化する．ヘッドの回転変位を微小と仮定すると， $\vec{\rho}_{head}$ は以下の式で表される．

$$\vec{\rho}_{head} = [\vec{b}] \mathbf{p}'_{head} + [\vec{b}] (\Delta \mathbf{p}_{\theta_x} + \Delta \mathbf{p}_{\theta_y} + \Delta \mathbf{p}_{\theta_z}) \quad (2.24)$$

$$\mathbf{p}'_{head} = [\rho'_x \quad \rho'_y \quad \rho'_z]^T \quad (2.25)$$

式(2.24)，式(2.25)内， \mathbf{p}'_{head} は無変形時のシャフト最終節点からヘッド部の任意点までの物体固定座標系における代数ベクトルを表し， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_x}$ ， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_y}$ ， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_z}$ はそれぞれ， x ， y ， z 軸回りの回転変位によるヘッドの任意点の位置変化量を表す．さらに，ヘッドの回転変位は微小であることより， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_x}$ ， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_y}$ ， $\Delta \mathbf{p}_{\theta_z}$ はそれぞれ以下の式で表される．

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{p}_{\theta_x} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{x(e)} & -\sin \theta_{x(e)} \\ 0 & \sin \theta_{x(e)} & \cos \theta_{x(e)} \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} \\
&\cong \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\theta_{x(e)} \\ 0 & \theta_{x(e)} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\theta_{x(e)} \rho'_z \\ \theta_{x(e)} \rho'_y \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{p}_{\theta_y} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{y(e)} & 0 & \sin \theta_{y(e)} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{y(e)} & 0 & \cos \theta_{y(e)} \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} \\
&\cong \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{y(e)} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\theta_{y(e)} & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} = \begin{bmatrix} \theta_{y(e)} \rho'_z \\ 0 \\ -\theta_{y(e)} \rho'_x \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \mathbf{p}_{\theta_z} &= \begin{bmatrix} \cos \theta_{z(e)} & -\sin \theta_{z(e)} & 0 \\ \sin \theta_{z(e)} & \cos \theta_{z(e)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} \\
&\cong \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{z(e)} & 0 \\ \theta_{z(e)} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{p}'_{head} - \mathbf{p}'_{head} = \begin{bmatrix} -\theta_{z(e)} \rho'_y \\ \theta_{z(e)} \rho'_x \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.28}$$

式(2.26)～(2.28)内， $\theta_{x(e)}$ ， $\theta_{y(e)}$ ， $\theta_{z(e)}$ はそれぞれ， x 軸， y 軸， z 軸回り最終節点の回転変位を表す．そして，式(2.24)～(2.28)より， $\bar{\rho}_{head}$ は以下の式に変形される．

$$\bar{\rho}_{head} = [\bar{b}] \mathbf{p}'_{head} + [\tilde{\rho}'_{head}]^T [\theta_{x(e)} \quad \theta_{y(e)} \quad \theta_{z(e)}]^T \tag{2.29}$$

式(2.29)内， $[\tilde{\rho}'_{head}]$ は無変形時のシャフト最終節点からヘッド部の任意点までの代数ベクトル \mathbf{p}'_{head} の反対称化テンソルである．式(2.29)より，最終節点の変形による仮想変位 $\delta \bar{\mathbf{n}}_{head}$ は以下の式で表される．

$$\delta \vec{n}_{head} = [\vec{b}] (\delta \vec{d}_e + [\tilde{\vec{p}}'_{head}]^T \delta \vec{\theta}_e) \quad (2.30)$$

$$\delta \vec{d}_e = [\delta x_{(e)} \quad \delta y_{(e)} \quad \delta z_{(e)}]^T, \quad \delta \vec{\theta}_e = [\delta \theta_{x(e)} \quad \delta \theta_{y(e)} \quad \delta \theta_{z(e)}]^T \quad (2.31)$$

さらに，ダランベールの原理より，以下の式が得られる．

$$\langle \delta \vec{n}_{head}^T \ddot{\vec{u}}_{head} \rangle = \langle (\delta \vec{d}_e^T + \delta \vec{\theta}_e^T [\tilde{\vec{p}}'_{head}]) [\vec{b}]^T (\ddot{\vec{r}} + \ddot{\vec{\rho}}_e + \ddot{\vec{n}}_e + \ddot{\vec{\rho}}_{head} - \vec{g}) \rangle = 0 \quad (2.32)$$

$$\ddot{\vec{\rho}}_e = [\vec{b}] ([\tilde{\vec{\omega}}][\tilde{\vec{\omega}}]\vec{\rho}_e + [\dot{\tilde{\vec{\omega}}}]\vec{\rho}_e), \quad \ddot{\vec{n}}_e = [\vec{b}]\ddot{\vec{d}}_e, \quad \ddot{\vec{\rho}}_{head} = [\vec{b}] ([\tilde{\vec{\omega}}][\tilde{\vec{\omega}}]\vec{\rho}'_{head} + [\dot{\tilde{\vec{\omega}}}]\vec{\rho}'_{head} + [\tilde{\vec{p}}'_{head}]^T \ddot{\vec{\theta}}_e) \quad (2.33)$$

式(2.32)が常に成り立つためには以下の2式が成り立つ必要がある．

$$\langle [\vec{b}]^T (\ddot{\vec{r}} + \ddot{\vec{\rho}}_e + \ddot{\vec{n}}_e + \ddot{\vec{\rho}}_{head} - \vec{g}) \rangle = 0 \quad (2.34)$$

$$\langle [\tilde{\vec{p}}'_{head}] [\vec{b}]^T (\ddot{\vec{r}} + \ddot{\vec{\rho}}_e + \ddot{\vec{n}}_e + \ddot{\vec{\rho}}_{head} - \vec{g}) \rangle = 0 \quad (2.35)$$

式(2.14)，式(2.18)，式(2.33)を式(2.34)に代入して

$$\langle [S]^T (\ddot{\vec{r}} - \vec{g}) + [\tilde{\vec{\omega}}][\tilde{\vec{\omega}}]\vec{\rho}_e + [\dot{\tilde{\vec{\omega}}}]\vec{\rho}_e + \ddot{\vec{d}}_e + [\tilde{\vec{\omega}}][\tilde{\vec{\omega}}]\vec{\rho}'_{head} + [\dot{\tilde{\vec{\omega}}}]\vec{\rho}'_{head} + [\tilde{\vec{p}}'_{head}]^T \ddot{\vec{\theta}}_e \rangle = 0 \quad (2.36)$$

となる．さらに，式(2.36)の質量積分の積分範囲を重心回りにとると，

$$\langle \vec{\rho}'_{head} \rangle = 0 \quad (2.37)$$

となるので，式(2.36)は以下の式に変形される．

$$m_{head}\ddot{\mathbf{d}}_e = -\left([S]^T(\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}}) + [\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p}_e + [\tilde{\omega}]\dot{\mathbf{p}}_e\right) \quad (2.38)$$

m_{head} はヘッドの質量を表す．同様に，式(2.35)は

$$\left\langle [\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\tilde{\mathbf{p}}'_{head} + [\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\dot{\omega}}]\tilde{\mathbf{p}}'_{head} + [\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\mathbf{p}}'_{head}]^T\ddot{\boldsymbol{\theta}}_e \right\rangle = 0 \quad (2.39)$$

$$\left\langle [\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\tilde{\mathbf{p}}'_{head} \right\rangle = \left\langle [\tilde{\omega}][\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\mathbf{p}}'_{head}]^T + ([\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\mathbf{p}}'_{head}]^T - (\rho_x'^2 + \rho_y'^2 + \rho_z'^2))[\tilde{\omega}] \right\rangle \boldsymbol{\omega} \quad (2.40)$$

となるので，式(2.39)，式(2.40)より，以下のクラブヘッドの回転の運動方程式が得られる．

$$[J]\ddot{\boldsymbol{\theta}}_e = -([\tilde{\omega}][J]\boldsymbol{\omega} + [J]\dot{\boldsymbol{\omega}}) \quad (2.41)$$

$$[J] = \left\langle [\tilde{\mathbf{p}}'_{head}][\tilde{\mathbf{p}}'_{head}]^T \right\rangle \quad (2.42)$$

$[J]$ はヘッド重心回りの慣性モーメントテンソル， $\boldsymbol{\omega}$ は物体固定座標系における角速度ベクトルを表す^{(25), (26), (27)}．

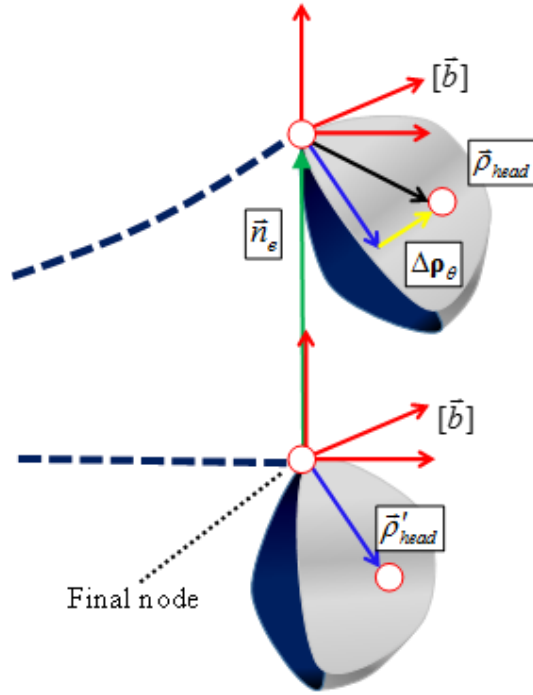


図 2.4 クラブヘッドの変形と各ベクトルの関係

2.2.4 クラブの運動方程式

式(2.21), 式(2.38), 式(2.41) より, 以下の非減衰系のクラブの運動方程式が得られる^{(25), (26)}.

$$[M_R]\ddot{\mathbf{d}}_t + [K_t]\mathbf{d}_t = \mathbf{F} \quad (2.43)$$

$$[M_R] = \left[[M_t] + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{132 \times 132} & \mathbf{0}_{132 \times 6} \\ \mathbf{0}_{6 \times 132} & m_{head} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \right] \quad (2.44)$$

$$\mathbf{F} = -\left\langle [N_t]^T \left([\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p} + [\dot{\tilde{\omega}}]\mathbf{p} + [S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}}) \right) \right\rangle + \left[\begin{array}{l} \mathbf{0}_{132 \times 1} \\ -\left\langle [S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}}) + [\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p}_e + [\dot{\tilde{\omega}}]\mathbf{p}_e \right\rangle \\ -([\tilde{\omega}][J]\dot{\omega} + [J]\dot{\omega}) \end{array} \right] \quad (2.45)$$

2.3 把持モデルの構築

ゴルファーの把持条件は固定端のように硬い条件ではなく, 柔軟な手の動きを伴うものである. この柔軟性によって, クラブの振動特性が変化する. そこで, このゴルファーの柔軟な把持条件を表現することを目的として, 本研究ではゴル

ファースの把持条件をバネ要素によって再現し、実験結果に基づきこのパラメータを同定し、把持機構がもたらす拘束の影響を考慮したモデルを構築する。以下、このモデルについて説明する。

2.3.1 把持を考慮した運動方程式

グリップ部(第1節点から第7節点まで)に任意の要素*i*をとる。要素*i*において、グリップ部の変位によって蓄えられるポテンシャルエネルギーは以下の式で表される。

$$U_x = \frac{1}{2}k_x \int_0^L u^2 dx, \quad U_y = \frac{1}{2}k_y \int_0^L v^2 dx, \quad U_z = \frac{1}{2}k_z \int_0^L w^2 dx \quad (2.46)$$

$$U_{\theta_x} = \frac{1}{2}k_{\theta_x} [\theta_{x(i)} \quad \theta_{x(i+1)}]^T \int_0^L [N_{x1} \quad N_{x2}]^T [N_{x1} \quad N_{x2}] dx [\theta_{x(i)} \quad \theta_{x(i+1)}] \quad (2.47)$$

式(2.46)内、 k_x , k_y , k_z はそれぞれ各方向の変位に対するバネ定数を表し、式(2.47)内、 k_{θ_x} は x 軸回りの回転に対する回転バネ定数を表す。式(2.46)、式(2.47)より、各方向に働く把持力、各軸回りの把持トルクは以下の式で表される。

$$\mathbf{F}_{G(i)} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x_{(i)}} & \frac{\partial U_y}{\partial y_{(i)}} & \frac{\partial U_z}{\partial z_{(i)}} & \frac{\partial U_{\theta_x}}{\partial \theta_{x(i)}} & \frac{\partial U_z}{\partial \theta_{y(i)}} & \frac{\partial U_y}{\partial \theta_{z(i)}} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

式(2.48)より、グリップ部全体の把持力 \mathbf{F}_G は、以下の式で表される。

$$\mathbf{F}_G = -[K_G] \mathbf{d}_{t42 \times 1} \quad (2.49)$$

$[K_G]$ は把持剛性、 $\mathbf{d}_{t42 \times 1}$ は \mathbf{d}_t の1行目から42行目までを表す。式(2.43)、式(2.49)より、以下の把持を考慮した運動方程式が得られる^{(25), (26), (27)}。

$$[M_R] \ddot{\mathbf{d}}_t + [K_R] \mathbf{d}_t = \mathbf{F} \quad (2.50)$$

$$(2.51)$$

$$[K_R] = [K_t] + \begin{bmatrix} [K_G] & \mathbf{0}_{42 \times 96} \\ \mathbf{0}_{96 \times 42} & \mathbf{0}_{96 \times 96} \end{bmatrix}$$

2.3.2 把持剛性の変化

スイング中の把持剛性はゴルファーの筋力や把持条件によって変化すると考えられる．本章では，式(2.46)，式(2.47)内，各方向のバネ定数を変化させ，ゴルファーの筋力や把持条件を表現する．このバネ定数の変化を，フェース方向において図 2.5，トゥ方向において図 2.6 に示す．アドレス(図内○印以下同)からダウンスイングへ切り替わるトップのタイミング(図内*印以下同)まではバネ定数は一定とし，トップからインパクト((図内△印以下同)にかけては線形的に変化させる．また，このバネ定数の変化を表現するために必要なパラメータの数は，アドレスからトップまでの一定値 $k_{constant}$ とインパクト時におけるバネ定数 k_{impact} の二つとなる．各パラメータの推定方法は 2.5 節で説明する．また，式(2.46)，式(2.47)内， x 軸方向のバネ定数， x 軸回りの回転バネ定数は，それらの方向の変位，回転がその他の変位，回転に比べ小さいことより，固定端相当の値を与える^{(25), (28)}

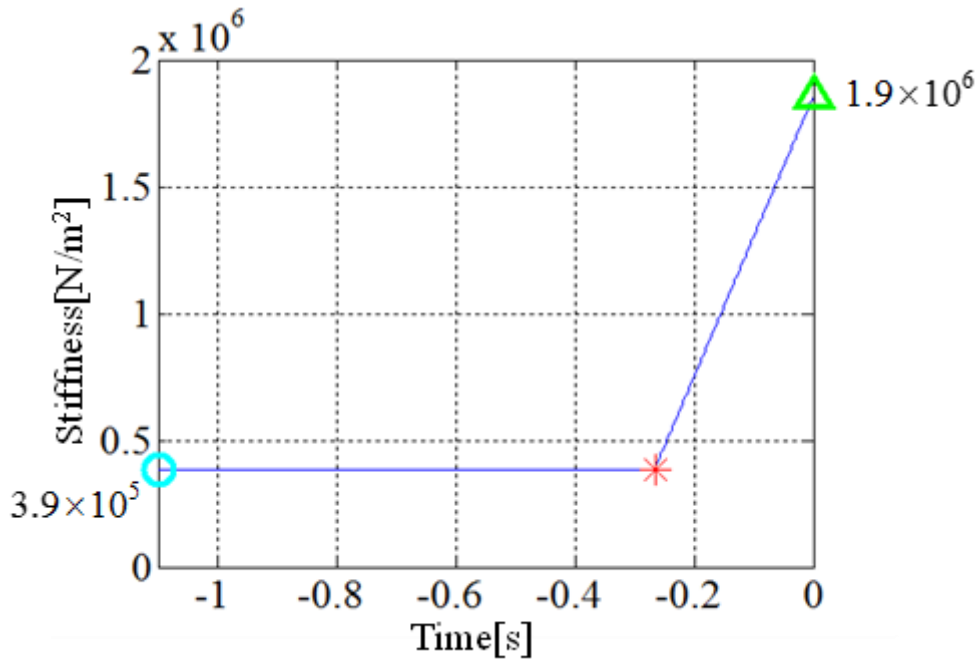


図 2.5 フェース方向におけるバネ定数の変化

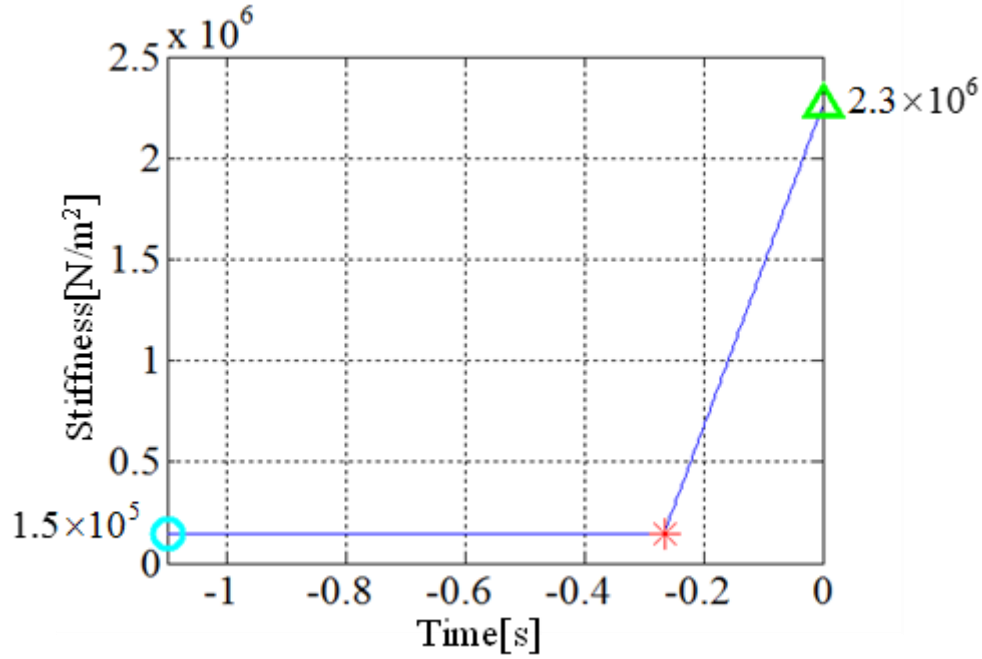


図 2.6 トゥ方向におけるバネ定数の変化

2.4 ヒトの運動特性を考慮したクラブ運動方程式

式(2.50)に示した把持を考慮した運動方程式に、シャフトの減衰を考慮することで、ヒトの運動特性とクラブの動特性を組み合わせた全系の運動方程式が構築可能となる。シャフトの減衰を算出することを目的として、式(2.50)内、質量マトリクス $[M_R]$ 、剛性マトリクス $[K_R]$ を、以下のように、物理領域、弾性変形領域に分割する。

$$[M_R] = \begin{bmatrix} M_{48 \times 48} & M_{48 \times 90} \\ M_{90 \times 48} & M_{90 \times 90} \end{bmatrix}, \quad [K_R] = \begin{bmatrix} K_{48 \times 48} & K_{48 \times 90} \\ K_{90 \times 48} & K_{90 \times 90} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

式(2.52)内、 M_{ij} は質量マトリクス内の i 行 j 列のマトリクス、 K_{ij} は剛性マトリクス内の i 行 j 列のマトリクスを表す。 $M_{90 \times 90}$ は固定端条件の弾性変形領域の質量マトリクス、 $K_{90 \times 90}$ は固定端条件の弾性変形領域の剛性マトリクスを表す。そして、 $M_{90 \times 90}$ 、 $K_{90 \times 90}$ から特性方程式を求め、拘束モードマトリクス $[\phi]$ 、固有振動数を対角にまとめたマトリクス $[\Omega]$ を算出する。そして、モード減衰比を対角にまとめたマトリクス $[\zeta]$ より、減衰マトリクスは以下の式で表される。

$$[C_R] = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{48 \times 48} & \mathbf{0}_{48 \times 90} \\ \mathbf{0}_{90 \times 48} & 2M_{90 \times 90}[\phi][\zeta][\Omega][\phi]^T M_{90 \times 90} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

式(2.50), 式(2.53)より, 以下のヒトの運動特性を考慮したクラブの全系の運動方程式が得られる^{(26), (27)}.

$$[M_R]\ddot{\mathbf{d}}_t + [C_R]\dot{\mathbf{d}}_t + [K_R]\mathbf{d}_t = \mathbf{F} \quad (2.54)$$

2.5 解析方法

2.5.1 計測

被験者はアベレージゴルファー1名(身長 170[cm], 体重 72[kg], 平均スコア 90 程度)を対象として計測を実施した. スイング中のシャフト撓み挙動の計測には, モーションキャプチャシステム (VICON 社製) を使用し, サンプル周波数は 500[Hz]として計測を行った. 計測時, クラブに貼り付けたマーカ配置を図 2.7 に示す.

次に, 計測を行った座標系について説明する. 身体の背・腹方向を X 軸, 飛球線方向を Y 軸, 鉛直方向 (重力加速度と反対の向きを正方向) を Z 軸として, 座標系を図 2.8 に示す.

1 回の計測ではアドレスからフォロースルーまでのクラブの 3 次元挙動を取得し, 計測回数は 20 回とした. 計測時, 被験者はティアップされたスポンジボールをドライバーで打ち, ティの高さは違和感がない程度に設置した. 被験者には事前に無理のないスイングを心がけるように通知し, 各試行の時間間隔は被験者が無理なくスイングを可能なタイミングで行った. 以上の計測より, 各試行の各マーカの 3 次元位置座標データを取得した⁽²⁷⁾.

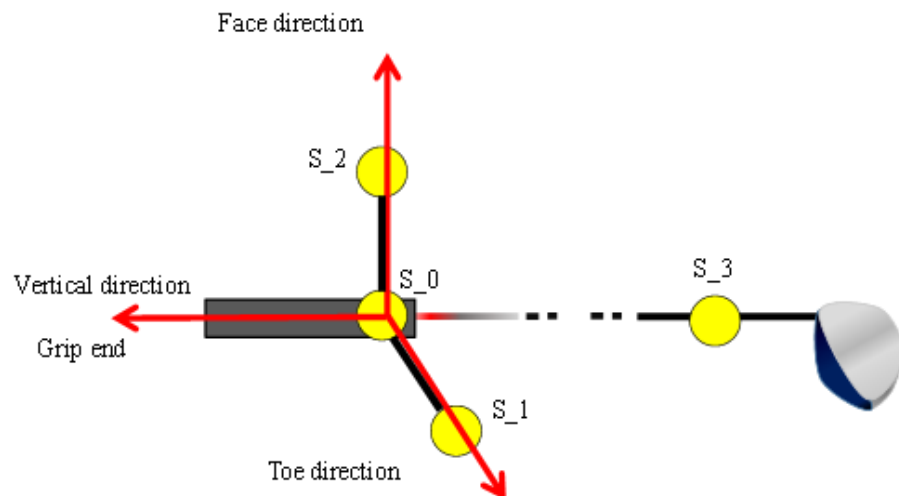


図 2.7 クラブに配置したマーカ

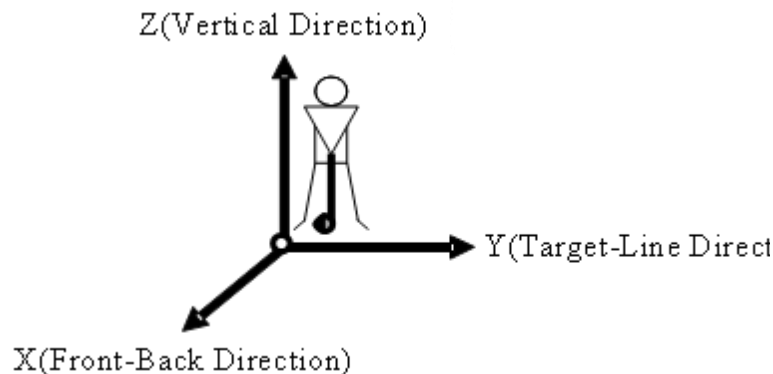


図 2.8 計測座標系

2.5.2 グリップ座標系の定義

図 2.7 に示したクラブに配置した 4 点のマーカの内の, S_0 , S_1 , S_2 マーカの配置からグリップ部に固定した座標系を算出する. グリップ座標系の各方向は以下のように定義される. 初めに, S_0 マーカと S_1 マーカとを結ぶ方向をトゥ方向とする. 次に, S_0 マーカと S_2 マーカとを結ぶベクトルをフェース方向とする. 最後に, トゥ方向とフェース方向ベクトルとの外積から算出されるベクトルの方向を, 鉛直方向とする. そして, これらの 3 方向のベクトルによって, グリップ座標系を定義した.

次に, 計測を行った座標系について説明する. 身体の背・腹方向を X 軸, 飛球線方向を Y 軸, 鉛直方向 (重力加速度と反対の向きを正方向) を Z 軸として, 座標系を図 2.8 に示す⁽²⁷⁾.

2.5.3 シャフト挙動の計測

本章ではシミュレーション結果の妥当性を検証することを目的として, シミュレーション結果と計測データから算出したシャフト撓み挙動 (以後, モーションデータと呼称) との比較を行う. モーションデータの算出方法を図 2.9 に示す. 図 2.9 より, 無変形時の S_3 マーカ位置座標はグリップ座標系(図 2.7)の鉛直軸方向負の向きに沿って, あらかじめ計測した無変形時のグリップ座標系原点とマーカ S_3 との距離だけ離れた位置に取られる. また, 変形時の S_3 マーカの位置座標は計測した S_3 マーカの 3 次元位置座標データをグリップ部座標系に座標変換することによって得られる. これらの差分をフェース方向, トゥ方向において求め, モーションデータを算出した. 各試行でモーションデータを算出し, 20 球分のデータから四分位範囲内に入るものを評価データとした⁽²⁹⁾. 評価データの平均値の撓み挙動をフェース方向において図 2.10, トゥ方向において図 2.11 に示す.

図内黒線は評価データから算出した各時刻における標準偏差である．図 2.10 より，アドレス，インパクト時に標準偏差が大きくなっていることがわかる．この要因として以下のことが考えられる．アドレス，インパクト時に一部のマーカが手首と体によって隠れ，フェース方向またはトゥ方向が変化する．その変化によって，図 2.9 における Vertical direction の方向が変化する．その結果，アドレス，インパクト時には図 2.9 における無変形時の S_3 マーカ位置座標が実際のグリップの延長線上からずれ，計測された S_3 マーカとの相対的位置から算出した撓み量の値が変化したと考えられる^{(26), (27)}．

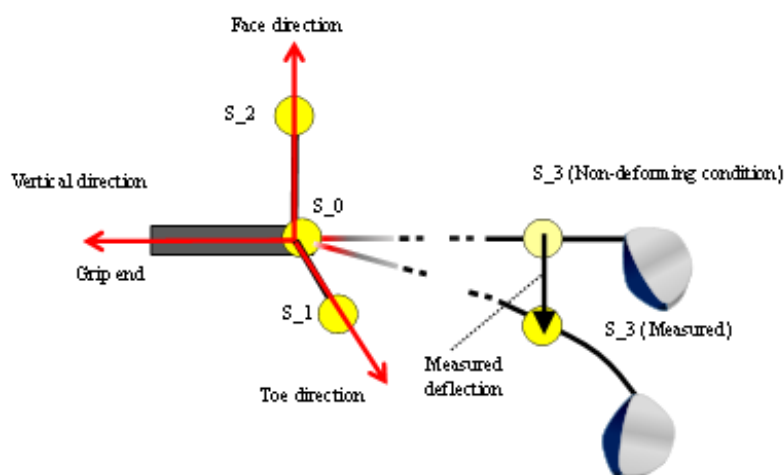


図 2.9 マーカを用いた計測時のシャフト挙動の算出方法

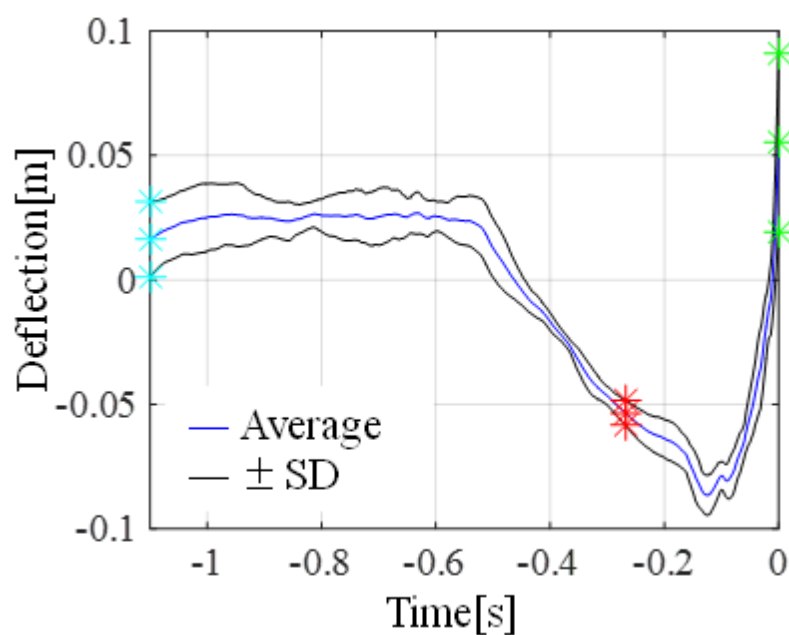


図 2.10 フェース方向におけるモーションデータの平均値と標準偏差

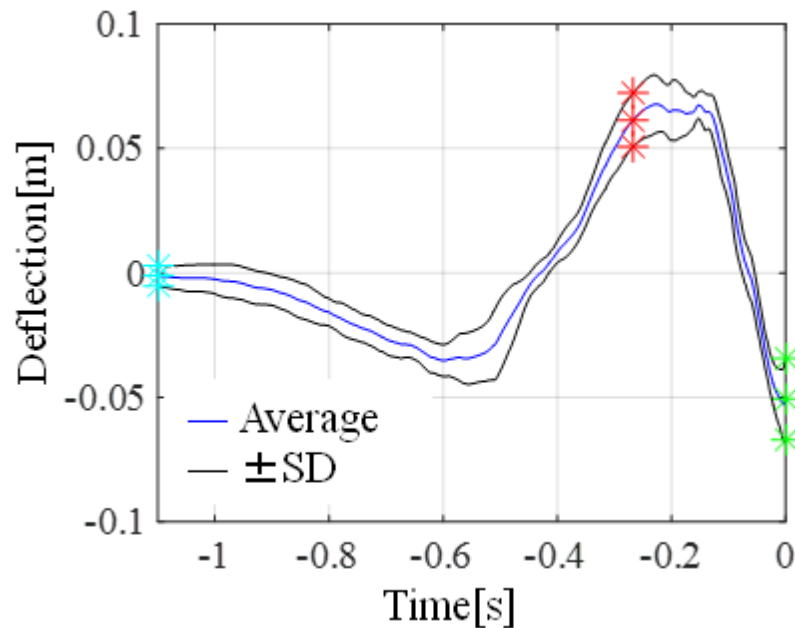


図 2.11 トゥ方向におけるのモーションデータの平均値と標準偏差

2.5.4 加速度，角速度，角加速度の算出

シャフト挙動のシミュレーションを行うためには式(2.45)の右辺に含まれる手首部の加速度，角速度，角加速度を算出する必要がある．加速度の算出には中心差分法を用いた．全体座標系原点の3次元位置座標データの中心差分より速度のデータを求め，速度データの中心差分より全体座標系での加速度を算出した．この全体座標系での加速度をグリップ座標系に座標変換し，式(2.45)の右辺に含まれる手首部の加速度を算出した．角速度はグリップ座標系よりクォータニオンを算出し，クォータニオンと角速度の関係より算出した．そして，角速度の中心差分より式(2.45)の右辺に含まれる手首部の角加速度を算出した⁽²⁷⁾．

2.5.5 シャフト挙動予測

式(2.54)に示した運動方程式に対して，ニューマーク β 法($\beta=0.25$)によって数値積分を行い，スイング中のシャフト撓み挙動を求めた．式(2.45)の右辺における手首部の加速度，角速度，角加速度は，モーションキャプチャシステムより得られた3次元位置座標データによって算出した．これらのプログラムはMATLABによって作成した．さらに，本章では解析条件として固定端条件と把持条件でシャフト撓み挙動の予測を行い，代表例1球を用いて得られたシミュレーション結果の比較を行う⁽²⁵⁾．

2.5.6 把持モデルのパラメータ推定

把持モデルの各パラメータは，グリップ部全ての節点で同一方向の把持剛性は一定とし，減衰比は同一方向の全ての次数のモードで一定とした．また，各把持条件で推定するパラメータは，把持剛性一定の場合，フェース方向と，トゥ方向の二方向において，アドレスからインパクトまでのバネ定数の2パラメータを推定した．把持剛性が変化する場合，図 2.5，図 2.6 に示したアドレスからトップまでの一定値 $k_{constant}$ および，インパクト時におけるバネ定数 k_{impact} を各方向において推定し，計 4 パラメータを推定した．パラメータ推定は，モーションキャプチャシステムによって得られた撓み時系列データと，シミュレーションによって得られた撓み時系列データとの残差平方和から算出した下式を目的関数とし⁽²⁵⁾，これを最小化するように行った．

$$J = n \log \{ (\mathbf{d}_{MotFace} - \mathbf{d}_{SimFace})^2 + (\mathbf{d}_{MotToe} - \mathbf{d}_{SimToe})^2 \} \quad (2.55)$$

式(2.55)内， n は時系列データの要素数を表し， $\mathbf{d}_{MotFace}$ はフェース方向のモーションデータ， \mathbf{d}_{MotToe} はトゥ方向のデータ， $\mathbf{d}_{SimFace}$ はフェース方向のシミュレーション撓み時系列， \mathbf{d}_{SimToe} はトゥ方向のシミュレーション撓み時系列を表す．パラメータ推定には Nelder-Mead-Simplex 法を用い，MATLAB の `fminsearch` を使用した⁽²⁵⁾．

2.6 シミュレーションモデルの評価

2.6.1 慣性力の評価

計測によって得られた加速度，角速度，角加速度を式(2.54)の右辺に代入し，シャフトに加わる慣性力を算出する．最終節点の慣性力の時系列を，フェース方向において図 2.12 に，トゥ方向において図 2.13 に示す．縦軸は各方向の慣性力，横軸は解析時間を表す．0[s]をインパクトの時刻とし，アドレスからインパクトまでの慣性力を算出した．また，図 2.8 に示した座標系における YZ 平面に，シャフトの3次元挙動を投影し，アドレス時のシャフトとの相対角の大きさが最大になるタイミングをトップとした．図 2.12，図 2.13 より，各時系列データにはノイズが見られる．このノイズの原因として加速度，角加速度を算出時に中心差分を行ったことによって，元の計測データのノイズが増幅され，それらが慣性力に影響しているためであると考えられる．図 2.12 より，フェース方向の慣性力において，-0.5[s]からトップにかけて負の方向に力が生じ，インパクトに向けて正の方向に力が生じていることがわかる．このことより，フェース方向においては先行研究⁽¹¹⁾，⁽¹²⁾で見られるような撓みを蓄積させインパクトに向けてしなり戻りを生じさせる力が再現できていることがわかる．また，図 2.13 より，-0.5[s]からト

ップにかけて力が緩やかに上昇し，インパクトに向けて負の方向に力が生じていることがわかる．このことより，トゥ方向においても先行研究⁽¹¹⁾，⁽¹²⁾で見られるトゥアップ，トゥダウンを生じさせる力が再現できていることがわかる⁽²⁵⁾．

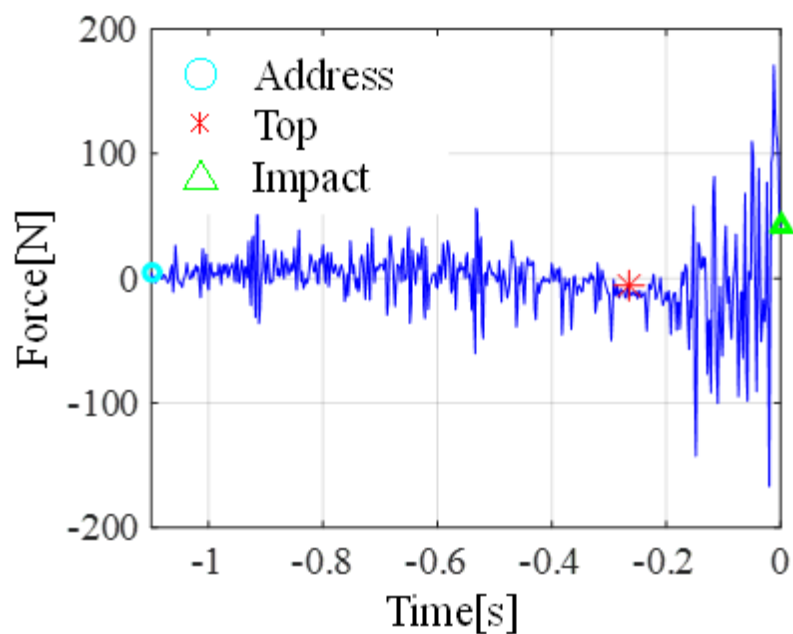


図 2.12 フェース方向における慣性力

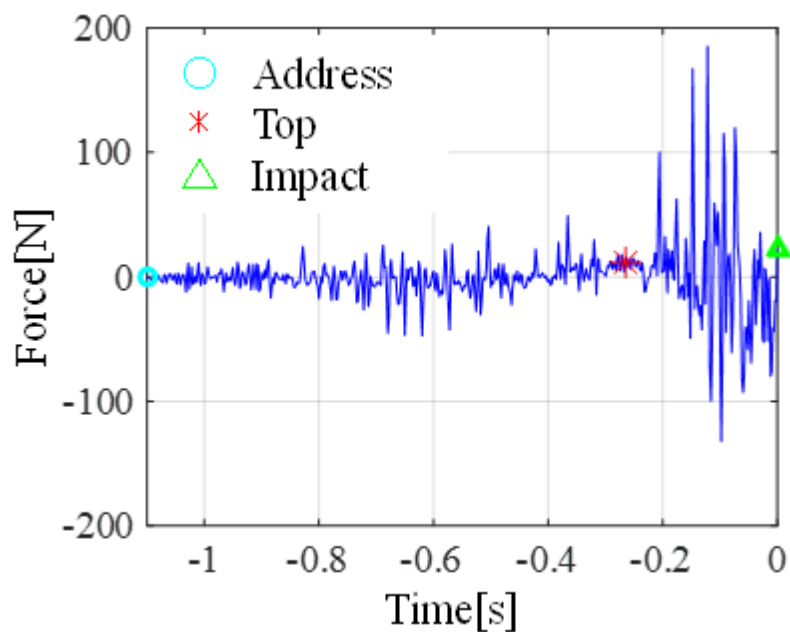


図 2.13 トゥ方向における慣性力

2.6.2 固定端条件におけるクラブ固有振動数の比較

スイング中のシャフト撓み挙動のシミュレーションを行うために、シミュレーションモデルの有効性を検証する。有効性を検証することを目的として、グリップを固定した状態で、ハンマリング試験によって求めた固有振動数と、シミュレーションモデルから求めた不減衰固有振動数とを比較する。その結果、実験の固有振動数は 4.16[Hz]であり、シミュレーションモデルでは 4.25[Hz]となり、本研究のシミュレーションモデルは実験時のクラブの振動成分を概ね再現できることがわかった。

2.6.3 シャフト撓み挙動の比較

スイング中のシャフト撓み挙動について、モーションデータと固定端条件でのシミュレーション結果、把持条件でのシミュレーション結果を比較した図を、図 2.14、図 2.15 に示す。図 2.14 はフェース方向の撓み時系列、図 2.15 はトゥ方向の撓み時系列を表す。これらの図から撓み挙動の傾向を比較する。図 2.14 の固定端条件、把持条件でのシミュレーション結果より、-0.5[s]からトップにかけて負の方向に撓みが蓄積し、インパクトに向けて撓み戻りが発生していることがわかる。また、モーションデータにおいても同様な傾向が見られることがわかる。次に、図 2.15 の固定端条件、把持条件でのシミュレーション結果より、-0.5[s]からトップにかけてシャフトがトゥアップし、インパクトに向けてトゥダウンしていることがわかる。そして、モーションデータにおいても同様な傾向が見られる。以上の結果より、本研究で構築したシミュレーションモデルによって、スイング中に発生する撓み挙動の傾向を再現できることがわかる。さらに、モーションデータとシミュレーション結果の撓み量を比較することを目的として、フェース方向、トゥ方向におけるシミュレーション結果とモーションデータの差分を算出した結果を、フェース方向において図 2.16 に、トゥ方向において図 2.17 に示す。図 2.16 より、フェース方向においてトップでの差をそれぞれの条件で求めると、固定端条件では 2.9[cm]、把持条件では 1.0[cm]となった。インパクトにおいては、固定端条件では-3.4[cm]、把持条件では-4.3[cm]となった。また、図 2.17 からトゥ方向においても同様に差を求めると、トップでは、固定端条件で-5.3[cm]、把持条件で-2.1[cm]、インパクトでは、固定端条件で-3.3[cm]、把持条件で-4.9[cm]となった。以上の結果より、トップでは把持条件のシミュレーション結果の方がよりモーションデータに近く、インパクトでは固定端条件の方がよりモーションデータに近いことがわかる。したがって、トップでは把持条件の方がモーションデータに近いことから、アドレスからトップまではグリップ部を柔らかく使いシャフトに撓みを蓄積させていると考えられる。また、インパクトでは、固定端条件の方がモーションデータに近いことより、インパクトにかけてはグリップを硬く

使うことによって蓄積した撓みを復元させ、より大きなしなりを発生させていると考えられる⁽²⁵⁾。

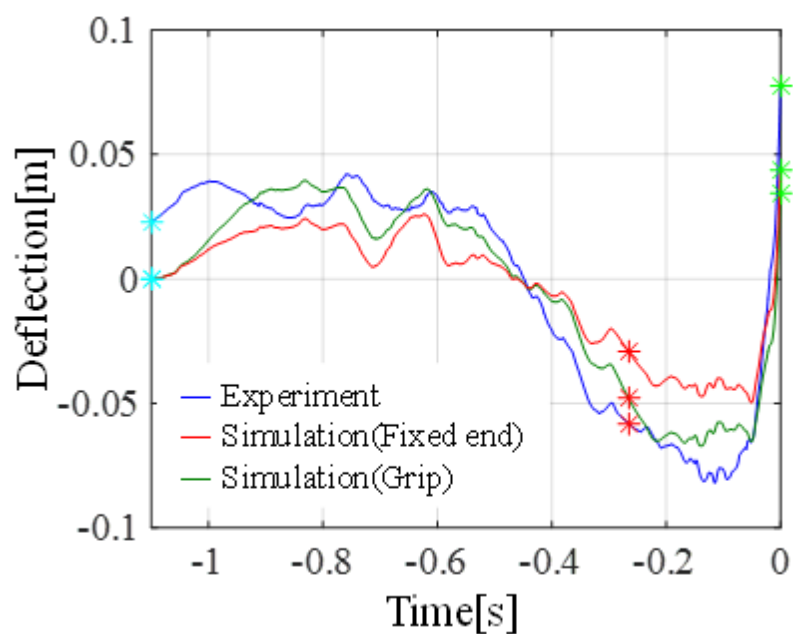


図 2.14 フェース方向におけるモーションデータとシミュレーション結果撓み挙動

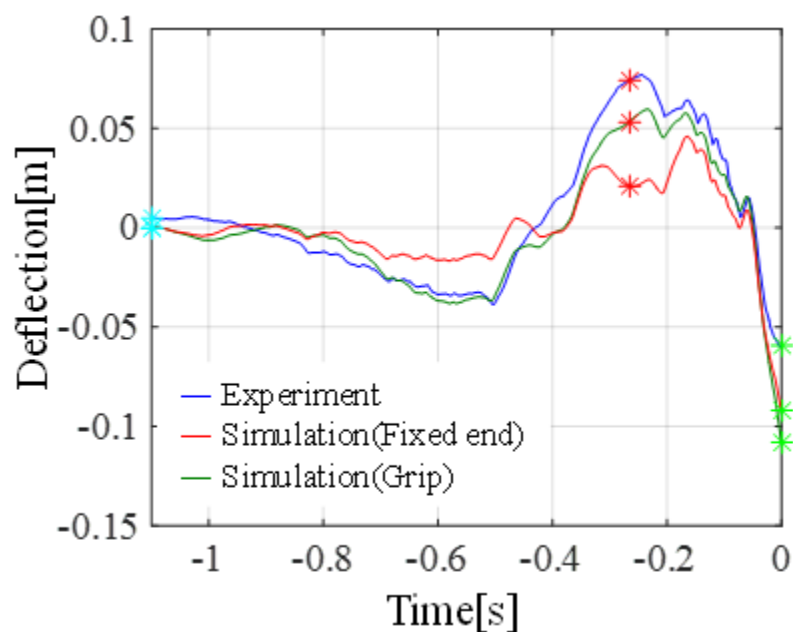


図 2.15 トウ方向におけるモーションデータとシミュレーション結果撓み挙動

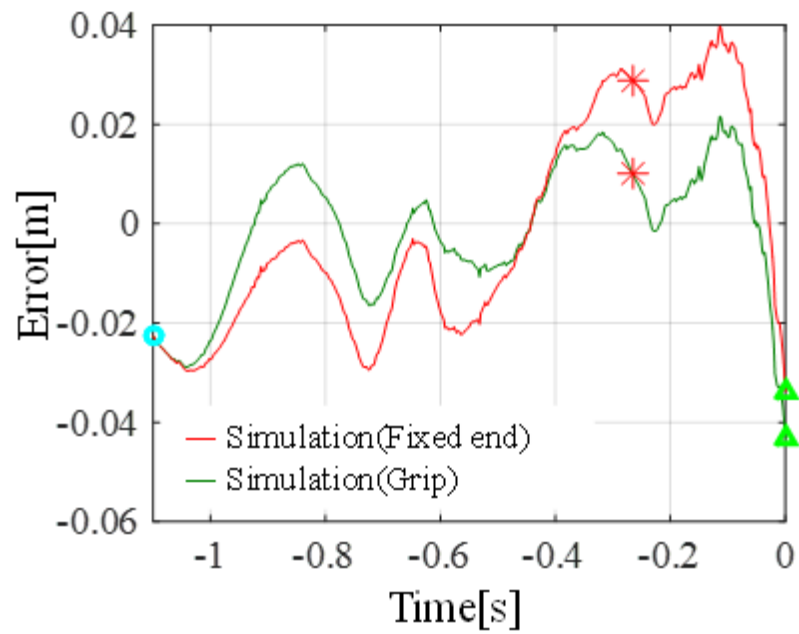


図 2.16 フェース方向におけるモーションデータとシミュレーション結果との差分

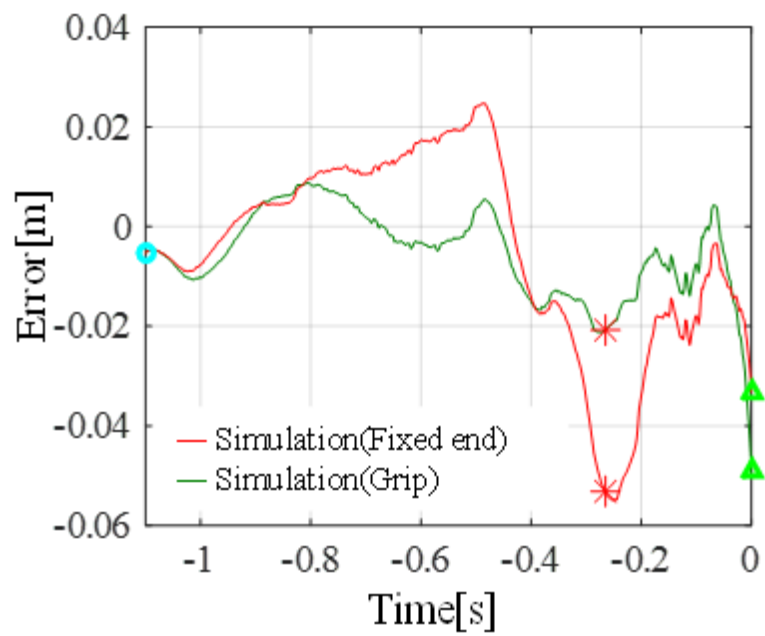


図 2.17 トゥ方向におけるモーションデータとシミュレーション結果との差分

2.6.4 周波数解析

本研究で構築したシミュレーションモデルの有効性を検証することを目的として、シミュレーション結果に周波数解析を実施した。周波数解析には、ウェルチのパワースペクトル密度推定を行い^{(30), (31)}、各撓み時系列におけるパワースペクトル密度(PSD)を求めた。この時、窓関数はハミングウィンドウを用い、オーバーラップは50%とし、MATLABのpwelch関数によってPSDを推定した。その結果をフェース方向において図2.18に、トゥ方向において図2.19に示す。図2.18、図2.19より、低周波域(0~7[Hz])において、把持条件でのPSDの方が固定端条件に比べモーションデータのPSDに近いことがわかる。さらに、図2.12、図2.13に示した慣性力においてPSDを算出した結果を図2.20、図2.21に示す。図2.20、図2.21より、3[Hz]以下の周波数領域にて、主要なPSDが占められていることがわかる。これは実験で求めた固有振動数4.25[Hz]と比べ小さく、ゴルフクラブにはクラブの固有振動数より低い周期の外力が加わっていることがわかる。このことより、クラブに加わる外力を強く励起させるためには、グリップの把持条件をより柔らかくし、クラブの固有振動数を下げることがあると考えられる。以上の結果より、グリップを柔らかく使うことによって、手首とクラブによって構成される系の固有振動数が低下し、それに伴い慣性力の低周波成分が励起され、図2.14、図2.15における、トップでの大きな撓みが発生したと考えられる。また、図2.18、図2.19の10[Hz]付近より、固定端でのPSDが高くなり、モーションデータのPSDが一番低くなっていることがわかる。以上より、実験でのスイングでは、10[Hz]付近での挙動を抑えるような減衰がグリップ部で働いている、あるいは、その挙動を抑える力が働いていると考えられる。したがって、シミュレーションの精度を向上させるには、10[Hz]付近での挙動を改善する必要があると考えられる⁽²⁵⁾。

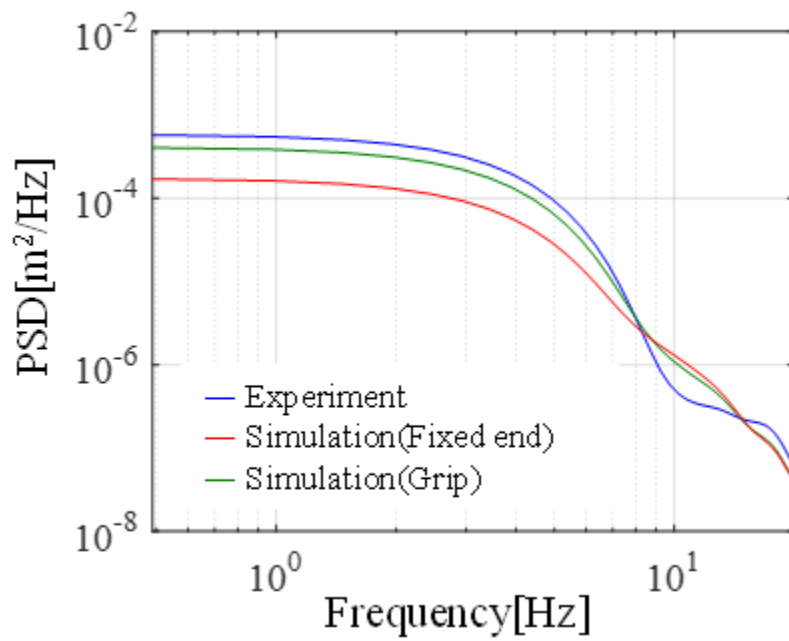


図 2.18 フェース方向におけるモーションデータとシミュレーション結果の PSD 線図

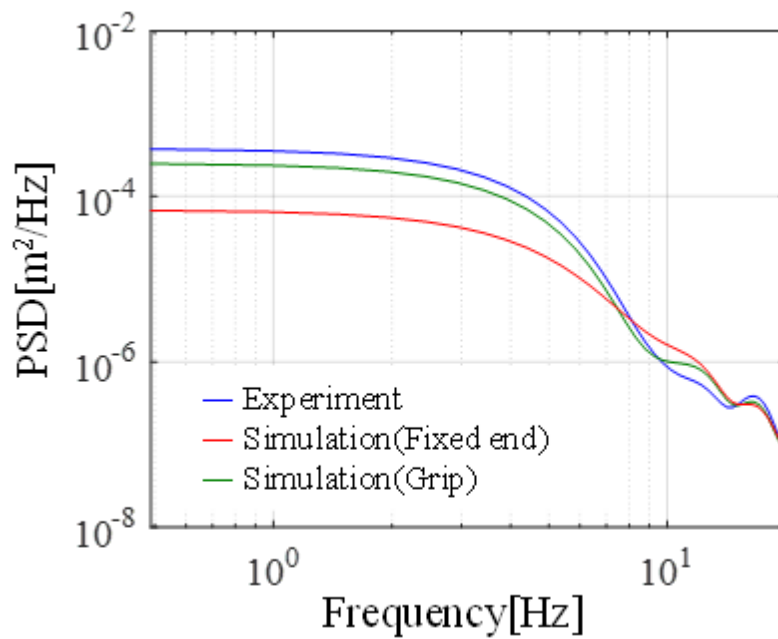


図 2.19 トウ方向におけるモーションデータとシミュレーション結果の PSD 線図

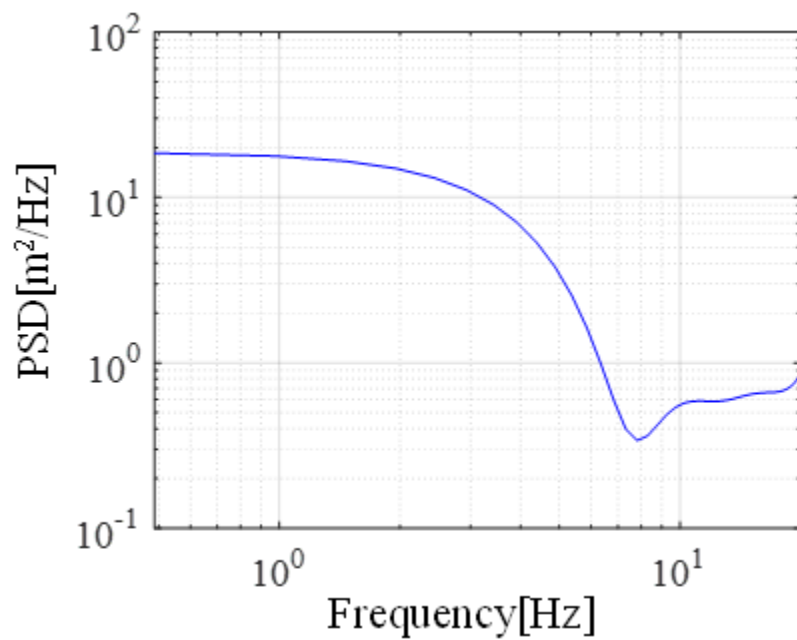


図 2.20 フェース方向における慣性力の PSD 線図

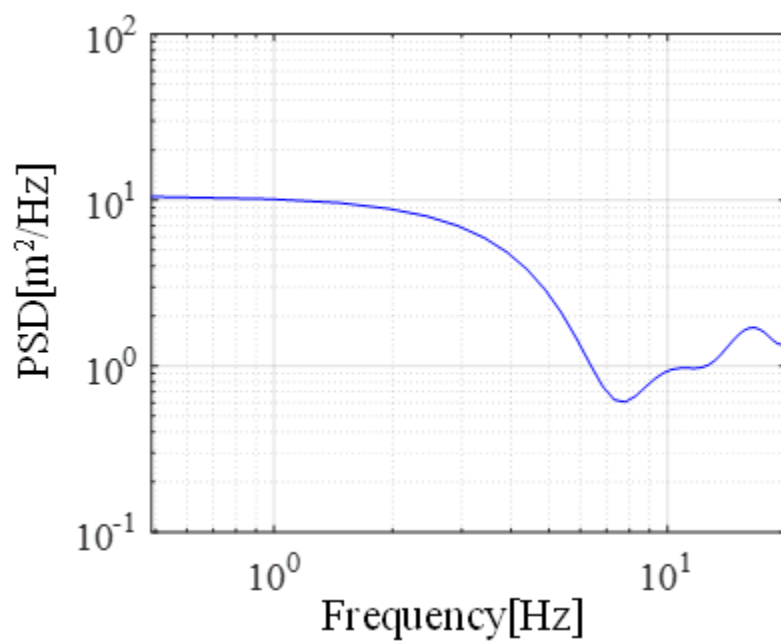


図 2.21 トゥ方向における慣性力の PSD 線図

2.7 結論

本章では、モーションキャプチャシステムを用いて計測したデータから、入力データを算出し、FEM モデルを用いて解析を行った。さらに、FEM モデルにゴルフファーの把持条件を再現した機構を組み合わせシャフトの挙動解析を行った。そして得られた結果から周波数解析を行い、以下の結論が得られた。

- (1) ゴルフクラブを 22 の要素に分割し、それぞれを有限要素法の梁要素によって表現した。そして、剛体要素としてクラブヘッドを表現し、物性値を与えることで、クラブの運動方程式を構築した。
- (2) クラブをグリップ・シャフト部とクラブヘッドの 2 つに分け、それぞれの部分について剛体の運動学に基づき運動方程式を構築し、それらを組み合わせることによって、ゴルフクラブの 3 次元変形を再現できる数値モデルを構築した。
- (3) グリップのマーカ配置からスイング中の加速度、角速度、角加速度を求め、それらより慣性力を算出することで、スイング中のシャフトに加わる入力データを算出することが可能となった。
- (4) スイング中にはアドレスからトップまではグリップ部を柔らかく使いシャフトに撓みを蓄積させ、インパクトにかけてはグリップを硬く使うことによって蓄積した撓みを復元させ、より大きなしなりを発生させていることを明らかにした。
- (5) 本研究で構築した把持条件をシミュレーションモデルに組み込むことによって、低周波域での撓み挙動を再現した。
- (6) クラブに加わる慣性力の周期は、固定端条件のクラブの固有振動数の周期よりも低く、より大きなしなりを生み出すためには手首を柔らかく使い、クラブ全体の固有振動数を低下させる必要があることが明らかにした。

第3章 クラブモデルを用いたスイング挙動解析

3.1 緒言

前章ではシャフトの変形挙動を再現することを目的として，クラブの数理モデルを有限要素法によって構築した．さらに，ゴルファーの把持条件を再現するために，クラブモデルのグリップ部にバネ要素を組み込んだ．そして，把持条件を考慮したモデルを用いて，スイング中のシャフト撓み挙動のシミュレーションを行った．その結果，スイング中のシャフト撓み挙動を概ね再現できていることを確認できたが，インパクト時の撓み挙動は計測データから算出した撓み挙動との乖離が見られた．本章では，インパクト時における撓み量の乖離の要因を分析することを目的として，シャフト撓み挙動と慣性力との関係を，慣性力を成分分解することで明らかにする．

また，インパクト時には慣性力以外にシャフトの変形を生み出す要因が考えられる．スイング中におけるシャフトの撓みの発生メカニズムを解析した研究によると，シャフト撓みを発生させる要因には慣性力だけでなく，撓んだシャフトに慣性力が加わることで生じるトルクの影響が明らかにされている^{(11), (12)}．しかし，この研究のシミュレーションモデルはゴルファーの把持条件を考慮したモデルではない．そこで，本章ではスイング中に加わる慣性力とシャフト撓みによって生じるトルクを考慮し，シャフト撓み挙動のシミュレーションを行う．さらに，インパクト時におけるクラブヘッドの姿勢としてクラブヘッドの回転角と速度を算出し，計測データより算出した結果と比較することで，本研究のモデルの有効性を検証する．

3.2 慣性力の成分分解による撓み生成メカニズムの解明

3.2.1 慣性力の成分分解

第2章 2.2.4 項で示した式(2.45)の右辺より，慣性力を以下の4成分に分解する．

1 つはクラブのシャフトとグリップの運動によって生じる慣性力 \mathbf{F}_{gs} であり，以下の式で表される．

$$\mathbf{F}_{gs} = -\left\langle [N_t]^T \left([\tilde{\omega}] [\tilde{\omega}] \mathbf{p} + [\tilde{\omega}] \mathbf{p} + [S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}}) \right) \right\rangle. \quad (3.1)$$

次に，クラブヘッドの運動によって生じる慣性力について，加速度に関する成分 \mathbf{F}_{ac} ，角速度に関する成分 \mathbf{F}_{av} ，角加速度に関する成分 \mathbf{F}_{aa} に分解し，それぞれ以下の式で表される^{(32), (33)}．

$$\mathbf{F}_{ac} = -\langle [N_t]^T ([S]^T (\ddot{\mathbf{r}} - \hat{\mathbf{g}})) \rangle + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{132 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{F}_{av} = -\langle [N_t]^T ([\tilde{\omega}][\tilde{\omega}]\mathbf{p}) \rangle + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{132 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{F}_{aa} = -\langle [N_t]^T ([\dot{\tilde{\omega}}]\mathbf{p}) \rangle + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{132 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.2.2 シミュレーション方法

シミュレーションに用いる計測データは 2.5.1 項で示した計測データを使用する．全 20 球分の計測データの内，シミュレーションに使用するデータは，撓み挙動より求めた四分位範囲に入るものを評価データとした⁽²⁹⁾．本節では 20 球の内 17 球を評価データとした．そして，17 球のデータそれぞれについて，2.5.6 項で示した方法によってパラメータを推定した．推定したパラメータを式(2.53)の左辺に代入し，ニューマーク β 法($\beta=0.25$)によって数値積分を行い，17 球の撓み挙動を求めた．そして，式(2.54)の右辺を，式(3.1)～式(3.4)とした条件でのシミュレーションを行い，各成分での撓み挙動を算出した^{(32), (33)}．

3.2.3 撓み挙動の平均値の比較

スイング中の撓み挙動について，第 2 章 2.5.3 項の手法によって求めた計測データから算出した撓み挙動（以後，モーションデータと呼称）と，シミュレーションの撓み挙動を求めた．算出したそれぞれの撓み挙動において，インパクト時刻を 0[s]とし，アドレスからインパクトまでの撓み挙動を算出した．アドレスタイミングは 17 球のばらつきが少ないことから，平均値である -1.10[s]とした．同様にトップのタイミングは，平均値より -.266[s]とした．そして，アドレスからインパクトの撓み挙動において，モーションデータとシミュレーションそれぞれの平均値を算出し，その結果を，フェース方向において図 3.1 に，トゥ方向において図 3.2 に示す．図 3.1 より，シミュレーション結果において，-0.5[s]付近から負の

方向に撓み，インパクト付近ではモーションデータと同様にしなり戻りを再現できている．しかし，インパクト付近での撓み量を比較すると，モーションデータとシミュレーションには約 5.4[cm]の乖離がある．また，図 3.2 より，シミュレーションにおいて，-0.5[s]付近からトップにかけて正の方向に撓み，トップからインパクトにかけては負の方向に撓んでおり，モーションデータと同様にトゥダウンとトゥアップの挙動を再現できていることがわかる．しかし，インパクト付近での撓み量を比較すると，モーションデータとシミュレーションには約 3.7[cm]の乖離がある．以上の結果より，フェース方向，トゥ方向ともに，インパクト付近でのモーションデータとシミュレーションの間に乖離が見られることから，慣性力を成分分解することによってその要因を明らかにしていく^{(32), (33)}．

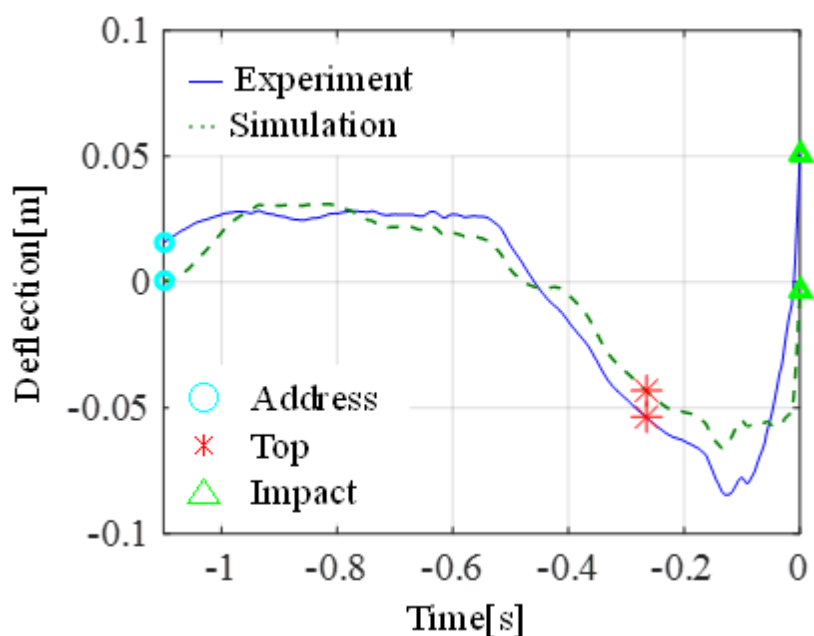


図 3.1 フェース方向におけるモーションデータとシミュレーションの撓み挙動の平均値の比較

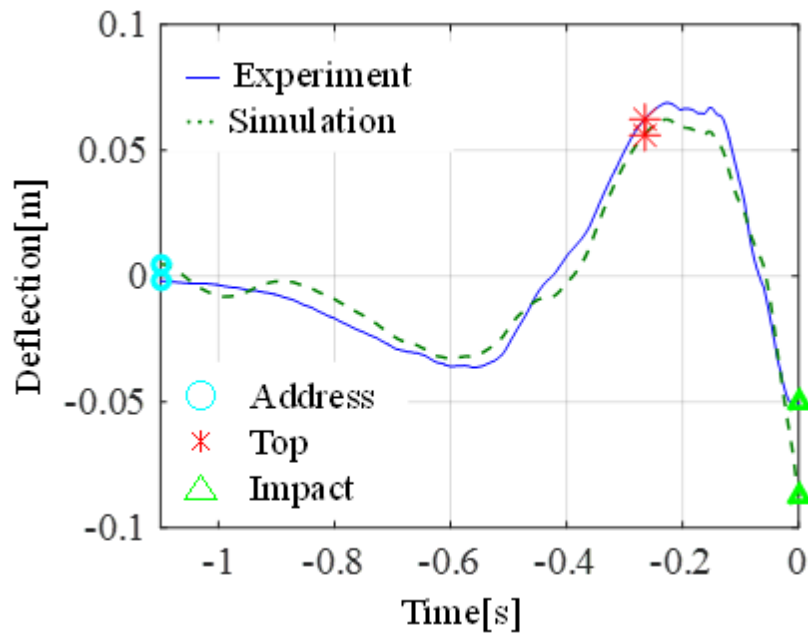


図 3.2 トゥ方向におけるモーションデータとシミュレーションの
撓み挙動の平均値の比較

3.2.4 グリップとシャフトの慣性力による撓み挙動

第 2 章 2.5.4 項の方法より，加速度，角速度，角加速度を求め，それらを式(3.1)に代入して，グリップとシャフトによる慣性力を求める．その慣性力を第 2 章 2.4 節に示した式(2.54)の右辺に入力し，得られた撓み挙動を，フェース方向において図 3.3 に，トゥ方向において図 3.4 に示す．図 3.3 より，フェース方向の撓み挙動の最大値を，図 3.1 の撓み量の最大値と比較すると，グリップとシャフトの慣性力での撓み挙動は約 1/20 の大きさになっている．同様に，図 3.4 より，トゥ方向において，図 3.2 と比較すると，撓み挙動は約 1/20 の大きさになっている．以上の結果より，グリップとシャフトの慣性力は，スイング中にわずかな撓みを生成するが，図 3.1，図 3.2 のインパクト付近の乖離を説明する要因ではないと考えられる⁽³³⁾．

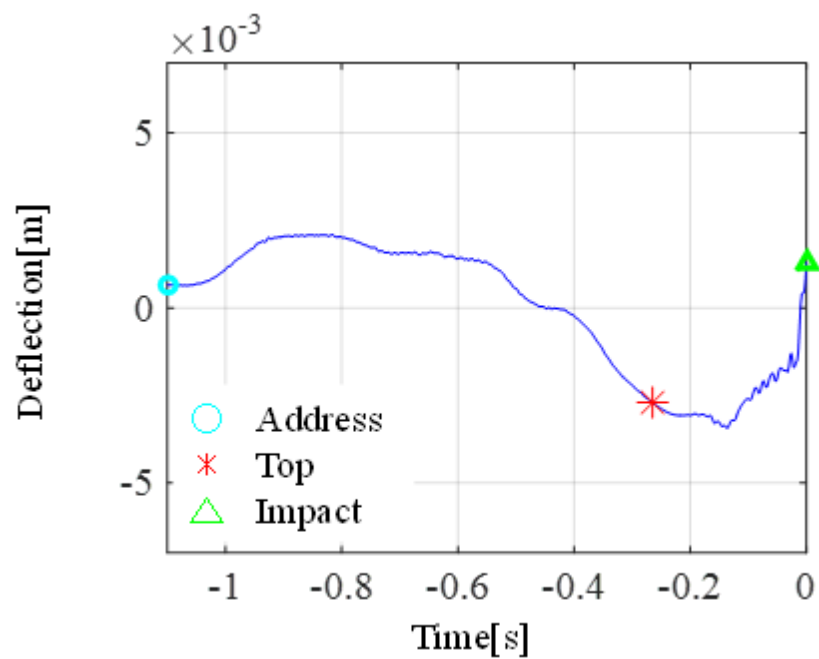


図 3.3 フェース方向におけるグリップとシャフトの慣性力入力時の
撓み挙動のシミュレーションの平均値

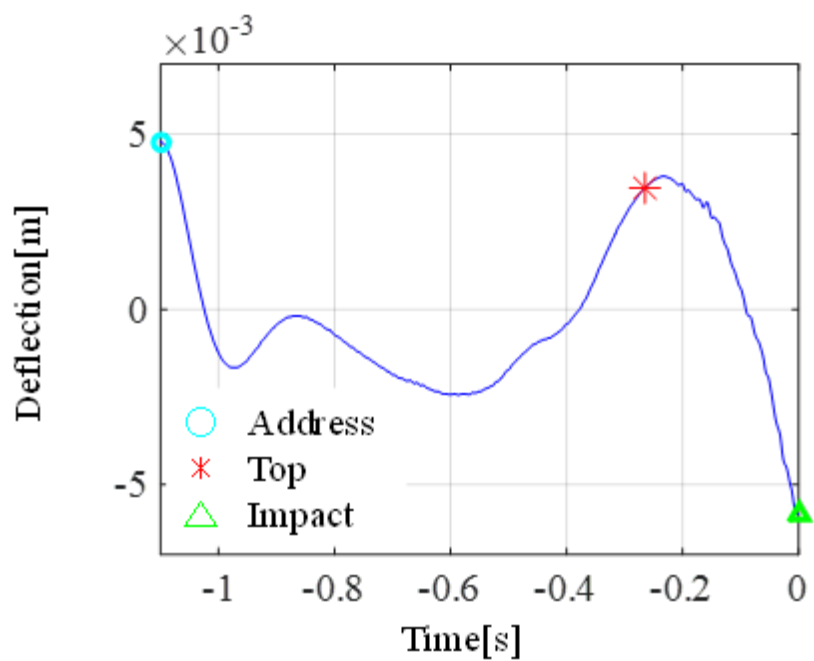


図 3.4 トゥ方向におけるグリップとシャフトの慣性力入力時の
撓み挙動のシミュレーションの平均値

3.2.5 クラブヘッドの慣性力の加速度成分による撓み挙動

前項と同様に，式(3.2)より得られたクラブヘッドの慣性力の加速度成分を入力し算出した撓み挙動を，フェース方向において図 3.5 に，トゥ方向において図 3.6 に示す．図 3.5 より，フェース方向において，アドレスから-0.5[s]付近までは正の方向に撓み，-0.5[s]からトップにかけては負の方向に撓んでおり，アドレスからトップにかけてはグリップ部の加速度が増減し，緩やかな撓み挙動が生じている．また，トップからインパクトにかけては約 10[cm]正の方向に撓んでいる．以上の結果より，フェース方向において，クラブヘッドの慣性力の加速度成分はしなり戻りに大きく寄与していると考えられる．次に，トゥ方向において，図 3.6 より，アドレスから-0.5[s]付近までは負の方向に撓み，-0.5[s]からトップにかけては正の方向に撓んでおり，トゥ方向においてもアドレスからトップにかけては緩やかな撓み挙動が生じている．トップからインパクトにかけては一度最下点をむかえた後に，正の方向に再び撓んでいる．以上の結果より，トゥ方向において，クラブヘッドの慣性力の加速度成分はインパクト直前まではトゥダウンに寄与し，インパクト直前ではトゥダウンを抑えるように働いていることがわかる^{(32), (33)}．

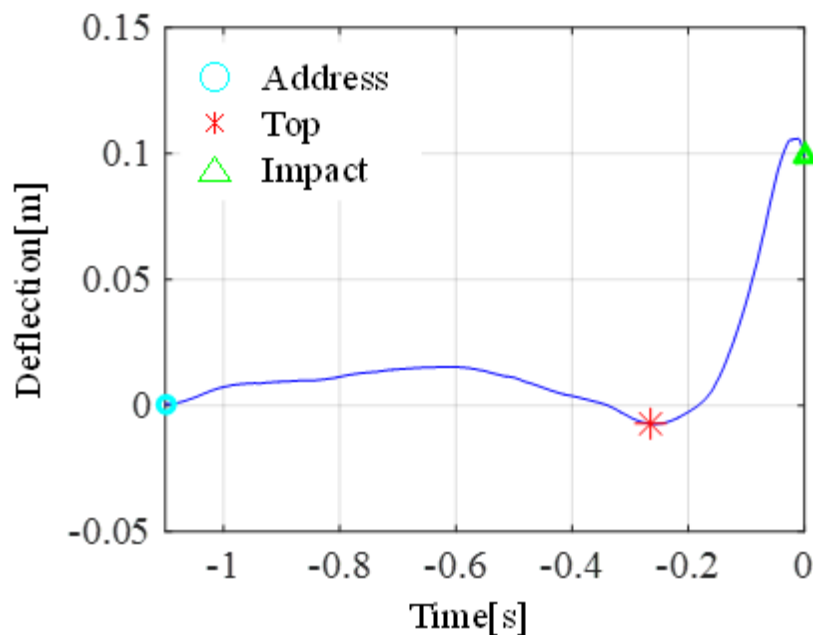


図 3.5 フェース方向におけるクラブヘッドの慣性力の加速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

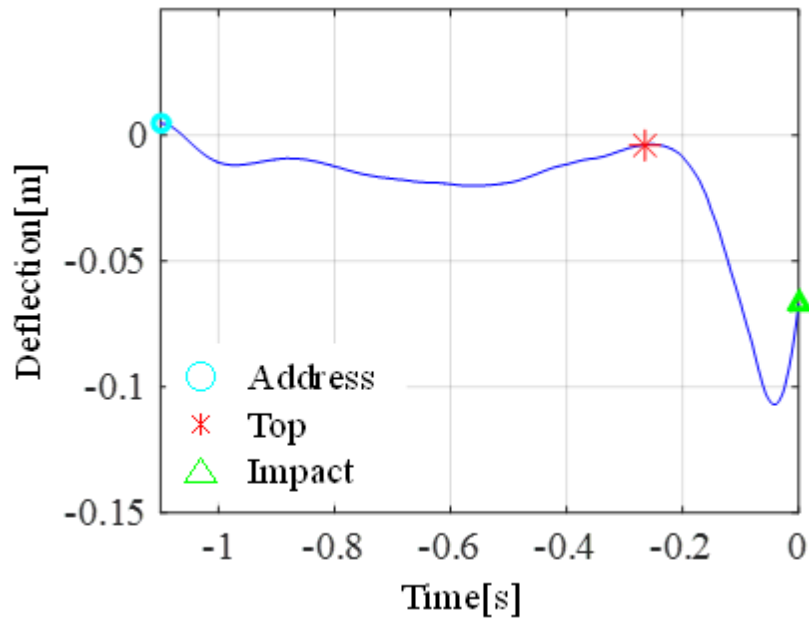


図 3.6 トゥ方向におけるクラブヘッドの慣性力の加速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

3.2.6 クラブヘッドの慣性力の角速度成分による撓み挙動

式(3.3)より得られたクラブヘッドの慣性力の角速度成分を入力し算出した撓み挙動を，フェース方向において図 3.7 に，トゥ方向において図 3.8 に示す．図 3.7 より，フェース方向において，アドレスからトップにかけては， $-0.6[s]$ 付近では約 $2[cm]$ 正の方向に撓んでいるが， $-0.4[s]$ からトップにかけては大きな撓みはない．また，トップからインパクトにかけては，撓み量が最下点を通過後，約 $11[cm]$ 正の方向に撓んでいる．以上の結果より，フェース方向において，クラブヘッドの慣性力の角速度成分は，トップからインパクトに向けての撓みの蓄積・しなり戻りに寄与していることがわかる．次に，トゥ方向において，図 3.8 より，アドレスからトップにかけては， $-0.7[s]$ 付近で約 $2[cm]$ 正の方向に撓んでいるが， $-0.5[s]$ からトップにかけては大きな撓みはない．また，トップからインパクトにかけては，撓み量が最下点をむかえた後，約 $16 [cm]$ 正の方向に撓んでいる．以上の結果より，トゥ方向において，角速度成分はインパクトに向けてのトゥダウンを抑える働きをすることがわかる^{(32), (33)}．

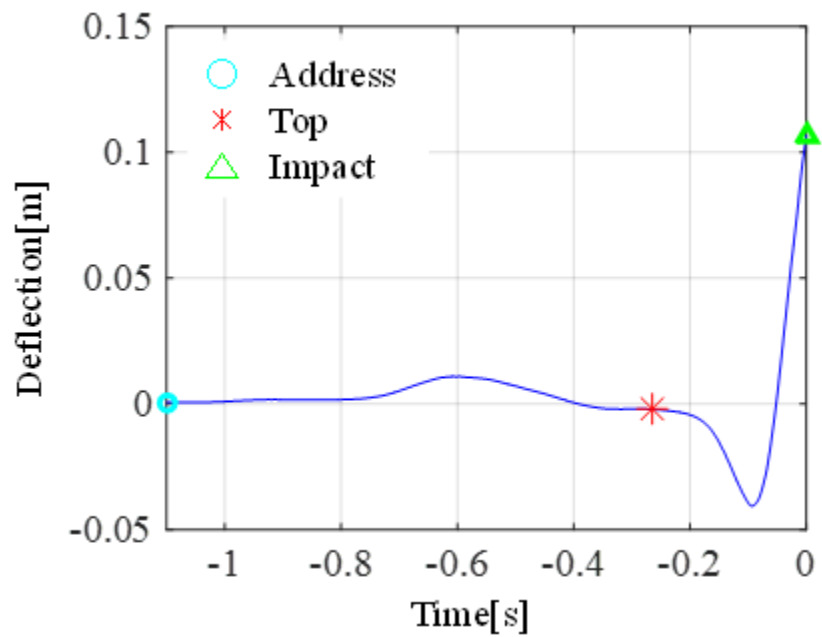


図 3.7 フェース方向におけるクラブヘッドの慣性力の角速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

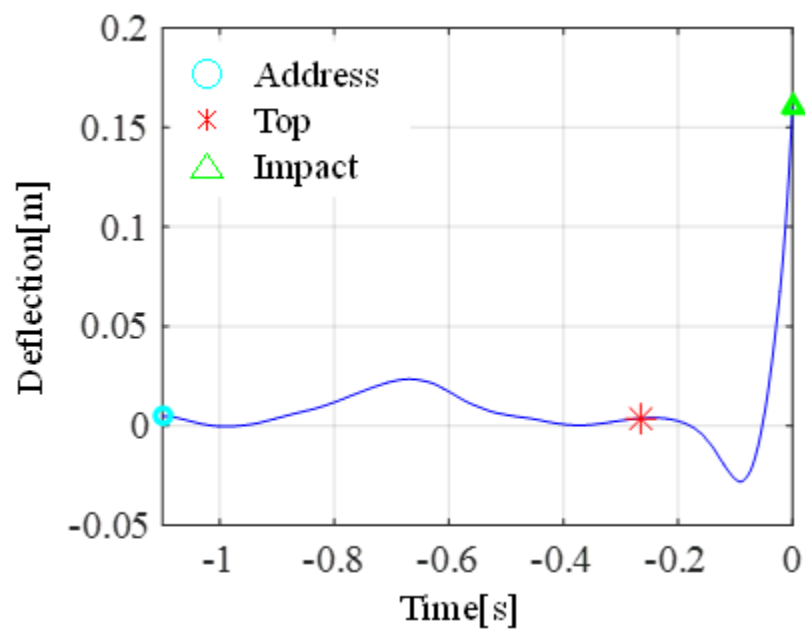


図 3.8 トゥ方向におけるクラブヘッドの慣性力の角速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

3.2.7 クラブヘッドの慣性力の角加速度成分による撓み挙動

式(3.4)より得られたクラブヘッドの慣性力の角加速度成分を入力し算出した撓み挙動を、フェース方向において図 3.9 に、トゥ方向において図 3.10 に示す。図 3.9 より、フェース方向において、アドレスからトップにかけては、緩やかな撓みの増減が見られ、トップにおいては負に撓んでおり、角加速度成分はアドレスからトップの撓み量の蓄積に貢献していると考えられる。また、トップからインパクトにかけては、約 25[cm]負の方向に撓んでいる。以上の結果より、フェース方向において、角加速度成分は、アドレスからトップまでに撓みを蓄積させ、トップからインパクトに向けてしなり戻りを抑えるように働くことがわかる。次に、トゥ方向において、図 3.10 より、アドレスからトップの間では、緩やかに撓み量が増加し、トップには正の方向に撓んでいることがわかる。また、トップからインパクトにかけては、約 20[cm]負の方向に撓んでいることがわかる、以上の結果より、トゥ方向において、角速度成分はトゥアップおよびインパクトに向けてのトゥダウンに寄与していることがわかる^{(32), (33)}。

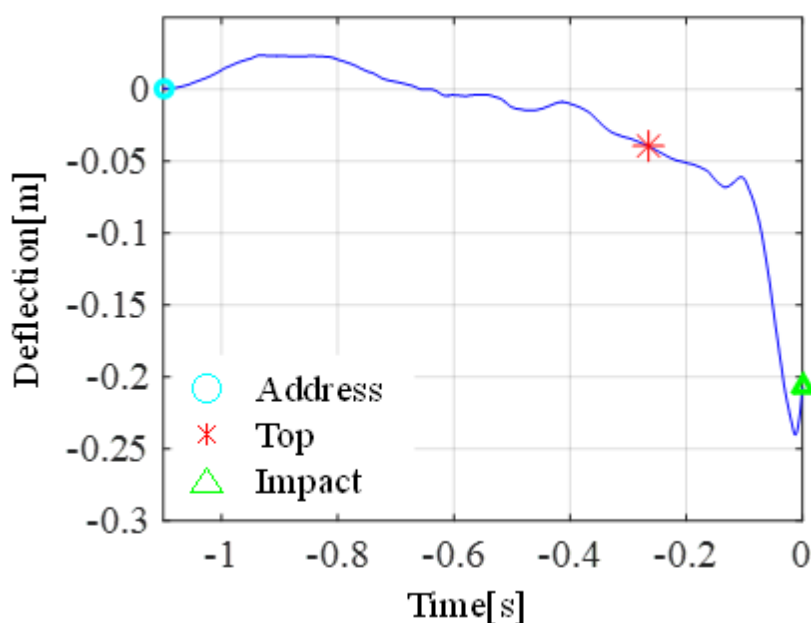


図 3.9 フェース方向におけるクラブヘッドの慣性力の角加速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

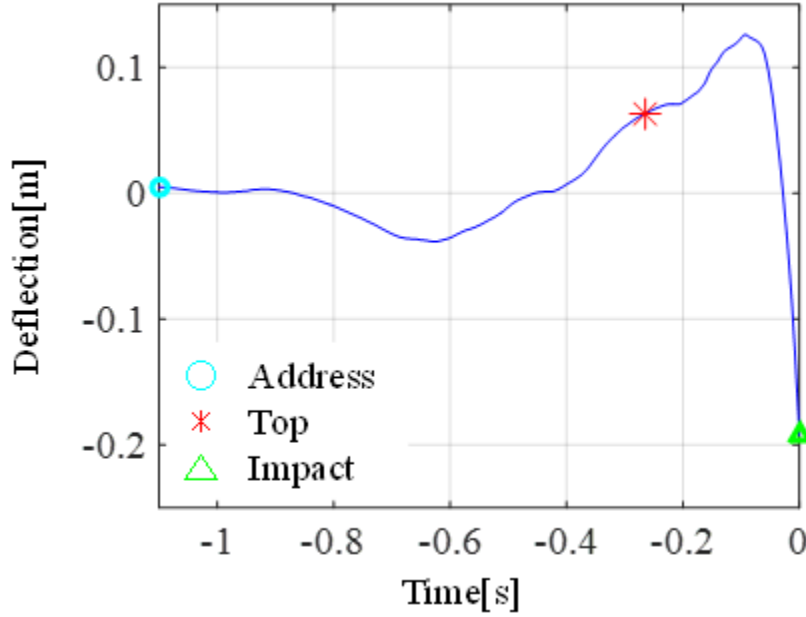


図 3.10 トゥ方向におけるクラブヘッドの慣性力の角加速度成分
入力時の撓み挙動のシミュレーションの平均値

3.3 撓みトルクによる撓み挙動の再現

3.3.1 撓みトルクの算出方法

3.2 節では，慣性力の各成分にはそれぞれの働きがあり，特にクラブヘッドの慣性力が撓み挙動を生み出すことが明らかになった．その結果より，前章で見られたインパクト付近での撓み挙動の乖離と小さくするためには，慣性力の一部の項だけでなく全ての項を考慮する必要があることがわかった．そこで，本節では，撓んだシャフトに慣性力が働くことによる発生するトルク（以後，撓みトルクと呼称）を考える．スイング中には，シャフトが撓むことによって，慣性力が加わる節点の位置は変化する．シャフト挙動と慣性力の関係を図 3.11 に示す．時刻 t 秒の時の節点変位を $\mathbf{d}_t(t)$ とし， Δt 秒後の節点変位は $\mathbf{d}_t(t + \Delta t)$ となる． $\mathbf{d}_t(t + \Delta t)$ は第 2 章 2.4 節で示した式(2.54)にニューマークベータ法 ($\beta = 0.25$) を適用し，以下の式で表される．

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_t(t + \Delta t) = & \left([M_R] + \frac{\Delta t}{2} [C_R] + \beta \Delta t^2 [K_R] \right)^{-1} \left[\mathbf{F}(t + \Delta t) - [C_R] \left\{ \dot{\mathbf{d}}_t(t) + \frac{\ddot{\mathbf{d}}(t)}{2} \Delta t \right\} \right. \\ & \left. - [K_R] \left\{ \mathbf{d}_t(t) + \dot{\mathbf{d}}_t(t) \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{d}}(t) \Delta t^2 \right\} \right] \end{aligned} \quad (3.5)$$

時刻 t 秒のときシャフトが撓むことによって、その撓みと、シャフトに作用する慣性力との外積によって撓みトルクが生じる．第 i 要素での撓みを $\mathbf{w}_i(t)$ ，第 i 要素に加わる慣性力を $\mathbf{F}_i(t)$ とし，第 i 要素に生じる撓みトルク \mathbf{T}_i は以下の式で表される．

$$\mathbf{T}_i(t+\Delta t) = \mathbf{w}_i(t) \times \mathbf{F}_i(t+\Delta t) \quad (3.6)$$

式(3.6)の各成分は各軸回りに生じるトルクを表す．本章では，撓みトルクによって生じる，フェース方向とトゥ方向における撓み挙動の変化を見るために，フェース方向とトゥ方向における撓み書道に影響しないシャフト軸回りの撓みトルクは無視する．式(3.6)に基づき，全系の撓みトルク \mathbf{T} を算出し，式(3.5)に組み込むことで，撓みトルクを考慮した節点変位 $\mathbf{d}_i(t+\Delta t)$ は以下の式で表される^{(26), (27)}．

$$\begin{aligned} \mathbf{d}_i(t+\Delta t) = & \left([M_R] + \frac{\Delta t}{2} [C_R] + \beta \Delta t^2 [K_R] \right)^{-1} [\mathbf{F}(t+\Delta t) + \mathbf{T}(t+\Delta t) \\ & - [C_R] \left\{ \dot{\mathbf{d}}_i(t) + \frac{\ddot{\mathbf{d}}_i(t)}{2} \Delta t \right\} - [K_R] \left\{ \mathbf{d}_i(t) + \dot{\mathbf{d}}_i(t) \Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{\mathbf{d}}_i(t) \Delta t^2 \right\}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

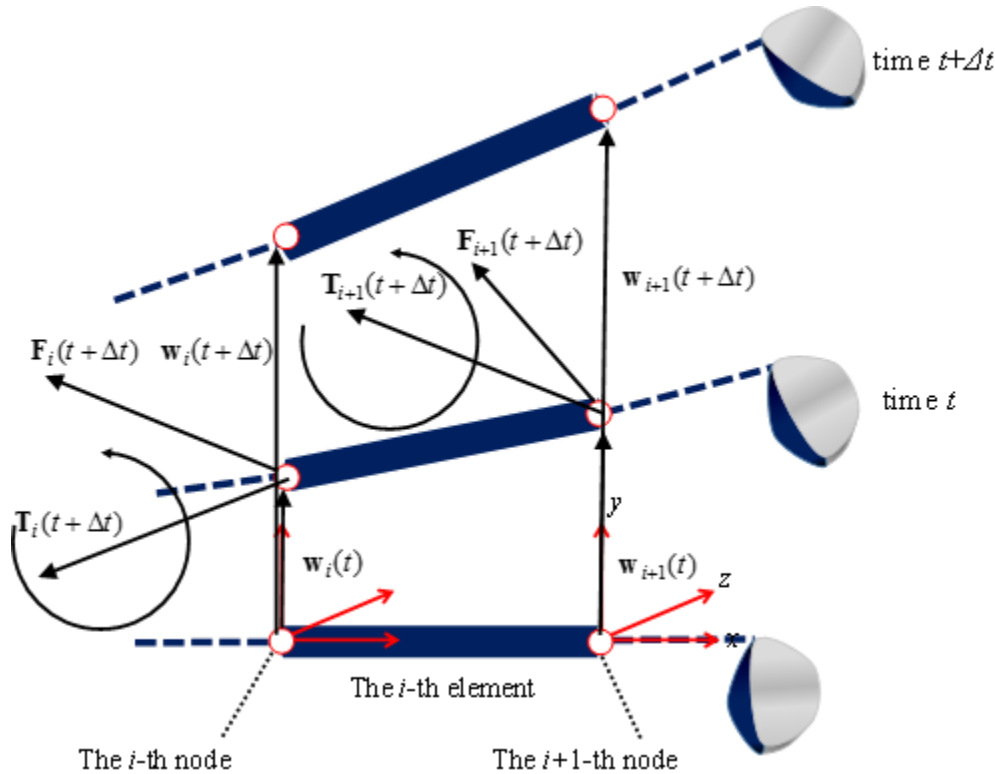


図 3.11 要素に働く力とその力と撓みによって発生するトルクの関係

3.3.2 シミュレーション方法

撓みトルクの有効性を検証することを目的として、本節では、第 2 章 2.5.1 項で示した計測方法によって、新たに同体格の被験者 2 名（本節では、それぞれ被験者 A、被験者 B とする）の計測を実施した。全 20 球分の計測データの内、シミュレーションに使用するデータは、モーションデータとシミュレーションの撓み挙動から求めた四分位範囲によって決定した⁽²⁹⁾。本節では、各被験者ともに、20 球の内 16 球を評価データとした。そして、式(3.7)より数値積分を行い、各試行の撓み挙動を求める。また、把持条件のバネ定数は次項で検討する。

3.3.3 把持パラメータの検討

撓みトルクを考慮して、撓みを算出するためには再帰的に撓みを計算しなければならない。そのため、把持条件を決定するバネ定数を最適化手法によって、推定することは、計算量が膨大になるため困難である。そこで、本節では、妥当なバネ定数を決定することを目的として、事前に複数のバネ定数を仮定し、それらバネ定数を用いてシミュレーションを行い、モーションデータとシミュレーション結果との差が最も小さくなるバネ定数を求める。具体的には、バネ定数を 3 条件仮定し、それに固定端条件を加えて、計 4 条件での撓み挙動のシミュレーションを行う。3 条件のバネ定数を表 3.1 に示す。そして、各被験者について、スイング中の把持条件は一定とし、16 球の撓み挙動のシミュレーションを行い、16 球の平均値を算出した。撓み挙動の平均値を、フェース方向において、被験者 A の撓み挙動を図 3.12 に、被験者 B の撓み挙動を図 3.13 に示す。各図には、モーションデータと、各把持条件でのシミュレーション結果を示した。同様に、トゥ方向において、被験者 A の撓み挙動を図 3.14 に、被験者 B の撓み挙動を図 3.15 に示す。図 3.12、図 3.14 より、被験者 A において、トップ時とインパクト時にのモーションデータと各条件のシミュレーションの撓み量の差を表 3.2 に示す。同様に、図 3.13、図 3.15 より、被験者 B において、トップ時とインパクト時のモーションデータと各条件のシミュレーションの撓み量との差を表 3.3 に示す。

フェース方向の撓み挙動について、表 3.2、表 3.3 より、トップ時、インパクト時の撓み量の差を比較すると、どの被験者も condition3 の条件で最も差が小さいことより、どの被験者も固定端のような硬い条件でクラブを握っているのではなく、適度な柔軟性を持った把持条件でクラブを操作していることがわかる。しかし、図 3.12、図 3.13 より、-0.1[s]付近では、どちらの被験者も condition3 ではなく、より柔らかい把持条件である condition2 のときにシミュレーション結果はモーションデータの撓み挙動に近づいている。そのため、両被験者とも、把持条件をスイング中に柔らかく変化させ、クラブをしならせていると考えられる。また、表 3.2、表 3.3 より、トゥ方向において、トップ時、インパクト時の撓み量の差を比

較すると，どの被験者も condition2 の条件で最も差が小さい．フェース方向では condition3 でモーションとの差が小さくなったことより，トゥ方向ではより柔らかいグリップでクラブを操作していることがわかる．以上の結果より，撓みトルクを用いたシミュレーションでは condition2 から condition3 のバネ定数を用いる必要があると考えられる^{(26), (27)}．

表 3.1 シミュレーションに用いるバネ定数

Parameter	Condition1	Condition2	Condition3
k_y, k_z [N/m ²]	1.0×10^4	1.0×10^5	1.0×10^6

表 3.2 被験者 A におけるトップ時とインパクト時のモーションデータとシミュレーション結果との撓み量の差

Direction	Timing	Condition1	Condition2	Condition3	Fixed end
Face diff [m]	Top	-0.080	-0.0080	0.0016	0.010
	Impact	-0.040	-0.0092	0.0029	0.010
Toe diff [m]	Top	0.038	0.0017	-0.0024	-0.0017
	Impact	-0.0060	-0.0017	0.0090	-0.0017

表 3.3 被験者 B におけるトップ時とインパクト時のモーションデータとシミュレーション結果との撓み量の差

Direction	Timing	Condition1	Condition2	Condition3	Fixed end
Face diff [m]	Top	-0.020	-0.0037	-0.0026	0.011
	Impact	-0.018	-0.0055	0.0032	0.011
Toe diff [m]	Top	0.044	0.0037	-0.0054	0.0085
	Impact	0.012	0.0085	0.017	0.0085

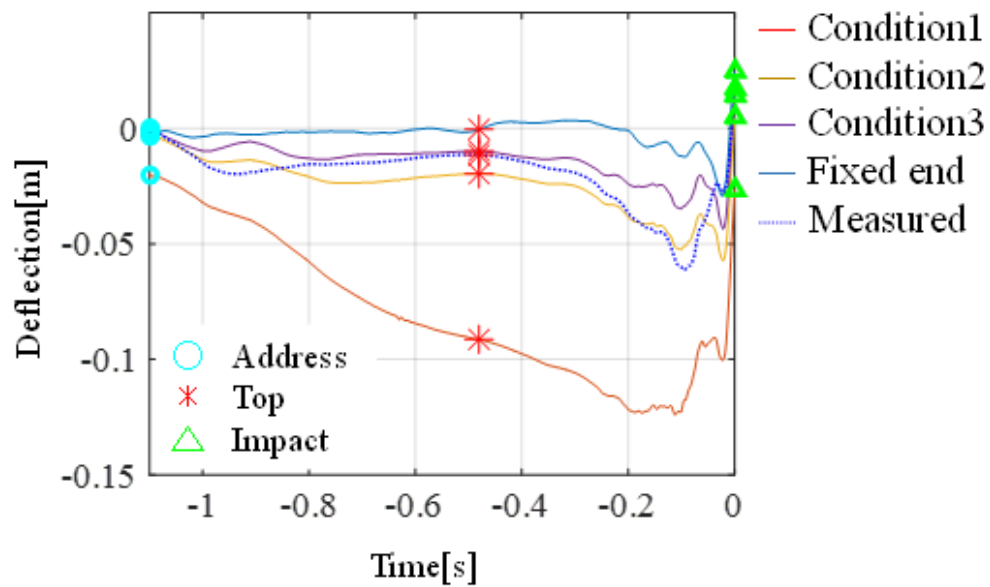


図 3.12 フェース方向における被験者 A のモーションデータと
各把持条件での撓み挙動のシミュレーション結果との比較

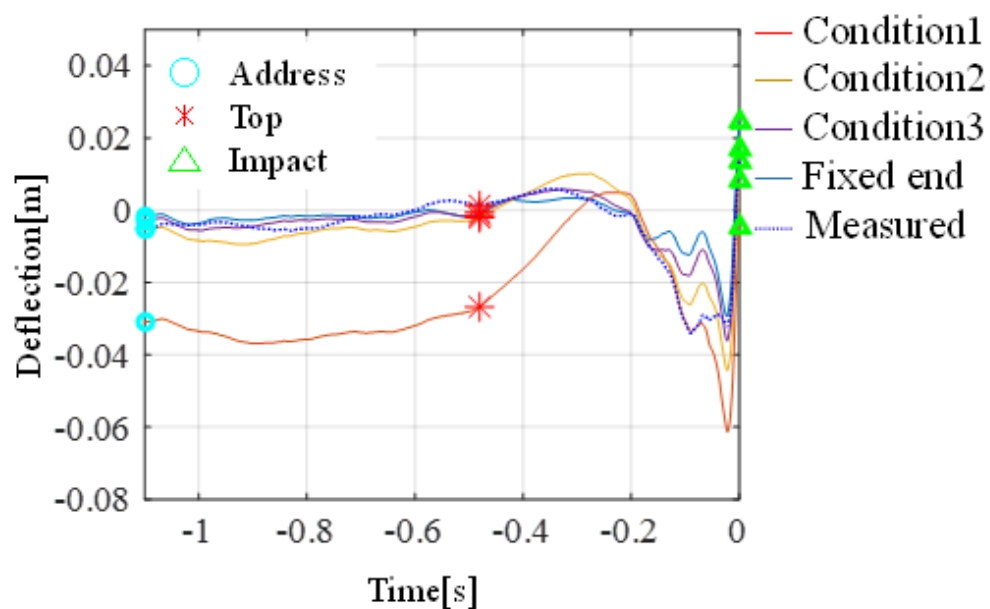


図 3.13 フェース方向における被験者 B のモーションデータと
各把持条件での撓み挙動のシミュレーション結果との比較

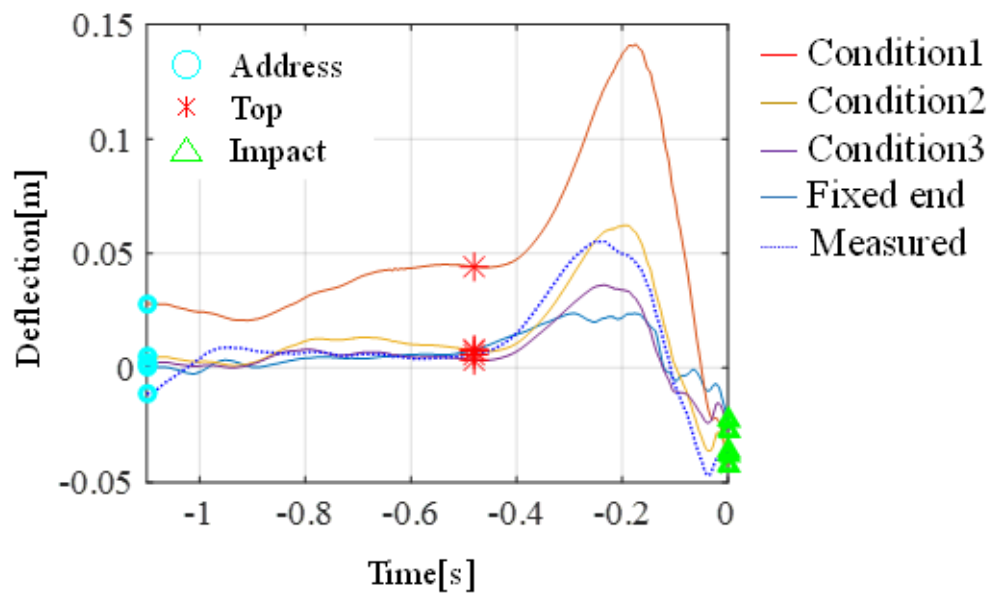


図 3.14 トゥ方向における被験者 A のモーションデータと
各把持条件での撓み挙動のシミュレーション結果との比較

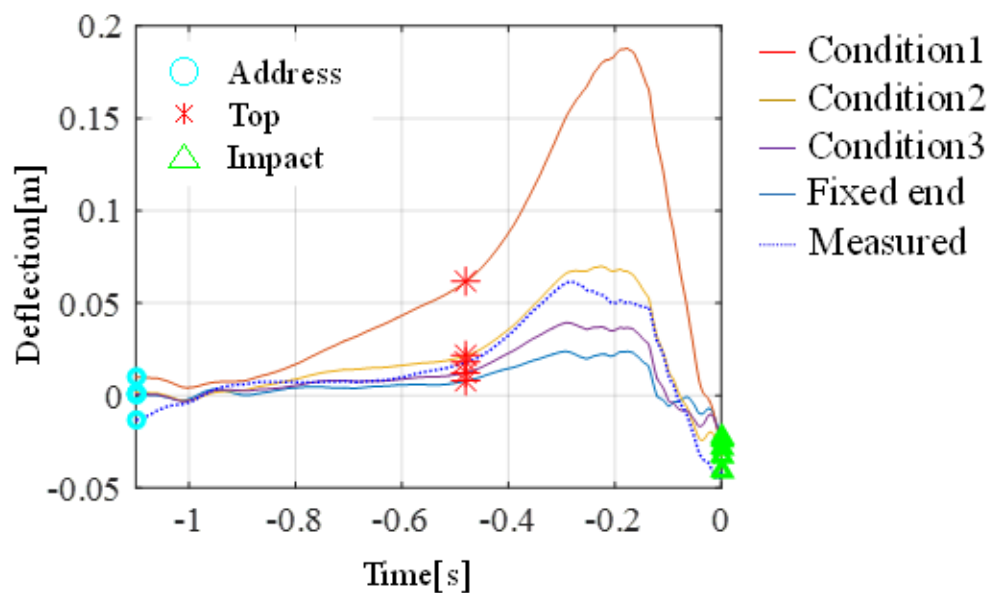


図 3.15 トゥ方向における被験者 B のモーションデータと
各把持条件での撓み挙動のシミュレーション結果との比較

3.3.4 撓みトルクの有効性の検証

撓みトルクによるシミュレーションの有効性を検証することを目的として、撓みトルクを考慮した場合と、考慮していないシミュレーションの撓み挙動を比較する。フェース方向において、被験者 A の撓み挙動を図 3.16 に、被験者 B の撓み挙動を図 3.17 に示す。同様に、トゥ方向において、被験者 A の撓み挙動を図 3.18 に、被験者 B の撓み挙動を図 3.19 に示す。フェース方向において、図 3.16、図 3.17 より、どちらの被験者もインパクト時の撓み挙動が、撓みトルクを考慮することで、モーションデータに近づいていることがわかる。しかし、 $-0.1[s]$ 付近では、撓みトルクを考慮していない条件のほうが、モーションデータに近く、前項で示したように把持の変化によるしなり効果などを新たに考慮する必要があると考えられる。また、トゥ方向において、図 3.18、図 3.19 より、どちらの被験者もインパクト時の撓み挙動が、撓みトルクを考慮することで、モーションデータに近づいていることがわかる。しかし、 $-0.2[s]$ では、撓みトルクを考慮すると、モーションデータよりも大きく撓んでおり、かつトゥアップからトゥダウンに移るタイミングが遅れていることから、トップからインパクトにかけて撓み量の増加に伴う把持条件の変化などの影響が考えられる。以上より、どちらの方向でも、各被験者で撓み挙動がモーションデータに近づいていることから、撓みトルクを考慮することで高精度なシミュレーションが可能となることがわかる^{(26), (27)}。

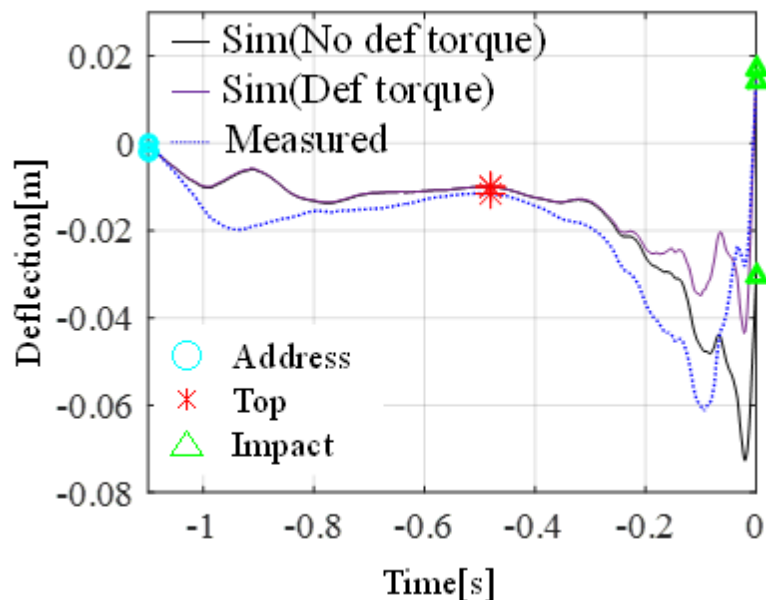


図 3.16 フェース方向における被験者 A のモーションデータと撓みトルクを考慮した条件としていない条件でのシミュレーション結果との比較

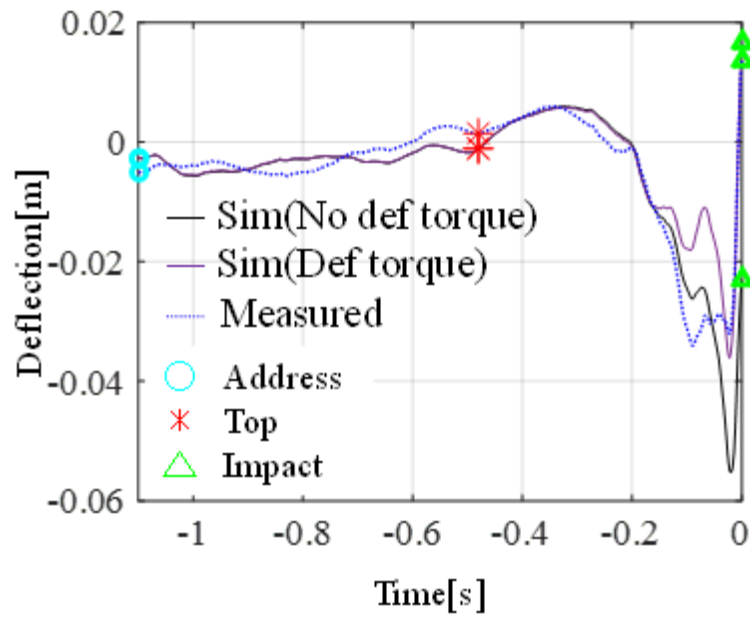


図 3.17 フェース方向における被験者 B のモーションデータと
撓みトルクを考慮した条件としていない条件でのシミュレーション結果との比較

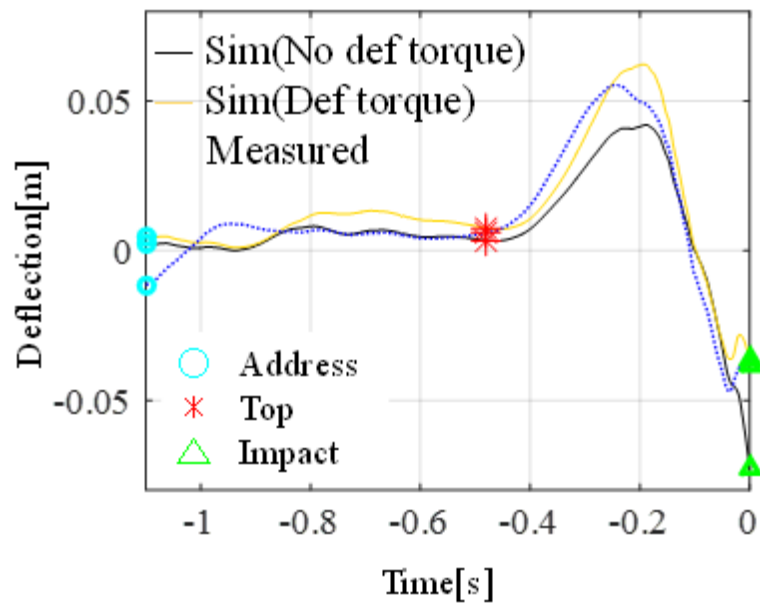


図 3.18 トゥ方向における被験者 A のモーションデータと
撓みトルクを考慮した条件としていない条件でのシミュレーション結果との比較

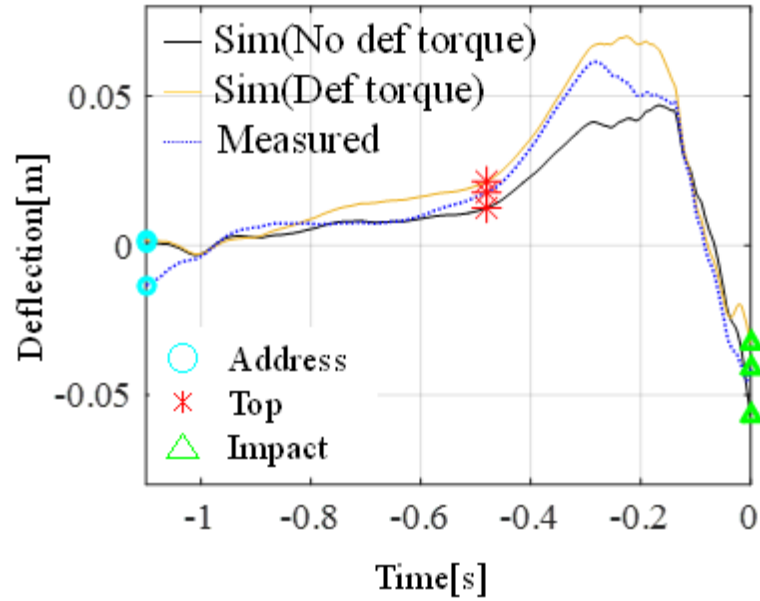


図 3.19 トゥ方向における被験者 B のモーションデータと
撓みトルクを考慮した条件としていない条件でのシミュレーション結果との比較

3.4 クラブヘッドの姿勢検証

3.4.1 クラブヘッド姿勢の定義

クラブヘッドの姿勢を評価することを目的として、打球の初速度に影響するインパクト時のヘッド速度（以後、*HS* と呼称）、打球の左右方向の入射角を示す軌道角（以後、*Path* と呼称）、打球の上下方向の入射角を示すブロー角（以後、*BA* と呼称）、打球の左右方向の回転量に影響するフェース角（以後、*FA* と呼称）の 4 指標を算出する。以下、4 種類の評価指標の算出方法を示す。

HS を算出するために、クラブヘッドに想定した節点を図 3.20 に示す。図 3.20 に示すクラブヘッドの節点 1 と節点 2 から中点（以後、クラブヘッド中点と呼称）を算出し、インパクト直前からインパクト時までのクラブヘッド中点の平均速度を *HS* とする。インパクト時は慣性座標系の Z-X 平面をクラブヘッド中点を通り過ぎた時刻と定義する。

次に、*Path* を算出するために、クラブヘッドの節点と方向との関係を図 3.21 に示す。図 3.21 より、クラブヘッド節点を X-Y 平面に投影し、インパクト直前とインパクト時のクラブヘッド中点を結んだベクトル **A** と Y 軸に平行なベクトル **Y** とのなす角を *Path* とし、*Path* は以下の式で表される。

$$Path = \text{sgn}(A_x) \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{Y} \cdot \mathbf{A}}{\|\mathbf{Y}\| \|\mathbf{A}\|} \right) \quad (3.8)$$

次に， BA を算出するために，クラブヘッドの節点と方向との関係を図 3.22 に示す．図 3.22 より，クラブヘッドの節点を Y - Z 平面に投影し，インパクト直前とインパクト時のクラブヘッド中点を結んだベクトル \mathbf{B} と Y 軸に平行なベクトル \mathbf{Y} とのなす角を BA とし， BA は以下の式で表される．

$$BA = \text{sgn}(B_z) \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{Y} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{Y}| |\mathbf{B}|} \right) \quad (3.9)$$

最後に， FA を算出するために，クラブヘッドの節点と方向との関係を図 3.23 に示す．図 3.23 より，インパクト時のヘッド節点を慣性座標系の X - Y 平面に投影し，節点 2 から節点 1 に向かうベクトル \mathbf{C} と X 軸に平行なベクトル \mathbf{X} とのなす角を FA とし， FA は以下の式で表される⁽²⁷⁾．

$$FA = \text{sgn}(C_y) \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{X} \cdot \mathbf{C}}{|\mathbf{X}| |\mathbf{C}|} \right) \quad (3.10)$$



図 3.20 クラブヘッドの節点．

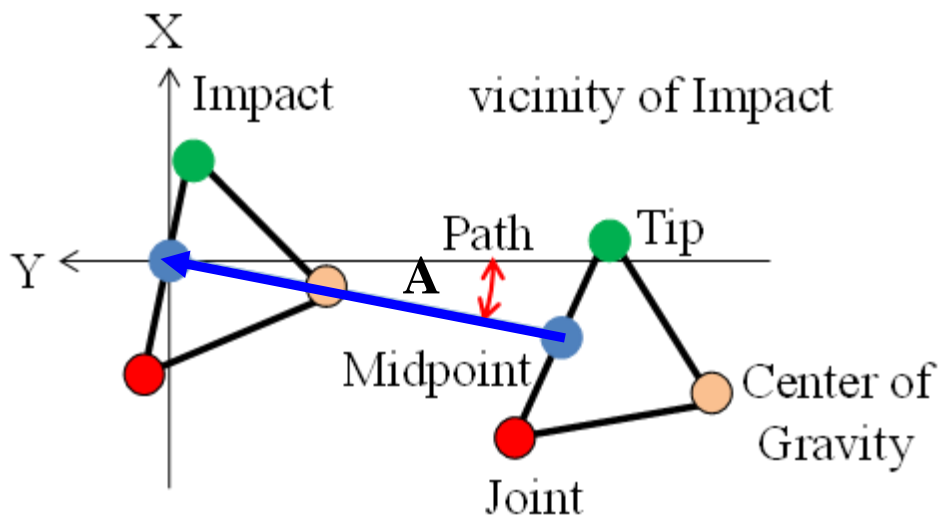


図 3.21 Path 算出のためのクラブヘッドの節点と方向の関係

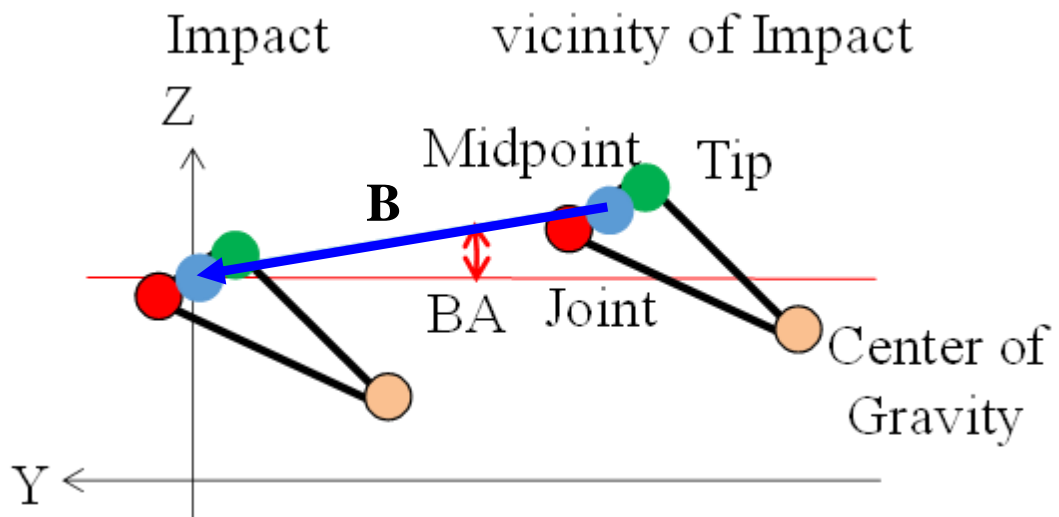


図 3.22 BA 算出のためのクラブヘッドの節点と方向の関係

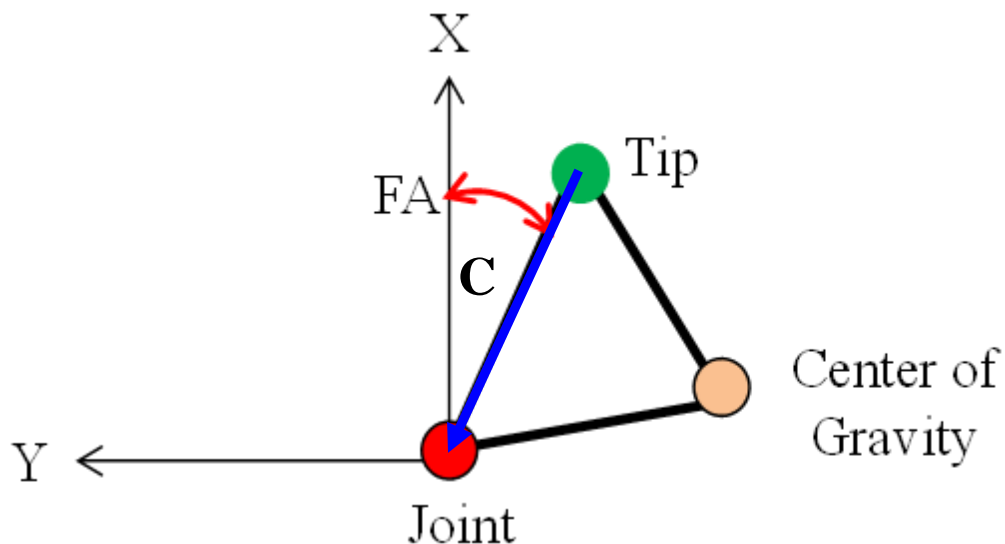


図 3.23 FA 算出のためのクラブヘッドの節点と方向の関係

3.4.2 ヘッド姿勢の算出方法

3.3 節では撓みトルクによってインパクト時の撓み量が改善されることを示した．本節では，クラブヘッドの姿勢を分析することを目的として，2.5.1 項で示した計測方法によって，新たにアベレージゴルファー1名の20球のデータを取得した．計測データを用いて，式(2.54)，式(3.7)に基づき，撓みトルクを考慮した場合と，考慮していない場合の2条件でシミュレーションを実施した．このシミュレーションに用いた把持パラメータを表3.4に示す．そして，式(3.8)～式(3.10)より， HS ， $Path$ ， BA ， FA を求め，それぞれ，計測データから算出した値（以後，計測結果と呼称）とシミュレーション結果とを比較する⁽²⁷⁾．

表 3.4 クラブヘッド姿勢算出時のバネ定数

k_y [N/m ²]	k_z [N/m ²]	k_{θ_x} [N/m]
5.0×10^4	5.0×10^4	5.0×10^4

3.4.3 ヘッド姿勢の比較

インパクト時のヘッドの姿勢を評価する指標として HS ， $Path$ ， BA ， FA を算出する．算出した評価指標について，計測結果とシミュレーション結果を比較する． HS について比較した結果を図3.24に， $Path$ について図3.25に， BA は図3.26に，

FA は図 3.27 に示す．各図の横軸はシミュレーション結果，縦軸は計測結果を示す．また，赤丸印（図内●）は撓みトルクを考慮していないシミュレーション結果，青丸印（図内●）は撓みトルクを考慮したシミュレーション結果である．

図 3.24～図 3.27 より，*HS*，*Path*，*BA*，*FA* の計測値とシミュレーションの値の差を求め，その差の絶対値を各試行で求めた．その絶対値の平均と標準偏差を算出した結果を表 3.5 に示す．表 3.5 より，撓みトルクを考慮することで，*HS*，*Path*，*BA*，*FA* の全ての評価指標を高精度に算出できている．各評価指標の精度が向上した要因として，3.3 節で示したインパクト時の撓み挙動が改善され，クラブヘッドの撓み角もモーションデータに近づいたためであると考えられる．

以上の結果より，慣性力だけでなく撓みトルクも入力として考慮することで，スイング中のシャフト撓み挙動，インパクト時のヘッド姿勢の算出精度を向上できることが明らかとなった．

しかし，表 3.5 より，*FA* について，撓みトルクを考慮した場合にも計測結果との乖離が見られる．*FA* はクラブヘッドの開閉を示す指標であり，式(3.8)で示したように，捻り角が大きな影響を与えることから，シミュレーションの精度を向上させるためには，クラブヘッドの捻り角を高精度に算出できるようにモデルを改良する必要があると考えられる．また，本章で構築したモデルでは，式(3.5)によって算出した撓み量に基づき，式(3.7)によって再度撓み量を算出する手法を採用している．そのため，式(3.5)によって算出した撓み量とモーションデータに大幅な差が生じると，式(3.7)で計算されるシミュレーション結果に誤差が蓄積され，計測結果とシミュレーション結果との乖離が生じたと考えられる⁽²⁷⁾．

表 3.5 クラブヘッド姿勢の評価指標の計測結果と
シミュレーション結果との差

	<i>HS</i> [m/s]	<i>Path</i> [deg]	<i>BA</i> [deg]	<i>FA</i> [deg]
Sim(No def torque)	1.5±0.6	0.9±0.9	1.8±0.6	5.9±1.6
Sim(Def torque)	0.6±0.4	0.6±0.7	0.4±0.3	3.9±1.7

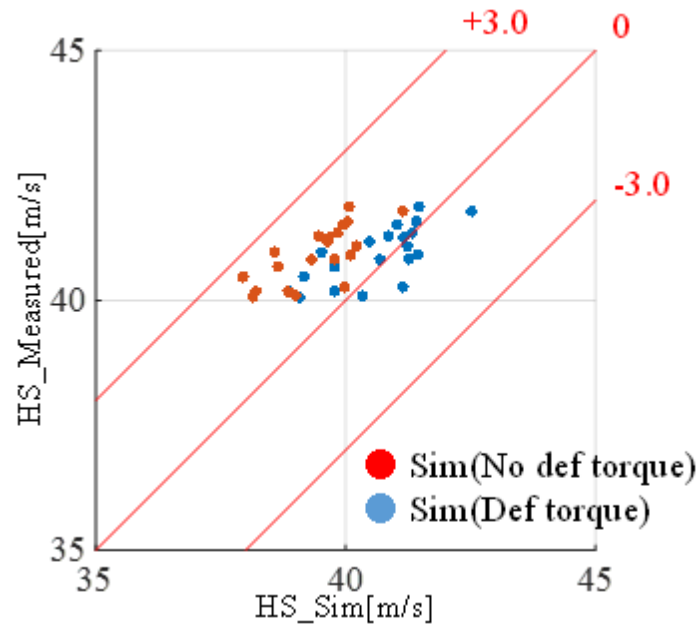


図 3.24 *HS* の計測結果とシミュレーション結果との比較

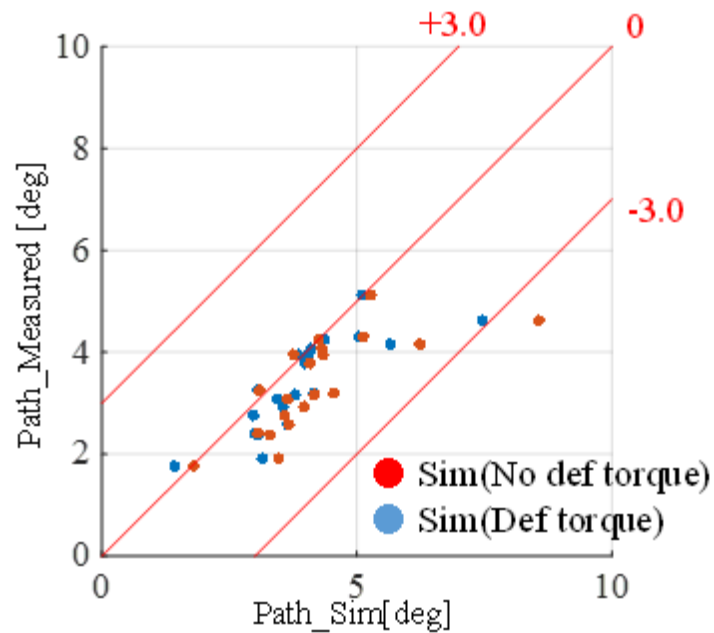


図 3.25 *Path* の計測結果とシミュレーション結果との比較

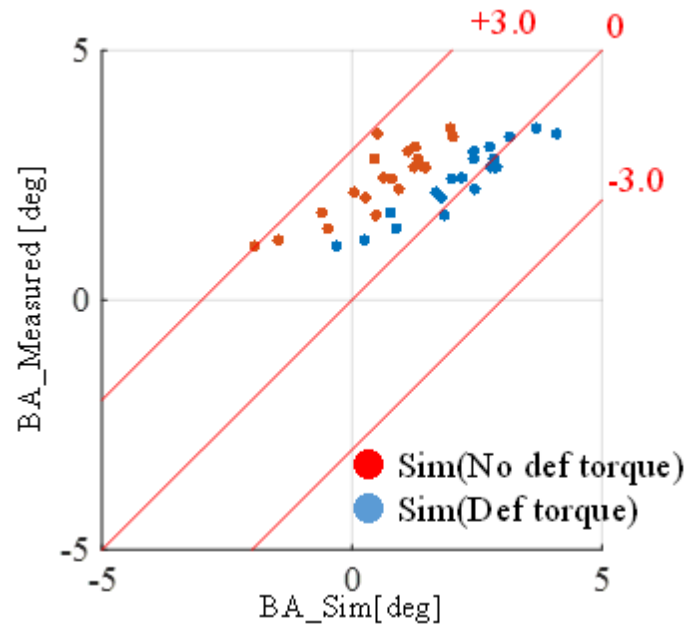


図 3.26 BA の計測結果とシミュレーション結果との比較

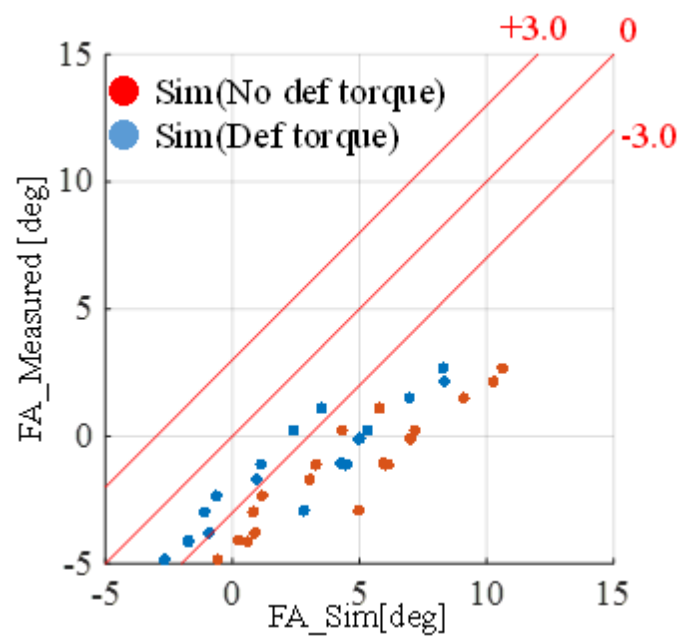


図 3.27 FA の計測結果とシミュレーション結果との比較

3.5 結論

本章では前章で構築したクラブモデルについて，クラブの撓み挙動の推定精度を高めるとともに，クラブヘッドの姿勢によってこのモデルの有効性を検証した．その結果，以下の結論が得られた．

- (1) ゴルフクラブに加わる慣性力を成分分解し，各成分の役割を検証し，その結果，フェース方向における撓み挙動は，アドレスからトップにかけての撓みの蓄積には角加速度成分が寄与し，トップからインパクトのしなり戻りには加速度成分，角速度成分が寄与している．また，トゥ方向における撓み挙動は，角加速度成分はアドレスからトップにかけてのトゥアップに寄与し，加速度成分と角加速度成分はトップからインパクトにかけてのトゥダウンに寄与していることを明らかにした．
- (2) クラブの撓みと慣性力との外積によって生じる（撓みトルクと呼称）トルクを入力として考慮することで，高精度に撓み挙動を再現した．
- (3) クラブの把持条件のバネ定数を変化させた結果，スイング中の把持条件は固定端のような硬い条件ではなく，本章で提案した柔軟性をもつ条件設定が必要であることを明らかにした．
- (4) 本章で提案した撓みトルクを考慮したシミュレーションによって，インパクト時のヘッドスピード，軌道角，ブロー角，フェース角を算出した結果，撓みトルクを考慮することで，より高精度に各評価指標を予測できることを示した．

第4章 特異値分解によるスイング解析手法の提案

4.1 緒言

シミュレーションを用いて、実際にスイングしたことの無いクラブの変形挙動を再現するためには、クラブの特性が変化したときに、どのようにスイングが変化するかを明らかにする必要がある。本章では、このスイングの変化を予測することができるシミュレーションモデルを構築することを目的として、クラブ特性とスイングとの関係性を分析する。

クラブ特性とスイングとの関係性を分析した研究として、マルチボディダイナミクスの観点より身体をセグメントモデルで表現し、各関節のトルクを調査した研究^{(4), (5)}や、筋電図によってスイング動作中の筋電位を分析したものが挙げられる^{(6), (7), (8), (9)}。どの研究も、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。しかし、スイング動作は個々の部位が互いに協調し、全体の動きを構成しているため、個々の部位とクラブとの直接的な相関をと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ことが求められる。

身体の運動をいくつかの協調動作に分ける研究には、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る^{(17), (18)}。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⁽²⁰⁾。しかし、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次元空間での協調動作の抽出が必要になる。

そこで、本章では、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。そこで、クラブ特性としてクラブ重量に着目し、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を3次元動作解析装置によって計測した。そして、計測した3次元位置座標データに基づき観測行列を構成し、観測行列に特異値分解を行うことで、ゴルフ上級者のスイングを複数の単一のモードに分解し、取得したモードとクラブ重量との関係性を明らかにする。

4.2 スイング計測実験

4.2.1 実験準備

被験者はゴルフ上級者2名（被験者 T, 被験者 N）を対象として計測を実施した。各被験者の身長、体重、平均スコアを表 4.1 に示す。計測を行うクラブは、シャフト重量のみが異なるものを2本(クラブ A, クラブ B)用意した。各クラブの

重量を表 4.2 に示す．このとき，2 本のクラブでは重心位置の変化は僅かであるため慣性モーメントの影響は小さいものとする．スイングの計測には，VICON 社製モーションキャプチャシステムを 20 台使用し，サンプリング周波数は 500[Hz]として計測を行った．身体，クラブに貼り付けたマーカ配置を図 4.1，図 4.2 に示す．身体には 53 点のマーカを配置し，クラブには 4 点のマーカを配置した．

次に，計測を行った座標系について説明する．身体の背-腹方向を X 軸，飛球線方向を Y 軸，鉛直方向（重力加速度と反対の向きを正方向）を Z 軸として，座標系を身体のマーカ配置とともに図 4.1 に示す⁽³⁴⁾．

表 4.1 被験者の基本情報

	Height [cm]	Weight [kg]	Average score
Subject T	187	84	80
Subject N	167	65	80

表 4.2 クラブの重量

	Mass [g]
Club A	337.1
Club B	314.9

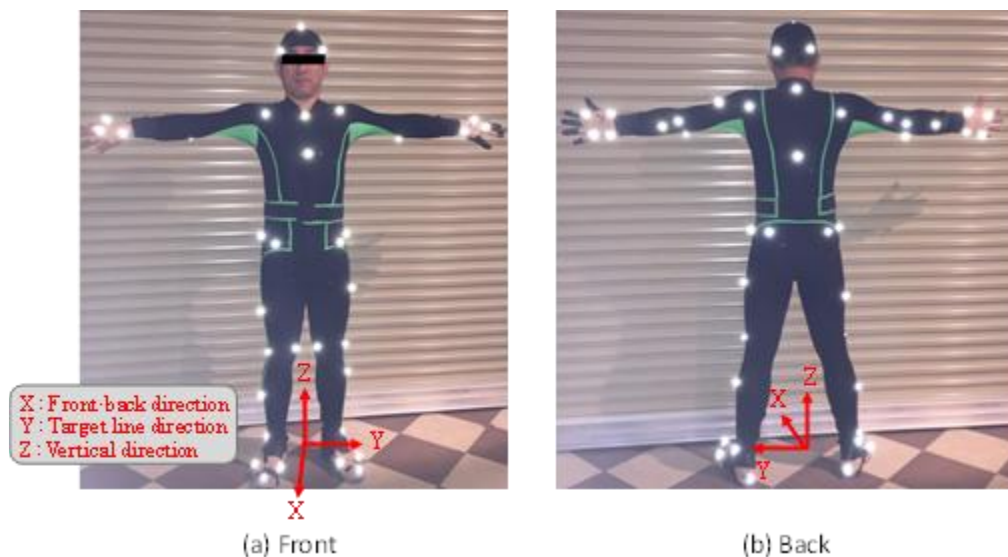


図 4.1 計測時の座標系とマーカ配置(a)正面図(b)背面図



図 4.2 クラブのマーカ配置

4.2.2 実験方法

各クラブで7球ずつの試打を行い，計14球分のスイング挙動を計測した．計測時，被験者には事前にクラブ重量を伝えず，どのクラブであっても同様のスイングを行うように指示を行った．各クラブについて，3球，または4球試打を行うごとに任意に休憩を取らせた．また，本実験では，ボールインパクトの感覚を無くすように，スポンジボールを用いて計測を行った⁽³⁴⁾．

4.3 モーションデータの解析

前節で示したスイング計測実験によって，3次元位置座標データ（以後，モーションデータと呼称）を取得した．本章では，取得したモーションデータを用いて，クラブ重量とスイングとの関係を明らかにする．

4.3.1 スイングの抽出と時間の定義

クラブ重量とスイングとの関係性を明らかにすることを目的として，取得したモーションデータを用いて，代表的な時刻であるアドレス，バックスイング中期，トップ，ダウンスイング中期，インパクト，フォロースイング中期を決定し，アドレス～フフォロースイング中期におけるスイング挙動を抽出し，それらスイング挙動によって各時刻における挙動の差を確認する．本章では，簡略化のために，バックスイング中期，ダウンスイング中期，フォロースイング中期をそれぞれ，バック9時，ダウン9時，フォロー3時と呼称する．解析に用いるスイングの各時刻の定義方法を以下に示す⁽³⁴⁾．

4.3.2 アドレスのタイミングの定義

アドレスのタイミングは，スイング動作を始動させる直前の時刻である．具体的には，クラブヘッド部に取り付けられた 3 点のマーカ挙動を平均処理し，Z 軸方向の動きに着目する．計測を開始した後，任意の時刻を基準として，Z 軸正方向の変位を確認し，基準から 0.1[s]間で 100[mm]以上の変位が見られた際，その基準となる時刻をアドレスのタイミングと定義した⁽³⁴⁾．

4.3.3 バック 9 時のタイミングの定義

バック 9 時のタイミングは，バックスイング中にゴルフクラブが地面と平行になる時刻である．本研究では，グリップ端マーカ，ヘッド部に取り付けた 3 点のマーカの平均挙動を Y-Z 平面に投影し，グリップ端から 3 点のマーカの平均挙動まで結ぶベクトルを求め，バックスイング中にベクトルが地面と平行になった時刻をバック 9 時のタイミングと定義した⁽³⁴⁾．

4.3.4 トップのタイミングの定義

トップのタイミングは，バックスイングからダウンスイングに切り替わる時刻である．クラブヘッド部に取り付けられた 3 点のマーカ挙動を平均処理し，Y 軸方向の動きに着目する．平均処理した位置データを微分処理することによって，速度データを算出し，バック 9 時タイミング以降，Y 軸方向の速度データの符号が負方向になった（ダウンスイングを開始した）時刻をトップのタイミングと定義した⁽³⁴⁾．

4.3.5 ダウン 9 時のタイミングの定義

ダウン 9 時のタイミングは，ダウンスイング中にゴルフクラブが地面と平行になる時刻である．本章では，4.3.3 項同様，Y-Z 平面に投影したグリップ端から 3 点のマーカの平均挙動まで結ぶベクトルを使用し，ダウンスイング中にベクトルが地面と平行になった時刻をダウン 9 時のタイミングと定義した⁽³⁴⁾．

4.3.6 インパクトのタイミングの定義

インパクトのタイミングは，バックスイング中にゴルフクラブがボール位置を通過する時刻である．本章では，クラブヘッド部分，フェース面付近に取り付けられたマーカ 2 点の内，どちらか一方がボール位置を通過した時刻をインパクトタイミングとして定義した⁽³⁴⁾．

4.3.7 フォロー 3 時のタイミングの定義

フォロー 3 時のタイミングは，インパクト後のフォロースイング時に，地面とクラブが平行になる時刻である．本章では，4.3.3 項，4.3.5 項同様，Y-Z 平面に投

影したグリップ端から3点のマーカの平均挙動まで結ぶベクトルを使用し、インパクト後のフォローイングで、ベクトルが地面と平行になった時刻をフォロー3時のタイミングと定義した⁽³⁴⁾。

4.3.8 モーションデータを用いた解析方法

クラブ重量に応じたスイングの変化を分析することを目的として、計測したモーションデータを比較する。重量が異なるクラブのスイングデータ全14球についてスティック線図を作成し、前節で定義したスイング中の各タイミング（アドレス、バック9時、トップ、ダウン9時、インパクト、フォロー3時）における姿勢データを抽出した。抽出した結果を、図4.3（被験者T）、図4.4（被験者N）に示す。図4.3、図4.4内、正面から見た図を(a)に、側面から見た図を(b)に示した。図4.3、図4.4より、各タイミングにおける姿勢データはクラブ間で大きく変化しておらず、また、試行間でもばらつきが少ないことがわかる。さらに、姿勢データの差を統計的手法によって詳細に分析する。

詳細データを分析することを目的として、クラブ間、試行間、各タイミングにおける姿勢の差（マーカ数53点・3方向により159自由度）を要因とした3元配置分散分析を実施した。3元配置分散分析には、数値解析ソフトMinitab 17を使用した⁽³⁴⁾。

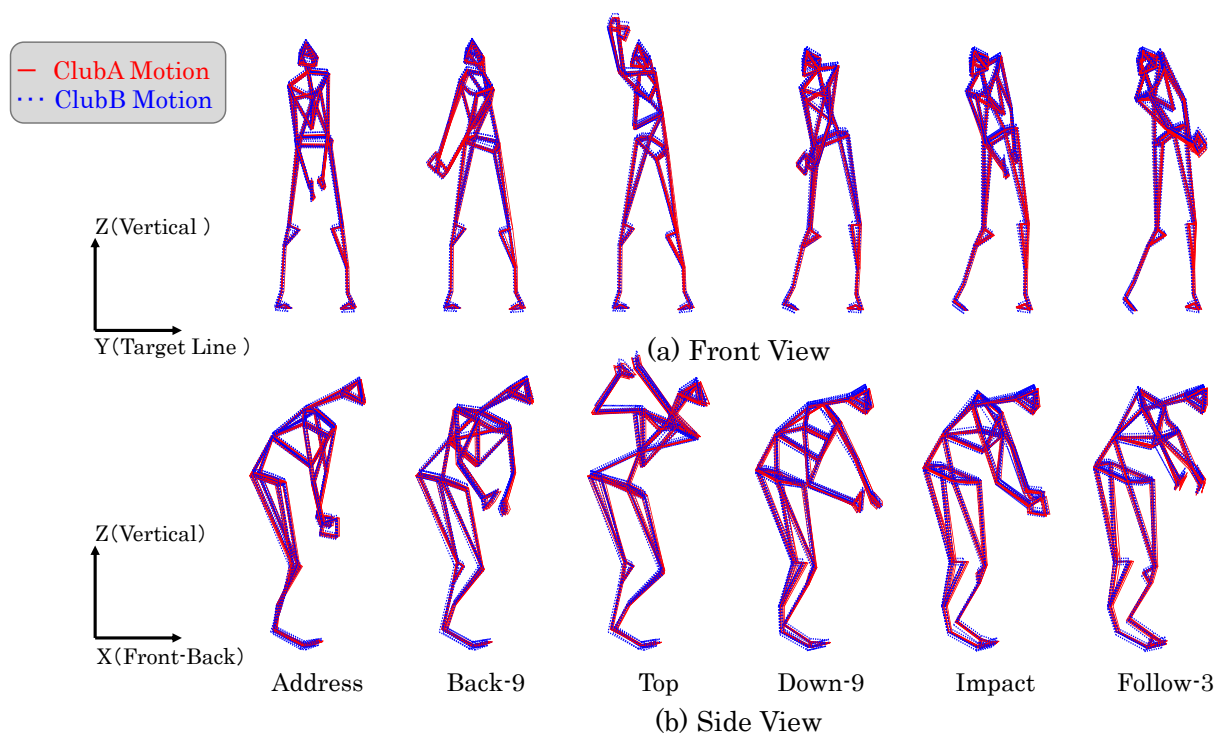


図 4.3 クラブ A(赤線)とクラブ B(青点線)を使用時の被験者 T の全スイング(a)正面図(b)側面図

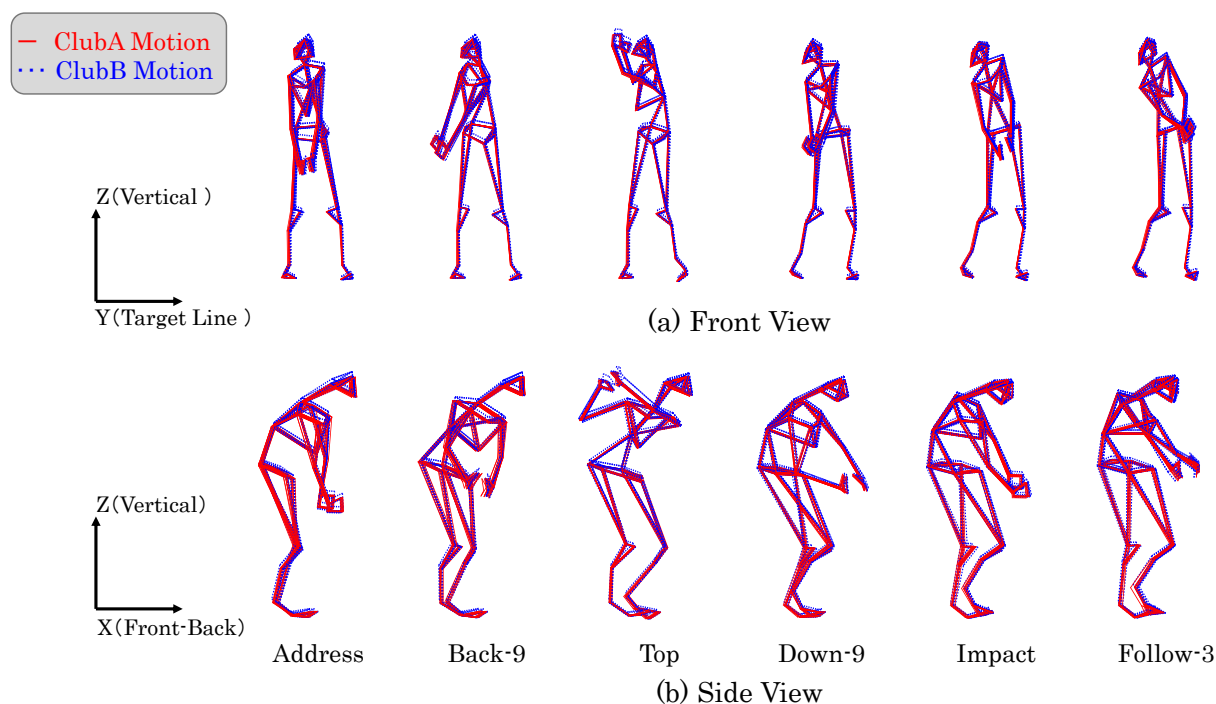


図 4.4 クラブ A(赤線)とクラブ B(青点線)を使用時の
被験者 N の全スイング(a)正面図(b)側面図

4.3.9 3 元配置分散分析結果

3 元配置分散分析を行った結果を表 4.3 に示す. 表 4.3 内, 記載されている値は, クラブ重量の違いによる姿勢データの有意差を判定するための p 値を示している.

まずは, 被験者 T について確認する. 表 4.3 より, アドレス, バック 9 時のタイミングで p 値 ≤ 0.05 となり, クラブ重量の違いによる有意な差を確認できる. しかし, トップ, ダウン 9 時, インパクト, フォロー 3 時のタイミングでは p 値 > 0.05 となり, 当該タイミングにおける姿勢データに差は見られないことがわかる. そのため, 被験者 T は, クラブの重量差によってバックスイングが変化したと考えられる.

次に, 被験者 N について確認する. 表 4.3 より, 被験者 N については, 全タイミングで p 値 ≤ 0.05 となり, 姿勢データに有意差が見られることから, クラブ重量の変化によって, スイング挙動が変化していると考えられる.

以上の結果より, 被験者 T, 被験者 N とともに, クラブ重量が変化することによって, スイング挙動に変化は確認できるが, 分散分析だけではどのようにスイング挙動が変化するかは確認できなかった. そのため, 次節より, スイング挙動を分解し, 重量差がスイングのどの部分に影響を与えるかを確認する⁽³⁴⁾.

表 4.3 クラブ A と B を使用したスイングの違いを示す P 値

	Address	Back-9	Top	Down-9	Impact	Follow-3
Subject T	0.000	0.000	0.151	0.511	0.963	0.448
Subject N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

4.4 特異値分解法

4.4.1 観測行列の構成

本研究では，観測行列の構成にあたり，3次元での解析を実現するために，位置座標データを用いる．解析に使用するデータは前章同様，アドレス～フォロー3時におけるスイング挙動とする．アドレスのタイミングを時刻第1点として，フォロー3時におけるタイミングを時刻第 N 点とした．身体に取り付けたマーカの内，第 i 番目のマーカの，時刻第 n 点の位置ベクトルを以下の式に示す．

$$\mathbf{r}_i(n)=[x_i(n) \ y_i(n) \ z_i(n)] \quad (4.1)$$

式(4.1)内， $x_i(n)$ ， $y_i(n)$ ， $z_i(n)$ はそれぞれ，第 i 番のマーカの時刻第 n 点のX, Y, Z方向成分である．そして，式(4.1)の位置ベクトルを時刻1～ N 点で作成し，それらを行ごとに並べた行列($[r_i] \in \mathbb{R}^{N \times 3}$)は以下の式で表される．

$$[r_i]=\begin{bmatrix} \mathbf{r}_i(1) \\ \vdots \\ \mathbf{r}_i(n) \\ \vdots \\ \mathbf{r}_i(N) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

また，式(4.2)の行列を第1～53番のマーカについて作成し，それらを列ごとに並べた行列($[R] \in \mathbb{R}^{N \times 159}$)は以下の式で表される．

$$[R]=[[r_1] \ \cdots \ [r_i] \ \cdots \ [r_{53}]] \quad (4.3)$$

さらに，特異値分解の基準点をアドレス時の姿勢データに近づけることを目的として，式(4.3)の行列を拡張する．まず，第 i 番のマーカのアドレスの位置ベクトルを式(4.1)より求め，それを行ごとに $2N$ 点並べた行列($[r_i(1)] \in \mathbb{R}^{2N \times 3}$)を作成する．この時， $[r_i(1)]$ の行ごとの要素はすべて $\mathbf{r}_i(1)$ となる．次に，この行列を第1～53番のマーカについて作成し，それらを列ごとに並べた行列($[R(1)] \in \mathbb{R}^{2N \times 159}$)は以

下の式で表される.

$$[R(1)] = [[r_1(1)] \cdots [r_i(1)] \cdots [r_{53}(1)]] \quad (4.4)$$

さらに, 観測行列のデータ点数を増やし, 分解能を向上させることを目的として, 式(4.3)の行列を時系列方向に反転した行列を $[R_t] \in \mathbb{R}^{N \times 159}$ とし, 観測行列 $[R_a] \in \mathbb{R}^{6N \times 159}$ を以下のように構成する⁽³⁴⁾.

$$[R_a] = \begin{bmatrix} [R(1)] \\ [R] \\ [R_t] \\ [R(1)] \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$[R_t] = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1(N) & \cdots & \mathbf{r}_i(N) & \cdots & \mathbf{r}_{53}(N) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{r}_1(n) & \cdots & \mathbf{r}_i(n) & \cdots & \mathbf{r}_{53}(n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{r}_1(1) & \cdots & \mathbf{r}_i(1) & \cdots & \mathbf{r}_{53}(1) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

4.4.2 特異値分解

式(4.5)の観測行列に関して, $[R_a]$ の時間方向(行方向)に平均をとり, その平均を行ごとに $6N$ 個並べた行列を $[R_0]$ とすると, $[R_a]$ は以下のようにモード展開することができる

$$[R_a] = [R_0] + \sum_{j=1}^{159} \lambda_j \mathbf{v}_j \mathbf{z}_j^T \quad (4.7)$$

式(4.7)内, λ_j は第 j モードの特異値, $\mathbf{v}_j \in \mathbb{R}^N$ は $[R_a] - [R_0]$ の左特異ベクトルを, $\mathbf{z}_j \in \mathbb{R}^{159}$ は $[R_a] - [R_0]$ の右特異ベクトルを表す. \mathbf{z}_j は身体各部位の位置情報を持つベクトルであり, \mathbf{v}_j は \mathbf{z}_j の時間情報を持つベクトルを表す. また, 特異値は $[R_a]$ に対する各モードの割合を表し, 特異値から $[R_a]$ に対する各モードの貢献度である寄与率 C_j は以下の式で表される^{(18), (34)}.

$$C_j = \frac{\lambda_j^2}{\sum_{j=1}^{159} \lambda_j^2} \times 100 \quad (4.8)$$

4.5 特異値分解結果

4.5.1 主要モードの検証

前節に示した方法によって、特異値分解を実施した。実施した 1 例として、被験者 T のスイングデータに着目する。式(4.8)によって算出した、各モードの寄与率について、第 1 モード～第 5 モードまでの結果を図 4.5 に示す。図 4.5 内、棒グラフは各モードの寄与率を示し、折れ線グラフは寄与率の累積和を示している。

図 4.5 より、各モードの寄与率では、第 1 モードが 89.0%を占めており、第 4 モード以降は各寄与率が 1%未満となっていることがわかる。また、第 5 モードまでの寄与率の累積和は、99.8%を占めることがわかった。以上の結果より、本章では第 5 モードまでに着目し、各モードが示す挙動を確認する⁽³⁴⁾。

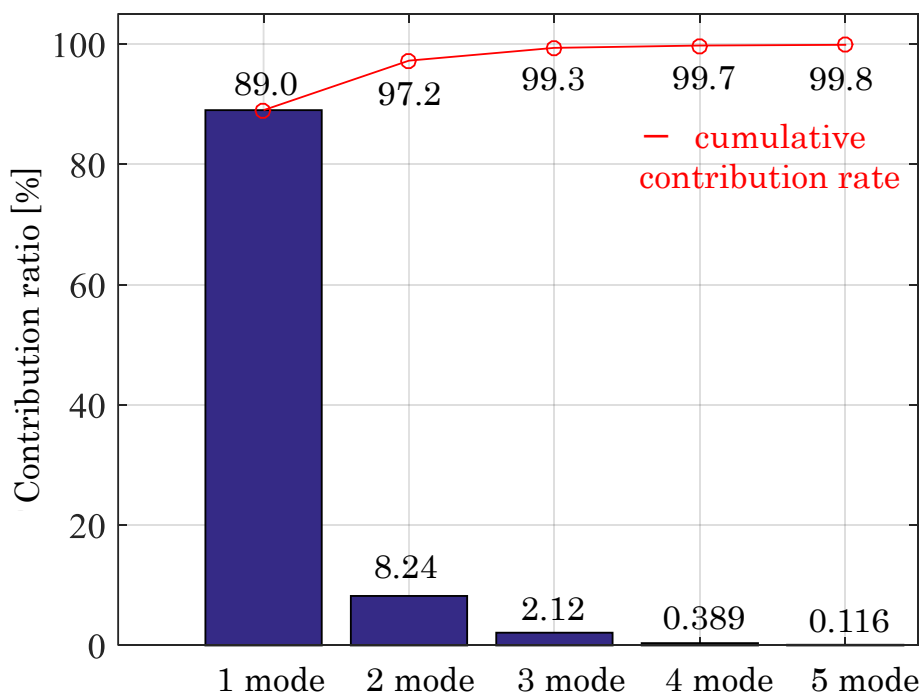


図 4.5 被験者 T のクラブ A の寄与率とその累積和

4.5.2 第 1 モードのスイング挙動

式(4.7)より，第 1 から第 k モードを重ねることで構成したスイング挙動 $[R_k]$ は以下の式で表される．

$$[R_k] = [R_0] + \sum_{j=1}^k \lambda_j \mathbf{v}_j \mathbf{z}_j^T \quad (4.9)$$

まず，第 1 モードのスイング挙動とモーションデータとを比較する．第 1 モードの挙動を算出するために，式(4.9)に $k=1$ を代入した．第 1 モードの挙動を算出した後，4.3 節で定義した各タイミング（アドレス，バック 9 時，トップ，ダウン 9 時，インパクト，フォロー 3 時）における姿勢データを抽出し，図 4.3 に示したモーションデータと比較した．比較した結果を図 4.6 に示す．図 4.6 についても図 4.3，図 4.4 同様，正面から見た図を(a)に，側面から見た図を(b)に示す（以下，特に言及しない場合は正面から見た図を(a)に，側面から見た図を(b)に示す）．

図 4.6 より，第 1 モードの挙動とモーションデータを比較すると，アドレス時の姿勢は一致している．しかし，バック 9 時，トップにかけて，第 1 モードのスイング挙動では，腕の振り幅がモーションデータに比べ小さくなっている．そして，ダウン 9 時からインパクトにかけてはアドレス時の姿勢に収束し，フォロー 3 時の姿勢はアドレス時の姿勢から変化していないことがわかる．

以上の結果より，第 1 モードの挙動はアドレスからインパクトにかけて，腕の振り上げ，振り下げ動作，脚・腰の一定の回転動作を示すと考えられる⁽³⁴⁾．

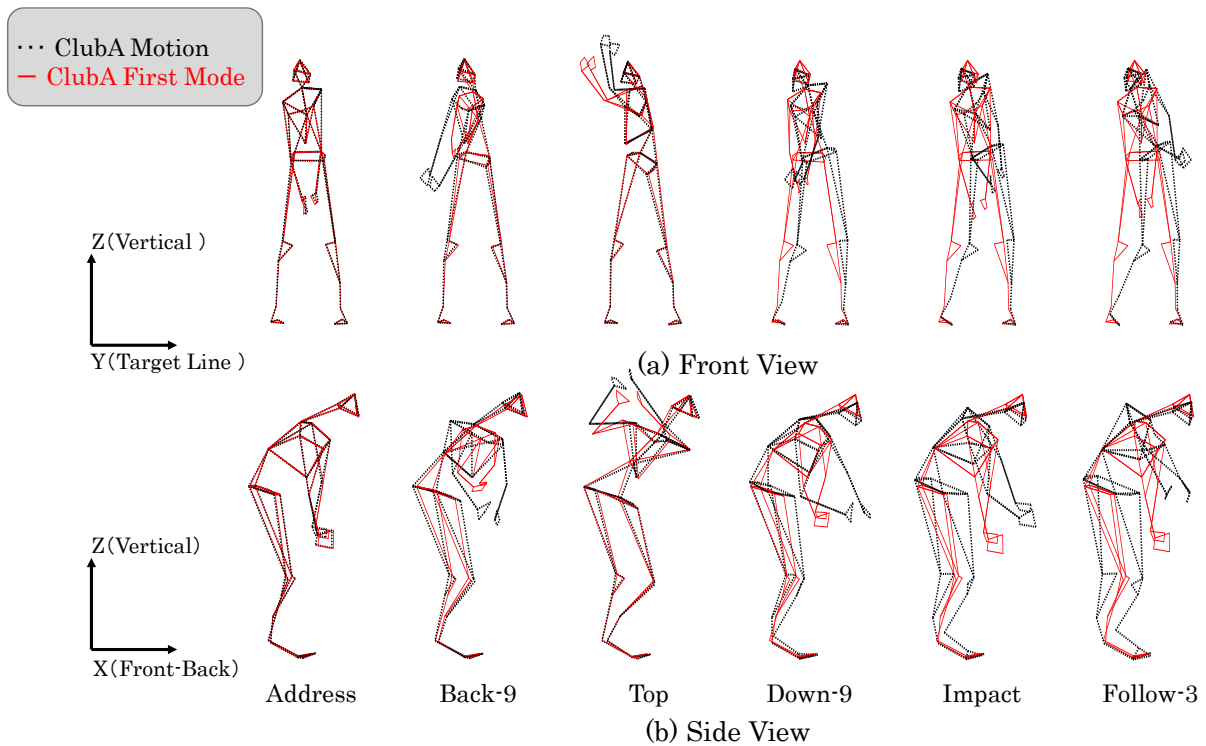


図 4.6 被験者 T の第 1 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

4.5.3 第 2 モードのスイング挙動

第 1～第 2 モードを足し合わせたスイング挙動とモーションデータとを比較する．前項同様，第 1～第 2 モードの挙動を算出するために，式(4.9)に $k=2$ を代入した．第 1～第 2 モードの挙動とモーションデータから抽出した，スイング中の各タイミングの姿勢データを比較した結果を図 4.7 に示す．図 4.7 より，第 1 モードの挙動に第 2 モードの挙動を足し合わせることによって，バック 9 時～トップにおける腕の姿勢や，フォロー 3 時における腕の姿勢データがモーションデータに近づいていることがわかる．一方，ダウン 9 時～インパクトにかけては腕の姿勢データは変化していない．これにより，第 2 モードの挙動は，腕の挙動を示すのではなく，肩の回転によって腕の挙動が励起されている可能性が高い．

以上の結果より，第 2 モードの挙動は，スイング全体における肩の回転運動を示すと考えられる⁽³⁴⁾．

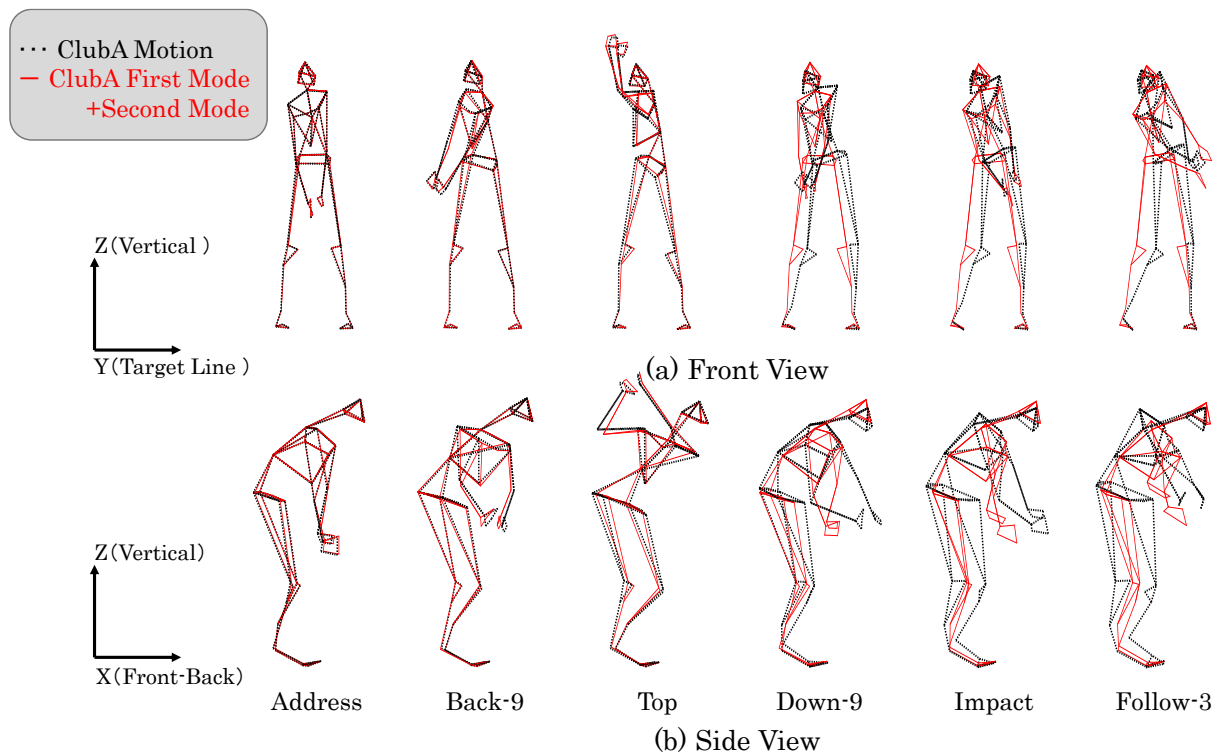


図 4.7 被験者 T の第 2 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

4.5.4 第 3 モードのスイング挙動

第 1～第 3 モードを足し合わせたスイング挙動とモーションデータとを比較する．これまで同様，第 1～第 3 モードのスイング挙動を算出するために，式(4.9)に $k=3$ を代入した．第 1～第 3 モードの挙動とモーションデータから抽出した，スイング中の各タイミングの姿勢データを比較した結果を図 4.8 に示す．図 4.8 より，第 1～第 3 モードの挙動を足し合わせることで，フォロー 3 時のタイミングでは一部モーションデータと差が見られるものの，そのスイング挙動（バックスイング～ダウンスイング）が構成されることがわかる．ダウン 9 時～インパクトにかけて腕の姿勢がモーションデータに近づいており，これらは飛球線方向への押し出し・回転動作によって，腕の挙動が励起されている可能性が高い．

以上の結果より，第 3 モードの挙動は，ダウンスイング～フォロースイングにかかる腰・脚の挙動の押し出し挙動・回転挙動を示すと考えられる⁽³⁴⁾

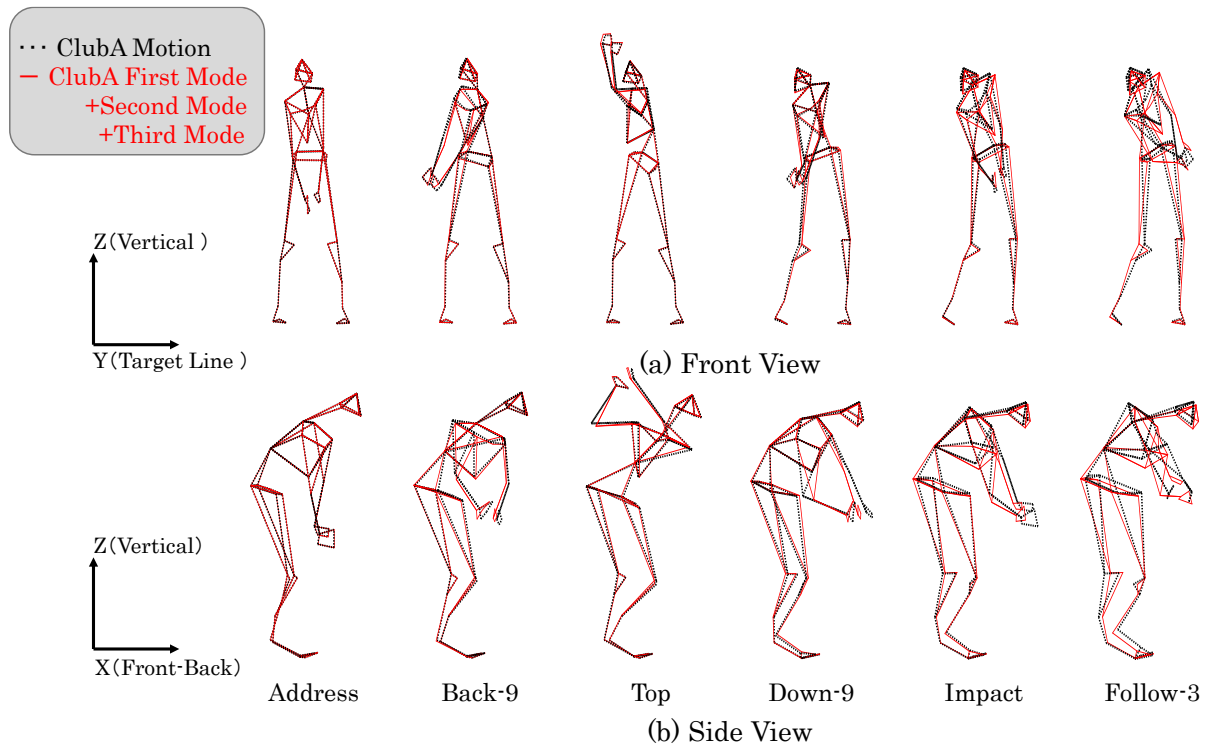


図 4.8 被験者 T の第 3 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

4.5.5 第 4 モードのスイング挙動

第 1～第 4 モードを足し合わせたスイング挙動とモーションデータとを比較する．これまで同様，第 1～第 4 モードのスイング挙動を算出するために，式(4.9)に $k=4$ を代入した．第 1～第 4 モードの挙動とモーションデータから抽出した，スイング中の各タイミングの姿勢データを比較した結果を図 4.9 に示す．図 4.9 より，第 1～第 4 モードの挙動を足し合わせることで，インパクトにおける左肩から腕にかけての姿勢がモーションデータに近づいており，その他部位については変化が無い．そのため，第 4 モードの挙動は，他の部位の動作による励起があるとは考えにくい．

以上の結果より，第 4 モードの挙動は，インパクト付近における肩・腕の回転挙動を示すと考えられる⁽³⁴⁾．

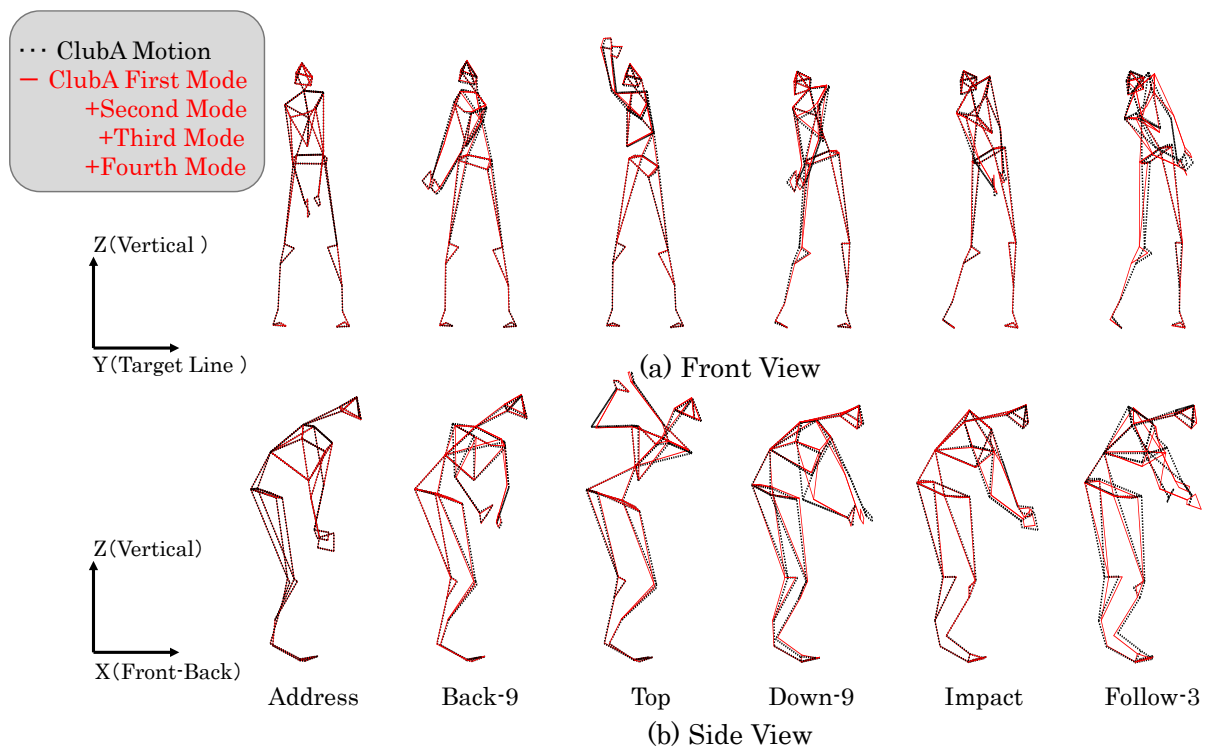


図 4.9 被験者 T の第 4 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

4.5.6 第 5 モードのスイング挙動

第 1～第 5 モードを足し合わせたスイング挙動とモーションデータとを比較する．これまで同様，第 1～第 5 モードのスイング挙動を算出するために，式(4.9)に $k=5$ を代入した．第 1～第 5 モードの挙動とモーションデータから抽出した，スイング中の各タイミングの姿勢データを比較した結果を図 4.10 に示す．図 4.10 より，第 1～第 5 モードの挙動を足し合わせることで，フォロー 3 時における腕の姿勢がモーションデータに近づいていることがわかる．フォロー 3 時を除く，他タイミングにおいては，姿勢データに変化が見られないことから，第 5 モードも第 4 モード同様，他の部位の動作による励起があるとは考えにくい．

以上の結果より，第 5 モードの挙動は，フォロースイングにおける腕の伸展挙動であると考えられる⁽³⁴⁾．

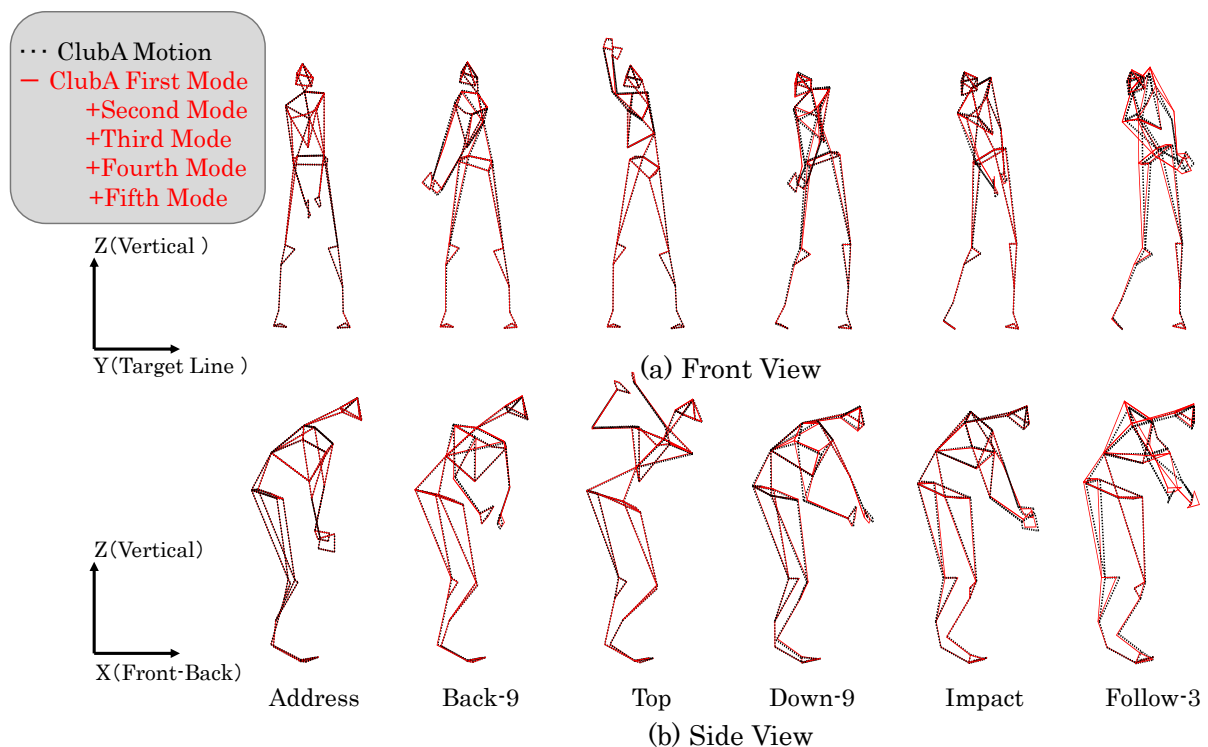


図 4.10 被験者 T の第 5 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

4.5.7 第 1 モードから第 5 モードまでのスイング挙動

第 1 モードから第 5 モードまでのスイング挙動を調査した結果，おおよそ第 3 モードまでの挙動でスイング動作が構成され，第 1～第 3 モードまでは他部位によって，腕の挙動が励起されており，第 4，第 5 モードの挙動では，肩・腕の回転挙動，腕の伸展挙動によって，スイング動作を調整する役割があることがわかった．それら動作についてまとめた結果を表 4.4 に示す⁽³⁴⁾．

表 4.4 各モードとスイング挙動との関係

	Action
First mode	Steady rotation of legs, waist and rotation of arms from address timing to impact timing
Second mode	Rotation of shoulders in the swing as a whole
Third mode	Extrusion motion and rotation of legs and waist in downswing to follow swing
Forth mode	Rotation motion of shoulders and arms around impact timing
Fifth mode	Extension motion of arms in follow swing

4.6 クラブ重量と特異値分解結果との関係

これまでの取り組みによって，被験者 T，被験者 N とともに試行が変化しても，各モードで同様の挙動を示すことがわかった．本節では，各モードが示す挙動が

ら姿勢データを抽出し、4.3 節に記載した 3 元配置分散分析を行うことで、重量の違いによってスイングのどの部分に変化しているかを確認する。

前節までのモードの挙動は、式(4.7)によって、モードの累積和を算出した。本節では、累積和ではなく、他のモードの挙動による影響を除外するために、モード単体の挙動を用いて解析を行う。モード単体の挙動は、式(4.7)に示した右辺第 2 項を用い、以下の式で表される。

$$R_j(n_p) = \lambda_j \mathbf{v}_j(n_p) \mathbf{z}_j \quad (4.10)$$

式(4.10)内、 n_p はスイング中の各タイミングを表し、 $\mathbf{v}_j(n_p)$ は第 j モードの各代表点での時間励起パターンを示す。式(4.10)によって、各モード単体の挙動を算出し、3 元配置分散分析を実施した。モード単体の挙動は、モード次数が上がるにつれて、スティック線図データを用いて、目視によって違いを確認することは困難となるため、スティック線図データを用いた説明は本論文では割愛する。

式(4.10)によって算出したモードの挙動から、各タイミングにおける姿勢データを抽出し、3 元配置分散分析を行った。被験者 T の結果を表 4.5 に、被験者 N の結果を表 4.6 に示す。表 4.5、表 4.6 に記載された p 値 ≤ 0.05 の場合には、その領域を青色で塗りつぶした。以下、表 4.5、表 4.6 を用いて、クラブ重量の違いによる、各モードの挙動の違いを確認する⁽³⁴⁾。

4.7 被験者 T のクラブ重量と各モードのスイング挙動との関係

4.7.1 第 1 モードの挙動比較結果

表 4.5 より、第 1 モードにおける分散分析結果では、アドレス、トップにおいて p 値 ≤ 0.05 となり、姿勢データに違いが確認できる。一方、バック 9 時、ダウン 9 時、インパクト、フォロー 3 時では、 p 値 > 0.05 となり、姿勢データに違いが見られない。表 4.4 より、第 1 モードの挙動は、腕の振り上げ、振り下げ動作、腰・脚の回転動作を示している。以上の結果より、重量の違いによって、アドレス、トップ時に、腕の位置や、腰・脚の回転に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾。

4.7.2 第 2 モードの挙動比較結果

第 2 モードについて確認する。表 4.5 より、第 2 モードでは、全体を通して p 値 ≤ 0.05 となり、各タイミングにおける姿勢データに違いを確認できる。表 4.4 より、第 2 モードの挙動は、肩の回転運動を示している。以上の結果より、重量の違いによって、スイング全体で、肩の回転に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾。

4.7.3 第3モードの挙動比較結果

第3モードについて確認する．表 4.5 より，第3モードでは，バック 9 時，トップ，インパクト，フォロー3 時において p 値 ≤ 0.05 となり，姿勢データに違いが確認できる．一方，アドレス，ダウン 9 時では p 値 >0.05 となり，姿勢データに違いは見られない．これらから，トップ付近のバックスイングと，インパクト付近からのフォロースイングにて，姿勢データに違いがあると考えられる．表 4.4 より，第3モードの挙動は，ダウンスイング～フォロースイングにかけて腰・脚の押し出し挙動，回転挙動を示している．

表 4.5 ではトップ付近のバックスイングに差があることを示すが，表 4.4 では，バックスイングにおける挙動を確認できない．これは，統計的に差は見られるものの，目視では挙動の差を確認できないためである．以上の結果より，重量の違いによって，ダウンスイング～フォロースイングにおける腰・脚の押し出し挙動・回転挙動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.7.4 第4モードの挙動比較結果

第4モードについて確認する．表 4.5 より，第4モードでは，アドレス，バック 9 時，ダウン 9 時，インパクト，フォロー3 時において p 値 ≤ 0.05 となり，姿勢データに違いが確認できる．一方，トップでは p 値 >0.05 となり，姿勢データに違いは見られない．これらから，アドレス付近のバックスイング，インパクト付近～フォロースイングで姿勢データに違いがあると考えられる．表 4.4 より，第4モードの挙動は，インパクト付近における肩・腕の回転挙動を示している．アドレス，バック 9 時，ダウン 9 時の挙動については，第3モード同様，統計的に差は見られるものの，目視では挙動の差を確認できない．以上の結果より，重量の違いによって，インパクト付近における肩・腕の回転挙動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.7.5 第5モードの挙動比較結果

第5モードについて確認する．表 4.5 より，第5モードでは，ダウン 9 時，フォロー3 時において p 値 ≤ 0.05 となり，姿勢データに違いが確認できる．一方，アドレス，バック 9 時，トップ，インパクトでは p 値 >0.05 となり，姿勢データに違いは見られない．これらから，インパクト付近のダウンスイング，インパクト後のフォロースイングで姿勢データに違いがあると考えられる．表 4.4 より，第5モードの挙動は，フォロースイングにおける腕の伸展挙動を示している．ダウン 9 時の挙動については，第3，第4モード同様，統計的に差が見られるものの，目視では挙動の差を確認できない．以上の結果より，重量の違いによって，フォロースイングにおける腕の伸展挙動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.8 被験者 N のクラブ重量と各モードのスイング挙動との関係

4.8.1 第 1 モードの挙動比較結果

被験者 T 同様に，被験者 N についての挙動を確認する．

表 4.6 より，第 1 モードについては，全体を通して p 値 ≤ 0.05 となり，各タイミングにおける姿勢データに違いを確認できる．表 4.4 より，第 1 モードの挙動は，アドレスからインパクトにかけて，腕の振り上げ，振り下げ動作，腰・脚の回転動作を示しており，インパクト以降は，アドレス時の姿勢に収束している．そのため，スイング全体で p 値 ≤ 0.05 となっていると考えられる．以上の結果より，重量の違いによって，アドレスからインパクトにかけての腕の位置，腰・脚の回転挙動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.8.2 第 2 モードの挙動比較結果

第 2 モードについて確認する．表 4.6 より，全体を通して p 値 ≤ 0.05 となり，各タイミングにおける姿勢データに違いを確認できる．表 4.4 より，第 2 モードの挙動は，肩の回転運動を示している．以上の結果より，重量の違いによって，スイング全体で，肩の回転に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.8.3 第 3 モードの挙動比較結果

第 3 モードについて確認する．表 4.6 より，第 3 モードでは，アドレス，ダウン 9 時，インパクト，フォロー 3 時において p 値 ≤ 0.05 となり，姿勢データに違いが確認できる．一方，バック 9 時，トップでは p 値 > 0.05 となり，姿勢データに違いは見られない．これらから，ダウンスイング～フォロースイングにかけて姿勢データに違いがあると考えられる．表 4.4 より，第 3 モードの挙動は，ダウンスイング～フォロースイングにかけて腰・脚の押し出し挙動，回転挙動を示している．こ以上の結果より，重量の違いによって，ダウンスイング～フォロースイングにかけての腰・脚の押し出し挙動，回転挙動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾．

4.8.4 第 4 モードの挙動比較結果

第 4 モードについて確認する．表 4.6 より，第 4 モードでは，アドレス，トップ，インパクト，フォロー 3 時において p 値 ≤ 0.05 となり，姿勢データに違いが確認できる．一方，バック 9 時，ダウン 9 時では p 値 > 0.05 となり，姿勢データに違いは見られない．これらから，トップ位置姿勢とインパクト～フォロースイングにかけて姿勢データに違いがあると考えられる．表 4.4 より，第 4 モードの挙動は，インパクト付近における肩・腕の回転挙動を示している．そのため，トップ付近，フォロースイングの挙動については，被験者 T の第 3～第 5 モード同様，

統計的に差は見られるものの、目視では挙動の差を確認できない。以上の結果より、重量の違いによって、インパクト付近の肩・腕の回転運動に差が見られると考えられる⁽³⁴⁾。

4.8.5 第 5 モードの挙動比較結果

第 5 モードについて確認する。表 4.6 より、第 5 モードでは、トップ、インパクトにおいて p 値 ≤ 0.05 となり、姿勢データに違いが確認できる。一方、アドレス、バック 9 時、ダウン 9 時、フォロー 3 時では p 値 > 0.05 となり、姿勢データに違いは見られない。表 4.4 より、第 5 モードの挙動は、フォロースイングにおける腕の伸展動作である。そのため、トップ、インパクトの挙動については、第 4 モード同様、統計的に差は見られるものの、目視では挙動の差を確認できない。以上の結果より、重量が変化しても、被験者 N の第 5 モードが示す挙動については変化しないと考えられる⁽³⁴⁾。

4.9 重量違いによって影響を与える部位の特定

上述した結果より、クラブ重量が変化した場合、モーションデータのみでは、スイングが変化しているタイミングは被験者によって異なっていた。モーションデータの特異値分解によってスイング動作を単一のモードに分解することで、被験者 T、被験者 N とともに、第 2 モードの挙動（肩の回転挙動）がスイング全体で変化し、また、第 3 モードの挙動（腰・脚の押し出し、回転挙動）がインパクト～フォロースイングで変化していることがわかった。本章では、重量の差のみの比較となり、また、スポンジボールの試打であるため、試打を行なったクラブの優劣までは見ていないが、今後、クラブ硬さの違いや、さらに、実際のゴルフボールを試打する際のスイングを計測し、試打結果の優劣を判定すれば、同様の解析によって、硬さによって変化する部位の特定や、スイングの変化を考慮した、シミュレーションモデルによるクラブの設計に活かせると考えられる⁽³⁴⁾。

表 4.5 クラブ A とクラブ B 使用時の被験者 T の
各モードスイングの違いを示す P 値（青塗り枠は $p \leq 0.05$ ）

	Address	Back-9	Top	Down-9	Impact	Follow-3
First mode	0.039	0.470	0.036	0.457	0.185	0.662
Second mode	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
Third mode	0.338	0.000	0.000	0.251	0.003	0.000
Forth mode	0.000	0.000	0.305	0.000	0.000	0.000
Fifth mode	0.527	0.385	0.107	0.001	0.666	0.000

表 4.6 クラブ A とクラブ B 使用時の被験者 N の
各モードスイングの違いを示す P 値（青塗り枠は $p \leq 0.05$ ）

	Address	Back-9	Top	Down-9	Impact	Follow-3
First mode	0.000	0.000	0.000	0.031	0.000	0.000
Second mode	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.038
Third mode	0.000	0.530	0.343	0.000	0.000	0.002
Forth mode	0.006	0.060	0.006	0.113	0.006	0.001
Fifth mode	0.951	0.180	0.034	0.530	0.006	0.083

4.10 設計への応用の検討

本章では、ゴルフスイングという複雑な運動を、特異値分解によって複数のモードに分解し各モードとスイング挙動との関係を検討した。また、重量とモードとの関係についても分析し、上級者 2 名では腕の振りが共通して変化することが明らかとなった。以上の結果より、本手法は様々な設計パラメータとスイングとを関連付けられる可能性を示唆しており、将来的にはクラブ重量だけでなく、クラブの剛性、慣性モーメント、調子など様々な指標とスイングとの関係性を明らかにできると考えられる。この手法によって、一部の動作を変化させスイングを変化させることで、先行研究で構築したクラブモデルと組み合わせ、スイングの変化を可視化し、スイング全体を考慮した設計手法を確立していく⁽³⁴⁾。

4.11 結論

本章ではゴルフスイングの協調動作を抽出することを目的として、ゴルフスイングデータを計測し、特異値解析を実施した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 計測したゴルフスイング動作に、アドレスデータの拡張、反転データの拡張を行うことで、安定的にモードを抽出することが可能となった。

- (2) ゴルフスイングデータに，特異値分解を行うことによって，ゴルフスイングを複数の単一のモードに分解し，各挙動を解明した．
- (3) クラブ重量の変化に対して，各被験者で共通して変化している部位を特定した．特に第 2 モードの挙動（肩の回転挙動）がスイング全体で変化し，また，第 3 モードの挙動（腰・脚の押し出し，回転挙動）がインパクト～フォロースイングで変化することを明らかにした．

第 5 章 特異値分解によるスイングの評価

5.1 緒言

前章では，クラブ特性の変化に応じたスイングの変化を明らかにすることを目的として，クラブ重量の変化に応じた協調動作の変化を分析した．具体的には，スイング挙動に特異値分解を行い，協調動作を複数の単一のモードとして抽出し，分散分析によって単一のモードとクラブ重量との関係を分析した．その結果，クラブ重量が変化したことによるスイングの変化を，モードの変化によって明らかにした．次に，本章では前章で構築した特異値分解による協調動作抽出手法の有効性を検証する．

本章では，協調動作抽出手法の有効性を示すことを目的として，意図的にスイングを変化させた時のスイングの違いを，抽出したモードによって明らかにする．スイングの違いとして，本章では 2 種類のスイングに着目し，一つは，インサイドアウトと呼称される軌道でクラブを振り下ろすドロースイング（以後，ドローと呼称）であり，もう一つは，アウトサイドインと呼称される軌道でクラブを振り下ろすフェードスイング（以後，フェードと呼称）である⁽³⁵⁾．ドローとフェードの軌道差を，特異値分解によって抽出したモードによって明らかにし，提案したスイング分析手法の有効性を示す．

そこで，本章では，安定的にスイングの打ち分けが可能な上級者 1 名を被験者とし，意図的にドローとフェードを打ち分けたときの各スイングをモーションキャプチャシステム(VICON)によって取得する．取得したスイングに特異値分解を行い，スイングを単一のモードに分解し，モードによってスイングの違いを明らかにする．

5.2 スイング計測実験

5.2.1 実験準備

被験者はゴルフ上級者 1 名（被験者 S）を対象として計測を実施した．計測を行った被験者の身長，体重，平均スコアを表 5.1 に示す．計測を行うクラブは，被験者が振りやすいものを用意した．スイングの計測には，VICON 社製モーションキャプチャシステムを 20 台使用し，サンプリング周波数は 500[Hz]として，身体，クラブに貼り付けたマーカを計測した．身体，クラブに貼り付けたマーカ配置，計測した座標系は第 4 章 4.2.1 項と同様のものとした．

表 5.1 被験者の基本情報

	Height [cm]	Weight [kg]	Average score
Subject S	171	70	75

5.2.2 実験方法

被験者はドローとフェードともに7球の試打を行い、計14球のスイングを計測した。計測時、被験者には意図的にスイングを打ち分けるように指示し、各スイングで連続して7球の試打を行った。また、本実験では、ボールインパクトの感覚を無くすように、スポンジボールを用いて計測を行った⁽³⁴⁾。

5.3 モーションデータの解析

5.2節で示したスイング計測実験によって、3次元位置座標データ（以後、モーションデータと呼称）を取得した。モーションデータはドローとフェードの2種類のスイング挙動を取得した。各スイングの打ち分けは、ヘッドに取り付けたマーカの計測データより求めた軌道とフェースの向きから判断した。本章では取得したモーションデータを用いて、同一被験者におけるスイングの違いを分析する。

5.3.1 スイングの抽出と時間の定義

ドローとフェードの軌道差を明らかにすることを目的として、取得したモーションデータを用いて、代表的な時刻におけるスイング挙動を抽出し、それらスイング挙動によって各時刻における挙動の差を確認する。解析に用いるスイングの代表的な時刻には、第4章4.3節に示したアドレス～フォロー3時に加えて、フォロースイングの後期においても軌道差を抽出することを目的として、新たにフィニッシュのタイミングを以下のように定義する。

5.3.2 フィニッシュのタイミングの定義

フィニッシュのタイミングは、インパクト後のフォロースイング時に、地面とクラブが平行になる時刻である。本章では、第4章の4.3.3項、4.3.5項、4.3.7項同様、Y-Z平面に投影したグリップ端から3点のマーカの平均挙動まで結ぶベクトルを使用し、フォロー3時以降のフォロースイングで、ベクトルが地面と平行になった時刻をフィニッシュのタイミングと定義した。

5.3.3 モーションデータを用いた解析方法

ドローとフェードの違いを明らかにすることを目的として、計測したモーションデータを比較する。本実験では意図的にスイングを打ち分けていることから、モーションデータから抽出した姿勢データを目視によって比較する。スイングデータ全14球についてスティック線図を作成し、前節で定義したスイング中の各タイミング（アドレス、バック9時、トップ、ダウン9時、インパクト、フォロー3時、フィニッシュ）における姿勢データを抽出した。抽出した結果を図5.1に示す。図5.1内、正面から見た図を(a)に、側面から見た図を(b)に示した。図5.1よ

り，各タイミングにおける姿勢データを比較した結果を表 5.2 に示す．表 5.2 より，ドローとフェードの軌道差は，バックスイングでは腕の挙動によって生み出され，ダウンスイングからフォロースイングにかけては，腕と腰，脚の挙動によって生み出されることがわかる．

これら軌道差を生み出す挙動の違いと，第 4 章で示したモードとの関係性を明らかにすることを目的として，次節では，スイング挙動を分解し，ドローとフェードの軌道差を生み出す挙動の違いをモードによって分析する．

表 5.2 モーションデータによって分析した
ドローとフェードのスイング挙動の違い

	Difference of action
Back-swing in address to top	<ul style="list-style-type: none"> • In the draw swing, the arm passes through the trajectory near the body rather than the fade swing. • In the draw swing, the position of the arm in the vertical direction at the top is lower than the fade swing
Down-swing in top to impact	<ul style="list-style-type: none"> • In the draw swing, the arm passes through the trajectory near the body rather than the fade swing.
Follow-swing in impact to finish	<ul style="list-style-type: none"> • In the draw swing, the trajectory of the arm is located away from the body than the fade swing. • In the draw swing, the legs and waist are extruding in the flying line direction than the fade swing.

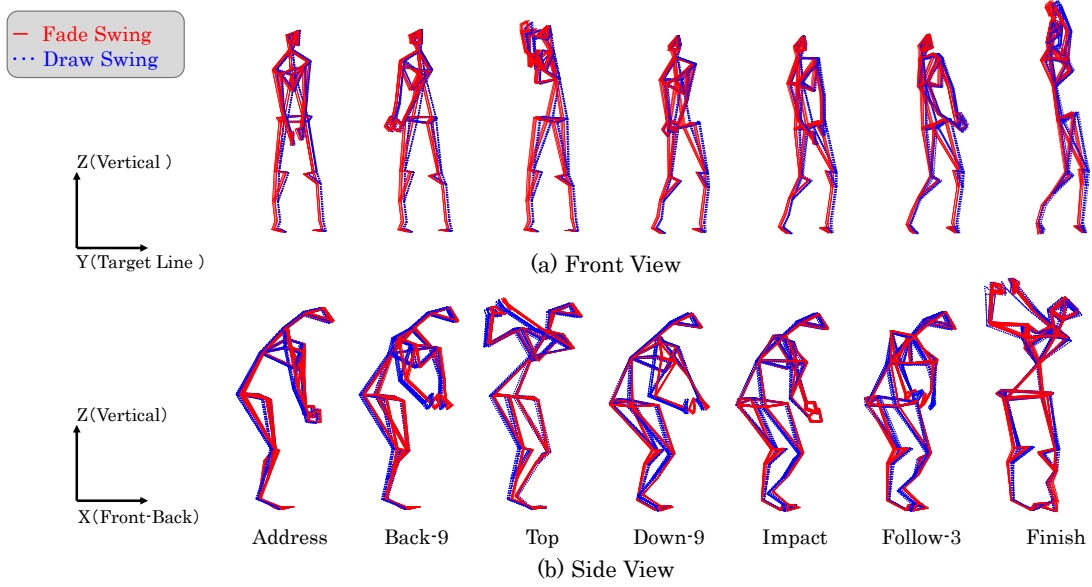


図 5.1 ドロー（青点線）とフェード（赤実線）の全スイング(a)正面図(b)側面図

5.4 特異値分解法

解析に使用するデータは，アドレス～フィニッシュにおけるスイング挙動とする．アドレスのタイミングを時刻第 1 点として，フィニッシュにおけるタイミングを時刻第 N 点とした．このスイングデータを用いて，第 4 章の 4.4.1 節に示した式(4.5)より得られる観測行列 $[R_a]$ を算出する．この観測行列 $[R_a]$ に関して，4.4.2 節と同様に， $[R_a]$ の時間方向（行方向）に平均をとり，その平均を行ごとに $6N$ 個並べた行列を $[R_0]$ とすると， $[R_a]$ は以下のようにモードに分解することができる．

$$[R_a] = [R_0] + \sum_{j=1}^{159} \lambda_j \mathbf{v}_j \mathbf{z}_j^T \quad (5.1)$$

式(5.1)内， λ_j は第 j モードの特異値， $\mathbf{v}_j \in \mathbb{R}^N$ は $[R_a] - [R_0]$ の第 j モードの左特異ベクトルを， $\mathbf{z}_j \in \mathbb{R}^{159}$ は $[R_a] - [R_0]$ の第 j モードの右特異ベクトルを表す．また，特異値は $[R_a]$ に対する各モードの割合を表し，特異値から $[R_a]$ に対する各モードの貢献度である寄与率 C_j は以下の式で表される^{(18), (34)}．

$$C_j = \frac{\lambda_j^2}{\sum_{j=1}^{159} \lambda_j^2} \times 100 \quad (5.2)$$

5.5 特異値分解結果

5.5.1 主要モードの検証

前節に示した方法によって，特異値分解を実施した．ドロー，フェードの各スイングにおいて実施した例を示す．式(5.1)によって算出した，第1モード～第5モードまでの寄与率の結果を，ドローにおいて図5.2，フェードにおいて5.3に示す．図5.2，図5.3内，棒グラフは各モードの寄与率を示し，折れ線グラフは寄与率の累積和を示している．

図5.2，図5.3より，各スイングともに第1モードと第2モードの寄与率の累積和が96.1%を占めており，第4モード以降は各寄与率が1%未満となっていることがわかる．また，第5モードまでの寄与率の累積和は，99.6%を占めることがわかった．これら結果より，本研究では第5モードまでに着目し，各モードが示す挙動をドローとフェードで比較する．

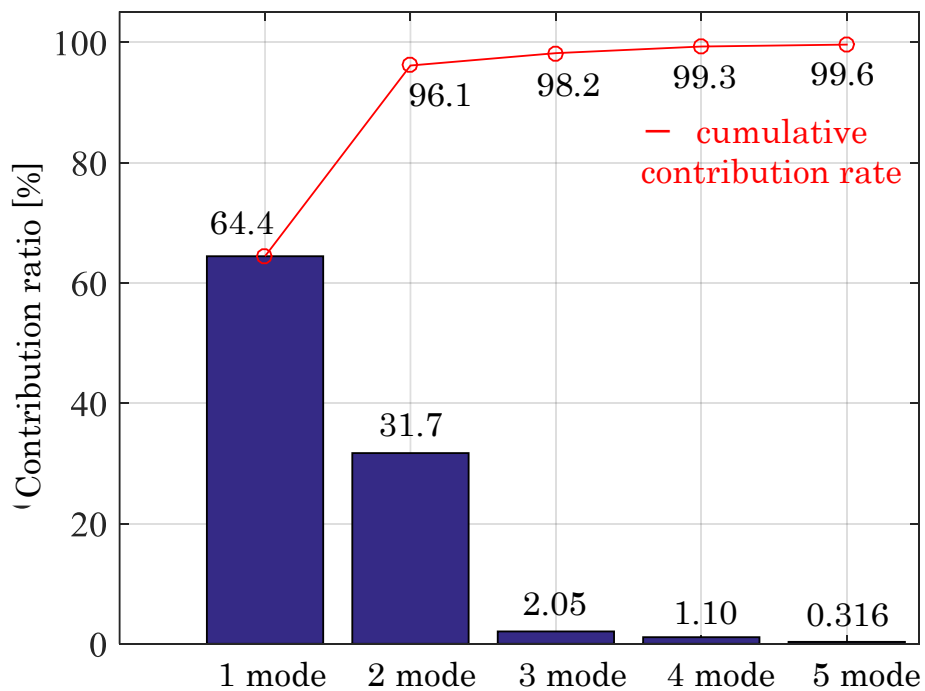


図 5.2 ドローの寄与率とその累積和

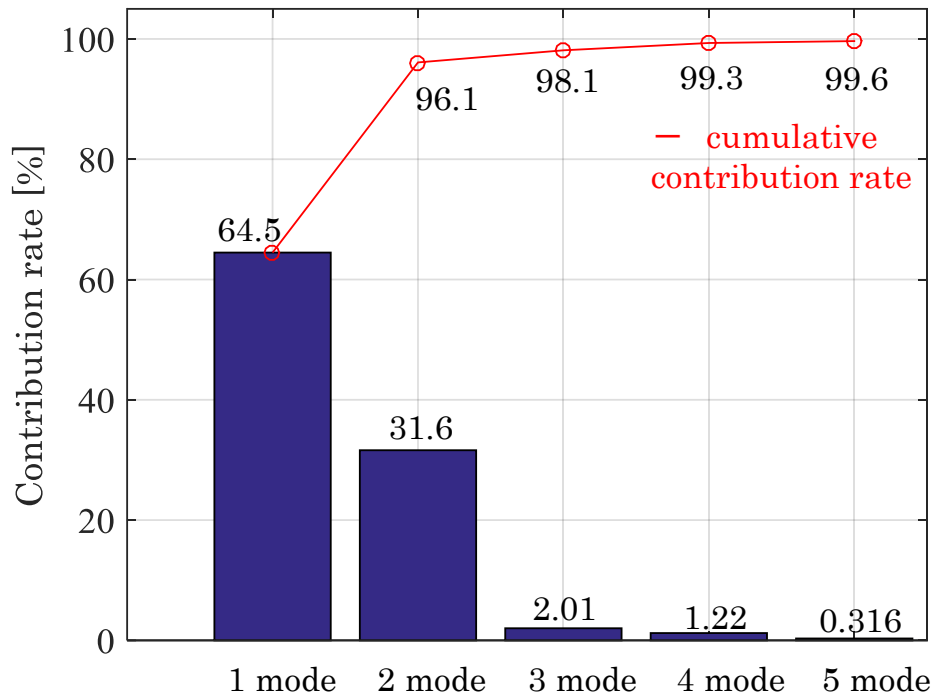


図 5.3 フェードの寄与率とその累積和

5.5.2 第 1 モードのスイング挙動の比較

式(5.1)より、第 1 から第 k モードを重ねることで構成したスイング挙動 $[R_k]$ は以下の式で表される。

$$[R_k] = [R_0] + \sum_{j=1}^k \lambda_j \mathbf{v}_j \mathbf{z}_j^T \quad (5.3)$$

5.5 節では、ドローとフェードの軌道差をモード単体の挙動によって分析することを目的として、平均姿勢 $[R_0]$ をドローの平均姿勢に統一し、モード単体の挙動の差を比較する。

まず、第 1 モードのドローとフェードのスイング挙動を比較する。第 1 モードの挙動を算出するために、式(5.3)に $k = 1$ を代入した。5.3.3 節と同様に各タイミングにおいて、ドローとフェードのスイング挙動を算出し、それぞれ比較した結果を図 5.4 に示す。図 5.4 より、各タイミングのスイング挙動は、ドローとフェードともに、第 4 章の表 4.4 に示した、アドレスからインパクトにかけて、腕の振り上げ、振り下げ動作、腰・脚の一定の回転動作を示していることがわかる。

次に、ドローとフェードのスイング挙動を比較する。図 5.4 より、トップ時の挙動を比較すると、ドローとフェードには肘の挙動に違いがあることがわかる。

さらに，フォロー3 時の挙動を比較すると，ドローとフェードには手首の挙動に違いがあることがわかる．以上の結果より，第 1 モードは，表 5.2 に示した，トップ時の腕の挙動の違いと，フォロー3 時における腕の挙動の違いを示すと考えられる．

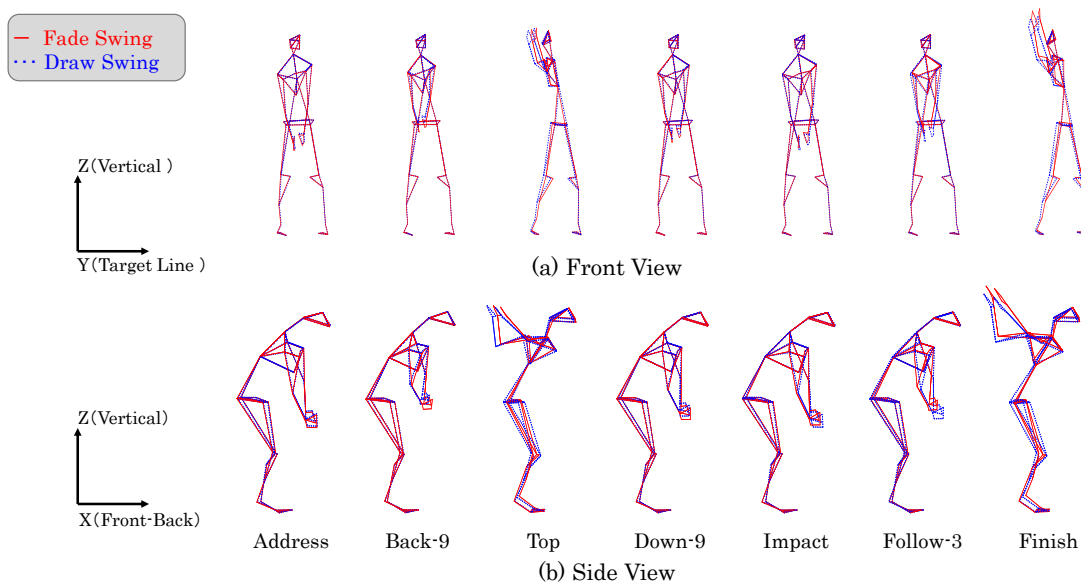


図 5.4 ドローとフェードの第 1 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

5.5.3 第 2 モードのスイング挙動

第 1～第 2 モードを足し合わせた時のドローとフェードのスイング挙動を比較する．前項同様，第 1～第 2 モードの挙動を算出するために，式(5.3)に $k=2$ を代入した．5.3.3 節と同様に各タイミングにおいて，ドローとフェードのスイング挙動を算出し，それぞれ比較した結果を図 5.5 に示す．図 5.5 より，各タイミングのスイング挙動は，ドローとフェードともに，第 4 章の表 4.4 に示した，アドレスからインパクトにかけて，腕の挙動，スイング全体における肩の回転運動を示していることがわかる．

次に，ドローとフェードのスイング挙動を比較する．図 5.5 より，バック 9 時の挙動を比較すると，ドローとフェードには肘の挙動に違いがあることがわかる．さらに，インパクトからフォロー3 時の挙動を比較すると，ドローとフェードには腕の挙動に違いがあることがわかる．以上の結果より，第 2 モードは，表 5.2 に示した，バック 9 時の腕の挙動の違いと，インパクトからフォロー3 時にかけてのフォロースイング初期の腕の挙動の違いを示すと考えられる．

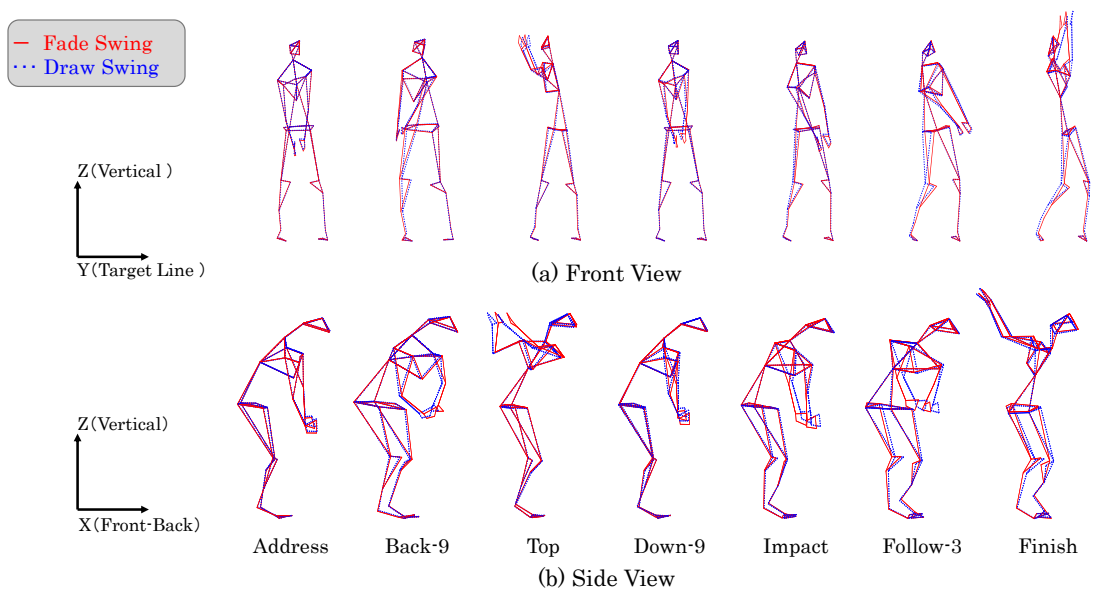


図 5.5 ドローとフェードの第 2 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

5.5.4 第 3 モードのスイング挙動

第 1～第 3 モードを足し合わせた時のドローとフェードのスイング挙動を比較する．前項同様，第 1～第 3 モードの挙動を算出するために，式(5.3)に $k=3$ を代入した．5.3.3 節と同様に各タイミングにおいて，ドローとフェードのスイング挙動を算出し，それぞれ比較した結果を図 5.6 に示す．図 5.6 より，各タイミングのスイング挙動は，ドローとフェードともに，第 4 章の表 4.4 に示した，ダウンスイング～フォロースイングにかかる腰・脚の挙動の押し出し挙動・回転挙動を示していることがわかる．

次に，ドローとフェードのスイング挙動を比較する．図 5.6 より，バック 9 時からフィニッシュの挙動を比較すると，ドローとフェードでは脚の挙動に違いがあることがわかる．以上の結果より，第 3 モードは，表 5.2 に示した，ダウンスイングからフォロースイングにかけての脚の挙動の違いを示すと考えられる．

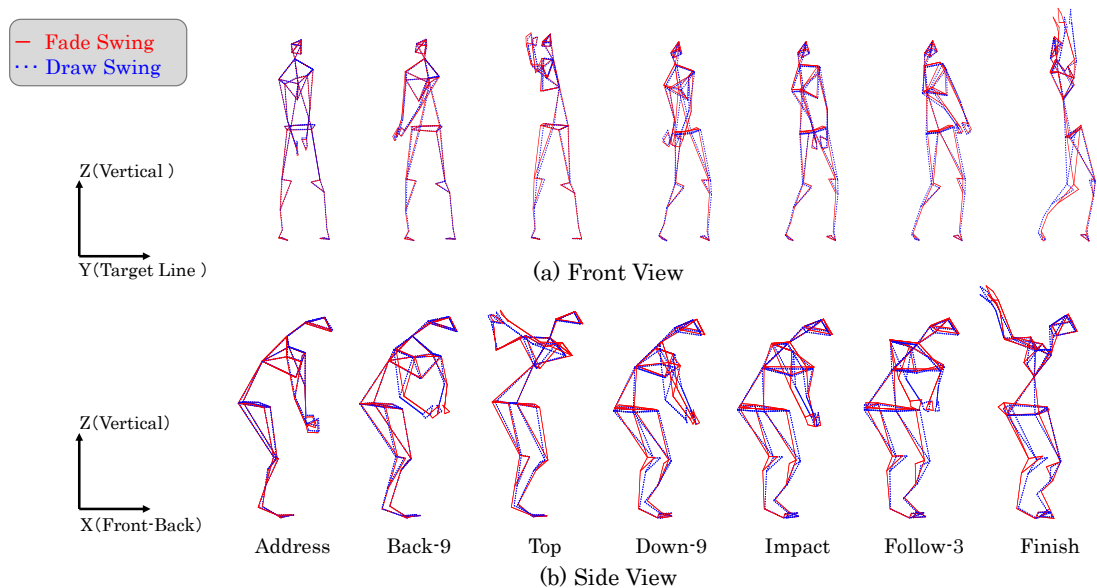


図 5.6 ドローとフェードの第3モードのスイング(a)正面図(b)側面図

5.5.5 第4モードのスイング挙動

第1～第4モードを足し合わせた時のドローとフェードのスイング挙動を比較する．前項同様，第1～第4モードの挙動を算出するために，式(5.3)に $k=4$ を代入した．5.3.3節と同様に各タイミングにおいて，ドローとフェードのスイング挙動を算出し，それぞれ比較した結果を図5.7に示す．図5.7より，各タイミングのスイング挙動は，ドローとフェードともに，第4章の表4.4に示した，インパクト付近における肩・腕の回転挙動を示すことがわかる．また，フィニッシュの姿勢を見ると，図5.6の第3モードまで足し合わせた挙動に比べ，肩・腕の回転挙動が大きくなっている．このことより，第4モードはフィニッシュの肩・腕の回転挙動を示していると考えられる．

次に，ドローとフェードのスイング挙動を比較する．図5.7より，フィニッシュの挙動を比較すると，ドローとフェードでは腰・脚の挙動に違いがあることがわかる．以上の結果より，第4モードは，表5.2に示した，フィニッシュにおける腰・脚の挙動の違いを示すと考えられる．

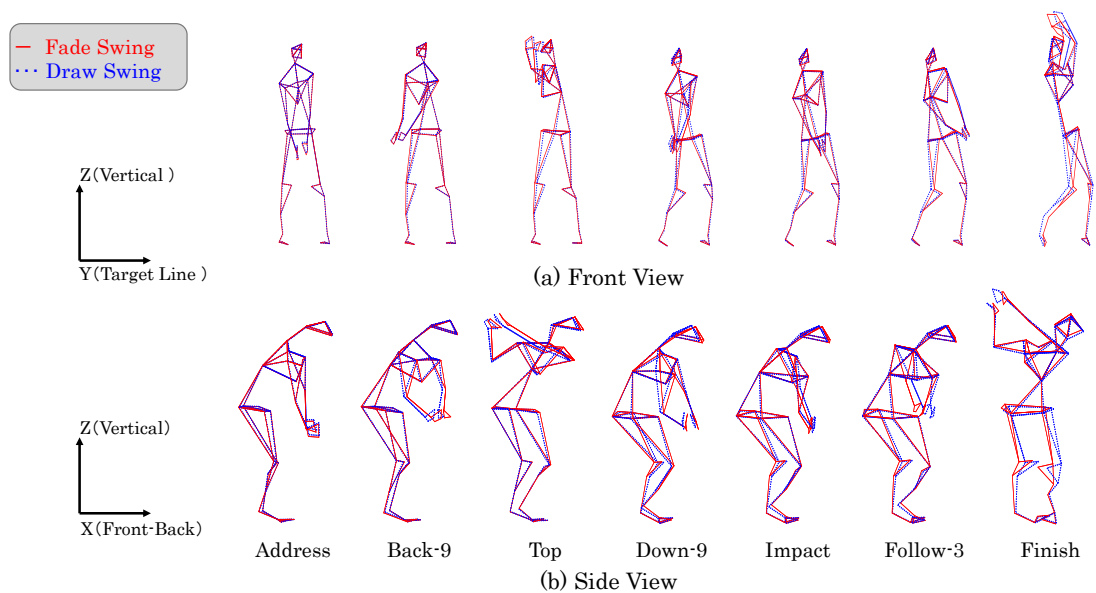


図 5.7 ドローとフェードの第 4 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

5.5.6 第 5 モードのスイング挙動

第 1～第 5 モードを足し合わせた時のドローとフェードのスイング挙動を比較する．前項同様，第 1～第 5 モードの挙動を算出するために，式(5.3)に $k=5$ を代入した．5.3.3 節と同様に各タイミングにおいて，ドローとフェードのスイング挙動を算出し，それぞれ比較した結果を図 5.8 に示す．図 5.8 より，各タイミングのスイング挙動は，ドローとフェードともに，第 4 章の表 4.4 に示した，フォロースイングにおける腕の伸展挙動を示していることがわかる．

次に，ドローとフェードのスイング挙動を比較する．図 5.8 より，フィニッシュの挙動を比較すると，ドローとフェードでは手首の挙動に違いがあることがわかる．以上の結果より，第 5 モードは，表 5.2 に示した，フィニッシュにおける腕の挙動の違いを示すと考えられる．

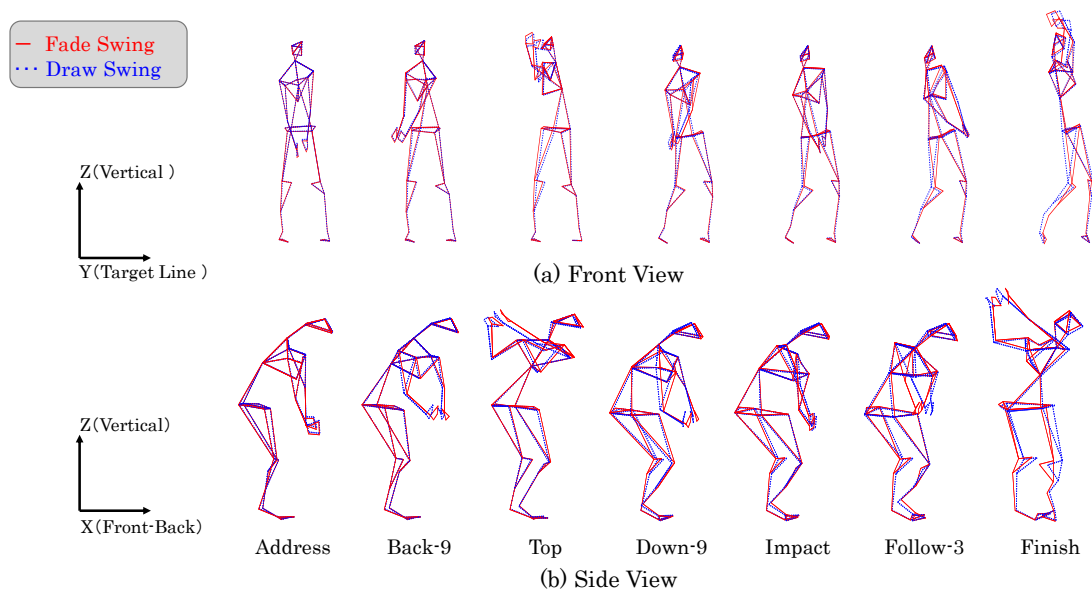


図 5.8 ドローとフェードの第 5 モードのスイング(a)正面図(b)側面図

5.5.7 ドローとフェードの軌道差とスイング挙動の関係

第 1 モードから第 5 モードまでのスイング挙動を分析した結果，第 4 章の 4.5 節と同様におおよそ第 3 モードまでの挙動でスイング動作が構成され，第 1～第 3 モードまでは他部位によって，腕の挙動が励起されており，第 4，第 5 モードの挙動では，腰，肩・腕の回転挙動，腕の伸展挙動によって，スイング動作を調整する役割があることがわかった。

また，ドローとフェードの軌道差を分析すると，第 1 モード～第 5 モードにおいて，各タイミングで軌道差を生み出すスイング挙動の違いがあることがわかった。それら挙動の違いを表 5.3 に示す。

表 5.3 ドローとフェードの軌道差を生み出すスイング挙動の違いの結果

	Difference of action
First mode	<ul style="list-style-type: none"> • Motion of arms around top timing • Motion of arms around follow-3
Second mode	<ul style="list-style-type: none"> • Motion of arms around back-9 • Motion of arms in impact timing to follow-3
Third mode	<ul style="list-style-type: none"> • Motion of legs in down-swing to follow-swing
Forth mode	<ul style="list-style-type: none"> • Motion of waist and legs around finish
Fifth mode	<ul style="list-style-type: none"> • Motion of arms around finish

5.8 結論

本章ではドローとフェードの軌道差を，特異値分解によって抽出したモードによって明らかにした．その結果，以下の結論が得られた．

- (1) 計測したゴルフスイング動作によってドローとフェードの軌道差を分析し，バックスイングでは腕の挙動によって軌道差が生み出され，ダウンスイングからフォロースイングにかけては腕，腰，脚の挙動によって軌道差が生み出されることが明らかとなった．
- (2) アドレスからフィニッシュまでのスイングデータを特異値分解によって分解することで，モードの抽出が可能となった．
- (3) ドローとフェードの軌道差を生み出す要因を，抽出したモードに基づき特定することが可能となった．第 1 モード，第 2 モード，第 5 モードは軌道差を生み出す各タイミングの腕の挙動の違いを示し，第 3 モード，第 4 モードは腰・脚の挙動の違いを示すことを明らかにした．
- (4) ドローとフェードの違いを分解した単一のモードに基づき明らかにすることで，本論文で提案したスイングの分析手法の有効性を示した．

第 6 章 結論

本論文では，シミュレーションに基づいて個々に合ったクラブを設計することを目的として，計測に基づき，シャフトの弾性変形挙動を再現可能なモデルの構築した．そして，ヒトの運動特性をモデルに考慮するために，特異値分解手法を用いたスイング中の協調動作抽出手法を確立した．その結果を各章ごとにまとめて記す．

第 2 章では，ヒトの運動特性を考慮したシャフト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．クラブを有限要素法の梁要素を用いてモデル化し，ゴルファーの把持条件をバネ要素で再現することで，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ことを目的として，スイング計測実験を実施し，計測データによって算出した撓み挙動と，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モデル有効性を検証した．その結果，本手法によって，計測データに基づき，ヒトの運動特性を考慮して，スイング中のシャフトの弾性変形挙動を再現可能であることを示した．

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の有効性を検証することを目的として，新たにスイング計実験を実施し，スイング中の撓み挙動を求めた．さらに，スイング中のシャフトの弾性変形と慣性力との外積によって生じるトルクの効果を検討した．そして，算出した撓み挙動の結果に基づき，クラブヘッドの姿勢を求め，計測データによって算出した結果と比較し，このモデルの有効性を検証した．その結果，弾性変形と慣性力との外積によって生じるトルクを考慮することで，高精度にスイング中のシャフトの弾性変形挙動の再現が可能となった．さらに，インパクト時のヘッドスピード，軌道角，ブロー角，フェース角を算出した結果，撓みトルクを考慮していない場合に比べ，より高精度に各評価指標を予測できることを示した．

第 4 章では，スイング中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によって，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着目し，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を 3 次元動作解析装置によって計測した．計測した 3 次元位置座標データに基づき特異値分解を行い，ゴルフ上級者のスイングから複数

の単一のモードを抽出した．そして，分解したモードとクラブ重量との関係性を分析した．その結果，計測したゴルフスイング動作に，アドレスデータの拡張，反転データの拡張を行うことで，スイング動作から安定的にモードを抽出することが可能となった．さらに，ゴルフスイングデータに，特異値分解を行うことによって，ゴルフスイングを複数の単一のモードに分解し，各挙動の役割を解明することができた．そして，クラブ重量の変化に対して，各被験者で共通して変化している部位を特定した．特に第 2 モードの挙動（肩の回転挙動）がスイング全体で変化し，また，第 3 モードの挙動（腰・脚の押し出し，回転挙動）がインパクト～フォロースイングで変化することを明らかにした．

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た．上級者に，意図的に軌道の異なるスイングを打ち分けさせその動作を 3 次元動作解析装置によって計測した．そして，計測したスイング挙動を第 4 章で構築した特異値分解手法を用いて解析し，モードに基づき軌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．また，ドローとフェードの軌道差を，抽出したモードに基づき特定し，第 1 モード，第 2 モード，第 5 モードは軌道差を生み出す腕の挙動の違いを示し，第 3 モード，第 4 モードは腰・脚の挙動の違いを示すことを明らかにした．ドローとフェードの違いを分解した単一のモードによって明らかにすることで，本論文で提案したスイングの分析手法の有効性を示した．

以上の研究成果より，ヒトの運動特性を考慮して，スイング中のクラブの弾性変形挙動を考慮した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することで，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．一方，ヒトのスイングを分析することが可能となったが，クラブに伝わる入力とスイングとの関係は明らかとなっていない．今後は，その関係を明らかにすることで，スイングを含めたシミュレーションが可能となるよう邁進していきたい．

参考文献

- (1) D.Williams, “The Dynamics of the Golf Swing (with Conclusions of Practical Interest)”, *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, VoL.20, No.2 (1967), pp. 247-264.
- (2) T. Jorgensen, “On the Dynamics of the Swing of a Golf Club”, *American Journal of Physics*, VoL.38, No.5 (1970), pp. 644-651.
- (3) M.R. Farrally, A.J. Cochran, D.J. Crews, M.J. Hurdzan, R.J. Price, J.T. Snow and P.R. Thomas, “Golf Science Research at the Beginning of the Twenty-First Century”, *Journal of Sports Sciences*, VoL.21 (2003), pp. 753-765.
- (4) S. M. Nesbit, “A Three Dimensional Kinematic and Kinetic Study of the Golf Swing”, *Journal of Sports Science and Medicine*, VoL.4 (2005), pp. 499-519.
- (5) S. M. Nesbit and M. Serrano, “Work and Power Analysis of the Golf Swing”, *Journal of Sports Science and Medicine*, VoL.4 (2005), pp. 520-533.
- (6) 中尾勇, 堤実, 西島吉典, 島田三郎, 徳山廣, “青木功プロのゴルフスイングの筋電図からみた動作特徴—いわゆる「ベタ足打法」について(その1)—”, 阪南論集 人文・自然科学編, VoL.20, No.4 (1975), pp. 21-26.
- (7) A. McHardy and H. Pollard, “Muscle Activity during the Golf Swing”, *Br J Sports Med*, VoL.39 (2005), pp. 799-804.
- (8) 川上泰雄, 井出敦夫, 野澤むつこ, 永吉俊彦, 小林海, 小田俊明, 千野謙太郎, 栗原俊之, 加藤えみか, 福永哲夫, “ゴルフスイング中の筋活動およびキネティクス: プロゴルファーの事例研究”, スポーツ科学研究, VoL.3 (2006), pp. 18-29.
- (9) O. C. Hwan, H. S. Young, S. E. Su and B. J. Hee, “Analysis on the Muscle Activity of Antebrachial Area at the Iron Swing of Male High School Golf Players”, *Journal of Foot And Ankle Research*, VoL.7 (2014), pp. 1-2.
- (10) 岩壺卓三, 小西暢樹, 山口哲男, “ゴルフクラブの最適設計に関する研究”, 日本機械学会論文集 (C編), VoL.56, No.529 (1990), pp. 68-74.
- (11) S. J. Mackenzie, “Club Position Relative to the Golfer’s Swing Plane Meaningfully Affects Swing Dynamics”, *Sports Biomechanics*, VoL.11, No.2 (2012), pp. 149-164.
- (12) S. J. MacKenzie and E. J. Sprigings, “Understanding the Role of Shaft Stiffness in the Golf Swing”, *Sports Eng*, VoL.12 (2009), pp. 13-19.
- (13) 太田憲, 仰木裕嗣, 澁谷和宏, “二重振り子モデルによるゴルフスイングの数理解析”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2011 講演論文集, No.11-17 (2011), pp. 447-452.
- (14) 小池関也, “シャフトの変形を考慮したゴルフスウィングの動力学的分析手法の定式化”, Dynamics and Design Conference 2012 USB 論文集, No.12-12 (2012).
- (15) 岡山幸一, 井上喜雄, 芝田京子, 戸次享式, “ゴルフスイングにおけるシャフト弾性の影響”, 日本機械学会講演論文集, No.45-1 (2004), pp. 185-186.

- (16) 下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, “シャフトの性能差によるスイング動作変化を考慮したゴルフクラブの最適設計”, 日本機械学会論文集, VoL.82, No.843 (2016), pp.1-11.
- (17) Y. P. Ivanenko, G. Cappellini, N. Dominici, R. E. Poppele and F. Lacquaniti, “Modular Control of Limb Movements during Human Locomotion”, *The Journal of Neuroscience*, VoL.27, No.41 (2007), pp. 11149-11161.
- (18) 船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄, “運動学シナジーに基づくヒトの歩行制御構造の構成論的理解”, 日本ロボット学会誌, VoL.31, No.8 (2013), pp. 739-746.
- (19) 大橋朋広, 青井伸也, 中隋克己, 日暮泰男, 大島裕子, 藤木聡一郎, 船戸徹郎, 荻原直道, 泉田啓, 土屋和雄, “筋シナジー仮説に基づくニホンザルの神経筋骨格モデルを用いた四足・二足歩行生成と歩容遷移”, 第29回自立分散シンポジウム 2017, (2017), pp. 233-237.
- (20) 芝田京子, 原川哲美, 川口忠雄, “ゴルフスイングのダイナミクスと運動制御 (第1報) —ゴルフスイングを表現する評価モデルの構築—”, 精密工学会誌, VoL.68, No.3 (2002), pp. 397-402.
- (21) 西沢真一, 穂苅真樹, 片岡祐介, 渡辺嘉二郎, “ゴルフスイングにおけるグリップ力とスキル”, スポーツ産業学研究, VoL.8, No.1 (1998), pp. 39-47.
- (22) S. M. Langlais and J. P. Broker, “Grip Pressure Distributions and Associated Variability in Golf: a Two-Club Comparison”, *Sports Biomechanics*, (2014), pp.1-14.
- (23) 岩壺卓三, 松久寛, 井上喜雄, 宇津野秀夫, 河村庄造, 神吉博, 小泉孝之, 塩幡宏規, 辻内伸好, 中川紀壽, “振動工学の基礎”, 森北出版 (2010), pp.130-134.
- (24) 小松敬治, “機械構造振動学 MATLAB による有限要素法と応答解析”, 森北出版 (2009), pp. 38-39.
- (25) 松本賢太, 辻内伸好, 小泉孝之, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “ゴルファーの運動特性を考慮したゴルフクラブの力学解析”, 機械力学・計測制御講演論文集 2015, pp. 1-12.
- (26) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, A. Ito, M. Ueda, K. Okazaki and T. Seita, “Effect of Inertia for Shaft Movement by a Golf Swing”, *The 8th Asian Conference on Multibody Dynamics*, No. 16-40 (2016), pp. 1-10.
- (27) 松本賢太, 辻内伸好, 伊藤彰人, 清田大貴, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “3次元 FEM モデルによるゴルフスイング時のクラブヘッドの姿勢推定”, シンポジウム: スポーツアンドヒューマンダイナミクス 2016 講演論文集, (2016), pp. 1-10.
- (28) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, A. Ito, M. Ueda and K. Okazaki, “Analysis of shaft movement using FEM Model considering Inertia Effect of Club Head”, *Procedia Engineering*, VoL.112 (2015), pp. 10-15.
- (29) 木村俊一, 古澄英男, 鈴川晶夫, “確立と統計—基礎と応用—”, 朝倉書店 (2007), pp. 89-90.

- (30) P. D. Welch, “The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging over Short, Modified Periodograms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Vol.15, No.2 (1967), pp.70-73.
- (31) 金井浩, “音・振動のスペクトル解析”, コロナ社 (1999), pp. 122-144.
- (32) 松本賢太, 辻内伸好, 小泉孝之, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “クラブヘッドの慣性がシャフト挙動に及ぼす影響”, シンポジウム : スポーツアンドヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集, No.12-21 (2015), pp. 1-10.
- (33) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, A. Ito, M. Ueda and K. Okazaki, “Influence of a Golf Club’s Inertia on Shaft Movement During the Golfer’s Swing”, *Procedia Engineering*, Vol.147 (2016), pp. 360-365.
- (34) 松本賢太, 辻内伸好, 伊藤彰人, 大島裕子, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “クラブ設計を目的とした特異値分解によるゴルフスイングの動作分析”, 設計工学 2017, (掲載決定) .
- (35) 井上透, “ゴルフの科学”, 洋泉社, (2017), pp. 38-39.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，終始懇切なる御指導，御鞭撻ならびに暖かい激励を賜りました本学理工学部 辻内伸好教授に深甚なる感謝の意を表します．本研究を遂行するにあたり，多大なる御指導を賜りました本学理工学部 小泉孝之名誉教授に深甚なる感謝の意を表します．本論文をまとめるにあたり，御指導，御助言を賜りました本学理工学部 青山栄一教授に心より御礼を申し上げます．本研究を遂行するにあたり御指導，御助言を賜りました本学理工学部 伊藤彰人准教授，本学理工学部講師 大島裕子博士に厚く御礼を申し上げます．

学生生活を送るにあたり，研究室の先輩として貴重な御助言を頂きました豊橋科学技術大学機械工学系助教 松原真己博士，福井大学学術研究院工学系部門機械工学講座講師 吉田達哉博士に厚く御礼申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，ともに解析をおこなってきた本学大学院博士課程前期課程修了生 清田大貴氏，ならびに本学大学院生 古川和樹氏に厚く御礼申し上げます．

本研究を遂行するにあたり必要なデータや解析プログラムを提供していただき，且つ，本研究の遂行に関する多大なるご助言とご協力を賜りました住友ゴム工業株式会社の植田勝彦氏，岡崎弘祐氏に深く感謝します．

また，本学理工学部機械系機械力学研究室に在籍する修士および学部生諸氏，ならびに歴代の先輩諸氏には，その多大なるご支援に対し深く感謝申し上げます．最後に，本学での研究活動を進めていくにあたって，何不自由ない環境を与えて頂きました両親と，終始暖かく励まして頂きました友人たちに心より御礼申し上げます．

2017 年 11 月 20 日

松本 賢太