

卓球台の振動特性によるボール落下地点推定法の検討

上島 慶¹⁾ 牛山 幸彦²⁾ 八坂 剛史²⁾ 大庭 昌昭²⁾

I. 緒言

近年、全日本卓球選手権大会において小学生の最年少出場記録や最多勝利記録が話題となっており、ジュニアの活躍が注目を集めている。これは、卓球競技が選手の年齢や体格などの体力水準によって勝敗が左右されにくい特性によるものであると考えられる。したがって、卓球競技の勝敗には、対戦相手に対していかに戦術をたてて試合を進めるかが大きく関係しており、打球コースやスピード、回転などの情報をもとに対戦相手の戦術分析を行うことは、試合の行動指針を決定するために重要であるといえる。しかし、卓球競技は、他の球技に比べるとラリーがたいへんスピーディーであるといった特性もあることから、戦術分析については選手や対戦相手の試合を収録した映像による分析が主流であり、競技現場で即時的に試合内容を定量化して、記録・集計をしながら試合が進められることはほとんど行われていない。そのため、多くの指導者がそれまでの経験と主観的な分析で選手にアドバイスを与えていると考えられる。

そこで、卓球競技の特性と情報機器を活用した戦術分析法を確立することができれば、選手の指導やトレーニングに役立つものと考え、筆者らは、卓球競技における球質の三大要素の一つともいわれるプレースメント（送球点）に着目し、「ボール落下地点による戦術分析の有用性の検討」と「ボール落下地点を推定するための方法論の検討」についてこれまで研究を重ねてきた^{1) 2) 3) 4) 5)}。後者では、加速度計を用いてボールが卓球台に落

下した際の振動からボール落下地点の推定を行った。その結果、振動の大きさと時間差からの推定は困難であったが、各地点で振動の伝わり方に法則性があることから、多変量解析の判別分析を用いることによって設定された49地点のうち7地点はボール落下地点を推定できる可能性が示唆された。しかし、その他の地点については、各加速度計から得られる最大加速度の関連性（振動特性）が地点ごとに明確化しなかったなどの問題で推定できる確率が80%未満であった。

本研究の目的は、多変量解析の判別分析を用いて、振動特性を領域ごとに分けて解析することでボール落下地点の推定を行うことである。さらに、ボール落下地点を推定するための判別基準を構成し、ボールの落下する高さに変化した場合においても推定可能であるか検討を行った。

II. 研究方法

1. 計測システムの概要

本システムは、先行研究と同様の方法で計測を行った⁴⁾。加速度計は、感度400mV / Gの圧電型加速度計 (ADXL-150) を合計8個用いた。これらは、卓球台の裏面に設置され、ボールが落下した際に得られる垂直方向の振動が検出される仕組みになっている (図1)。加速度計から得られた信号は、計測・制御ソフト LabVIEW2010 ver.10.0.1 (日本ナショナルインスツルメンツ社製) であらかじめ作成したプログラムによって、サンプリング周波数10kHzでA/D変換された後にノートパソコンへ保存され、解析される仕組みになっている。本研究で使用した加速度計は、加速度0 [G] のときに、250 [mV] の電圧変化で出力されるため、求める加速度を x [G]、加速

1) 新潟大学大学院現代社会文化研究科

2) 新潟大学人文社会・教育科学系

受理日：平成25年1月31日

度計から得られる電圧変化を A [mV] とし、以下の計算式を用いて加速度を算出した。算出された加速度は、絶対値化された後に最大値のみが記録されるようになっている。

$$x [G] = |A [mV] - 250 [mV]| / 0.4 [mV/G]$$

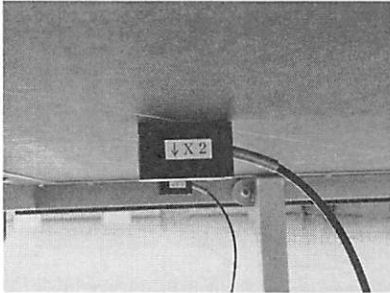


図1 加速度計設置の様子

2. 実験条件

2-1. 加速度計設置位置とボール落下地点

図2は、卓球台を真上から見た図である。本研究は、卓球台上の片面を10分割し、ボール落下地点を44箇所を設定した。領域設定は、楊らの先行研究で記録された実際の試合で配球の多かった領域を参考にし、加速度計は領域の中央に設置した²⁾。領域は、卓球台のサイドラインからサイドラインまでを50cm 間隔で3分割し、左から Left、

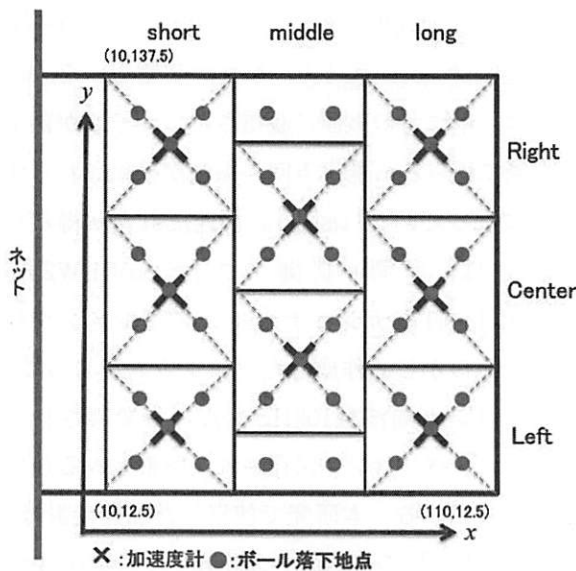


図2 加速度計設置位置とボール落下地点

Center、Right とした。次に、ネットから17cm の場所からエンドラインに向かって40cm 間隔でそれぞれ3分割し、ネット手前から short、middle、long とした。それぞれの領域を Left-short (L-s : 1ch)、Center-short (C-s : 2ch)、Right-short (R-s : 3ch)、Left-side (LS)、Left-middle (L-m : 4ch)、Right-middle (R-m : 5ch)、Right-side (RS)、Left-long (L-l : 6ch)、Center-long (C-l : 7ch)、Right-long (R-l : 8ch) と定義した。ただし、LS と RS の領域については、加速度計の数に限りがあるため、領域面積を半分にし、加速度計はなしとした。ボール落下地点は、各領域で加速度を明確にするため、加速度計の真上と領域内で等分した場所に設定をした。

2-2. ボール落下回数と高さ

本実験は、あらかじめ設定したボール落下地点44箇所へそれぞれ10回ずつ自然落下をさせた。ボールを落下させる高さは、20cm と30cm の2種類とした。およそ16cm の高さからボールが落下することは、ネットの高さが15.25cm であるため、物理的にあり得るが、実際のラリー中ではそのようなボールは少ない。選手が打球したボールの打球線の頂点は、選手の打球特性と打球曲線を調査した先行研究によると、ネット上から0.06m 以上であることが多い^{6) 7) 8)}。しかしながら、第一球目のサービスや、台上のショートボールは、ボールが落下する高さとネットの高さの差が小さくなる。そのため、本研究におけるボールを落下させる高さは、ネットからおよそボール1個分の高さを見積もった20cm を最も低い高さとして設定した。

3. 分析方法

3-1. マハラノビス距離による判別分析

図3は、統計ソフトウェア JMP 8 を用いて、20cm の高さからボールを落下させた際の各加速

度計から得られた8変数に関する学習データ（落下領域が判明しているデータ）を多次元的に平面図へプロットしたものである。図中の黒丸は、各群の重心を示している。この図から領域設定した10群の重心はおおよそ分離していることが視覚的に分かる。つまり、領域ごとに振動特性が分類されているといえる。そこで、本研究は多変量解析のマハラノビス距離による判別分析（付録参照）を用いて解析を行った⁹⁾。これにより、領域ごとの振動特性を分類できる判別式（線形判別関数）を学習データに基づいて構成することができれば、ボール落下地点は、判別式に新規データ（落下領域が不明なデータ）を代入することによって推定できると考えたためである。

図4は本研究の分析デザインを示している。まず、20cmの高さから落下させた学習データ（n=437）に基づいて、領域ごとに標本平均ベクトルと標本分散共分散行列を算出し、10個の判別式を構成する。この判別式へ判別式の構成に用いた学習データおよび30cmの高さから落下させた新

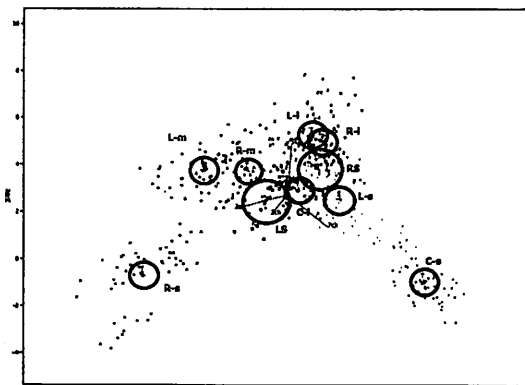


図3 平面図へプロットされた8次元学習データ

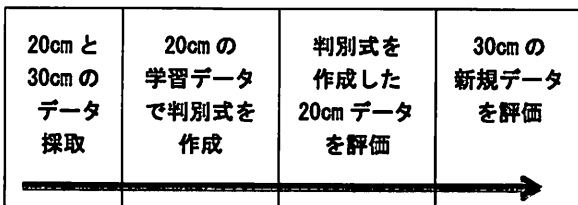


図4 本研究の分析デザイン

規データ（n=436）を代入することでマハラノビス距離を算出し、実際に落下させた領域へどの程度判別されるか評価を行った。なお、判別式の構成とマハラノビス距離の算出には、統計解析ソフト SPSS15.0J と数値計算ソフト Mathematica4.2 を用いた。

3-2. 評価方法

本研究は、以下の計算式で算出された誤判別率によって評価を行った。本稿の誤判別率とは、新たに観測された新規データが実際に落下した領域とは別の領域に誤判別をした割合を表したものである。誤判別率は、確率が低いほどボール落下地点を推定できる可能性が高いと評価することができる。なお、誤判別率については、小数第2位を四捨五入して算出した。

$$\text{誤判別率} = \frac{\text{誤判別された個体数}}{\text{全体個数}}$$

III. 結果

1. 20cm データの評価

表1は、領域ごとに20cmの高さから落下させたデータについて、判別された領域と各領域の誤判別率を表したものである。この表をみると、LSとC-Iの領域については、誤判別率はそれぞれ5.0%と2.0%であり、いずれもわずかにLong領域へ誤判別があることが分かる。しかし、その他の8領域については誤判別が0.0%であり、8領域へ落下したデータは、実際にボールが落下した領域へ全て判別できることが明らかになった。

2. 30cm データの評価

次に、高さ30cmからボールを落下させたデータについて同様の判別式を用いて評価した結果を表2に示す。short領域のL-s、C-s、R-sとlong領域の両サイドに位置するL-lとR-lについては、

表1 高さ20cm 落下データの判別領域と誤判別率

		マハラノビス距離による判別された領域									データ数(個)	誤判別率(%)	
		L-s	C-s	R-s	LS	L-m	R-m	RS	L-l	C-l			R-l
ボール落下領域	L-s	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0.0
	C-s	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0.0
	R-s	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0.0
	LS	0	0	0	19	0	0	0	0	1	0	20	5.0
	L-m	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	50	0.0
	R-m	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	50	0.0
	RS	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	20	0.0
	L-l	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50	0.0
	C-l	0	0	0	0	0	0	0	1	49	0	50	2.0
	R-l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	0.0

表2 高さ30cm 落下データの誤判別領域と誤判別率

		マハラノビス距離による判別された領域									データ数(個)	誤判別率(%)	
		L-s	C-s	R-s	LS	L-m	R-m	RS	L-l	C-l			R-l
ボール落下領域	L-s	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0.0
	C-s	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0.0
	R-s	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	50	0.0
	LS	0	0	0	2	5	2	0	4	6	0	19	89.5
	L-m	0	0	0	0	49	1	0	0	0	0	50	2.0
	R-m	0	0	0	0	5	45	0	0	0	0	50	10.0
	RS	0	0	0	0	0	0	14	0	1	5	20	30.0
	L-l	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	50	0.0
	C-l	1	0	0	0	0	4	0	1	44	0	50	12.0
	R-l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	50	0.0

誤判別率は0.0%であり、実際に落下した領域へ十分な判別が行えることが明らかになった。卓球台の中央付近に位置するL-mとR-m、C-lについては、誤判別は2.0%~12.0%であり、かなり高い確率で判別できるものの、わずかに誤判別があった。加速度計の設置されていない middle 領域の両サイドは、誤判別率が89.5%と30.0%であった。そのなかでも特にLSについては、判別が困難であった。

以上の結果から、実際にボールが落下した地点と誤判別された領域の振動特性を比較することで、誤判別された要因について考察をした。

IV. 考察

1. LSの誤判別について

最も誤判別が多かったLSは、表2からC-l (31.6%)、L-m (26.3%)、L-l (21.1%)、R-m (10.5%)の計4領域へ誤判別をしたことが分かる。また、

表3 LS領域における落下地点ごとの判別領域

		判別された領域				
		LS	L-m	R-m	L-l	C-l
	(50,12.5)	1	0	2	0	6
	(70,12.5)	1	5	0	4	0

表3はLSにおけるボール落下地点ごとの判別領域を示している。これをみると、(50, 12.5) 地点に落下したものは、C-lとR-mへ誤判別されており、(70, 12.5) 地点に落下したものは、L-mとL-lへ誤判別をしていることが分かる。

まず、(50, 12.5) の振動特性と誤判別されたC-lとR-mの振動特性を比較してみる。図5は、LSの各地点へ30cmの高さからボールを落下させた際に得られた振動特性を示したものである。この図から(50, 12.5) 地点は、3chと8chがやや反応しているものの、各加速度に大きな振動特性はみられない。図6と図7は、C-lとR-mの振動特性を表している。C-lとR-mの振動特性をみると、それぞれの領域中央に設置されている7chまたは5chの加速度計は、大きな値を示していない。また、他の加速度計については、8chと3chまたは4chがやや反応しているが大きな差はない。このことから、LS領域における誤判別については、C-lとR-mの領域内に加速度計が設置されているにも関わらず、振動特性が明確にならなかったために、加速度計が設置されていない

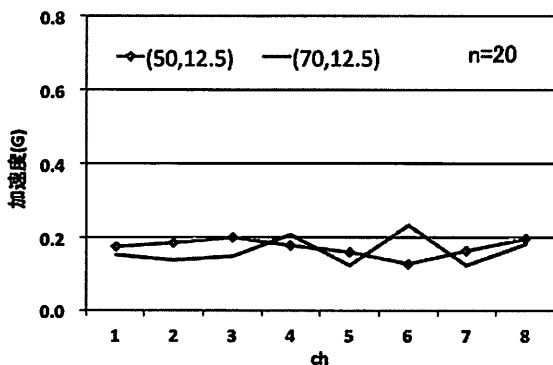


図5 LSにおける落下地点ごとの振動特性 (30cm落下データ)

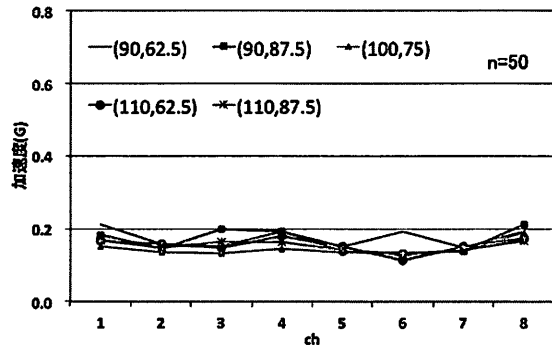


図6 C-lにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

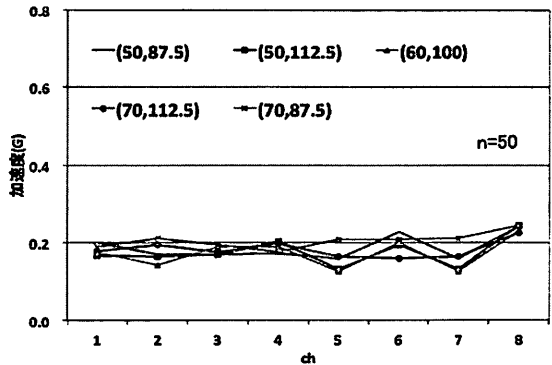


図7 R-mにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

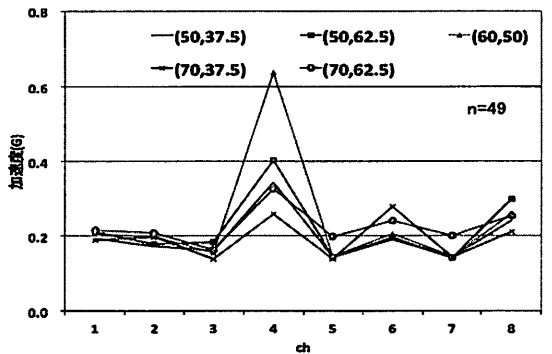


図8 L-mにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

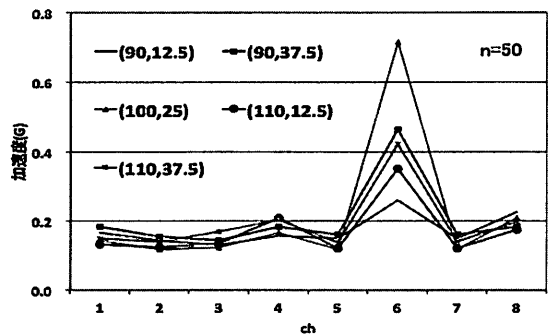


図9 L-lにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

LSと振動特性が類似したことが原因で誤判別を起こしたものと考えられる。

次にLSにおける(70, 125)地点と誤判別したL-mとL-lの振動特性を比較した。図5より(70, 125)地点の振動特性は、6chがやや大きな値を示し、4chと8chが近い値を示していることが分かる。次に、図8と図9に示されたL-mとL-lの振動特性をみると、L-mは、多くの地点で領域中央に設置されている4chの加速度計が大きな値を示し、続いて6chと8chが近い値を示している。L-lは、領域中央の6chが最も大きな値を示し、次に4chと8chが近い値を示している。以上のことから、LSにおける誤判別は、加速度の大きさは異なるものの、判別に起因していると思われる4ch、6ch、8chが(70, 125)地点とL-m、L-lで共通していることが原因であると考えられる。LSの誤判別率は、89.5%と高い結果であったが、(70, 125)地点の誤判別については、いずれも隣接した領域に誤判別しているものであるため、領域設定の工夫により、誤判別率を下げられるのではないかと考えられる。

2. RSの誤判別について

RSにおける誤判別は、25.0%がR-lであり、全て(70, 137.5)地点へ落下させたものであった。そこで、(70, 137.5)地点の振動特性とR-lの振動特性を比較した。図10は、RSにおける振動特性を示しており、図11は、R-lの振動特性を示したものである。図10より(70, 137.5)地点の振動特性は、8chが大きな値を示し、1chと4chが近い値を示している。一方、R-lは、多くの地点で8chが大きな値を示しめしており、2地点が1chと4chで近い値を示している。これらからRSは、LSの(70, 125)地点と同様に、隣接する加速度の影響により誤判別したものと考えられる。そのため、RSについても領域設定の工夫により、誤判別を改善できるものと考えられる。

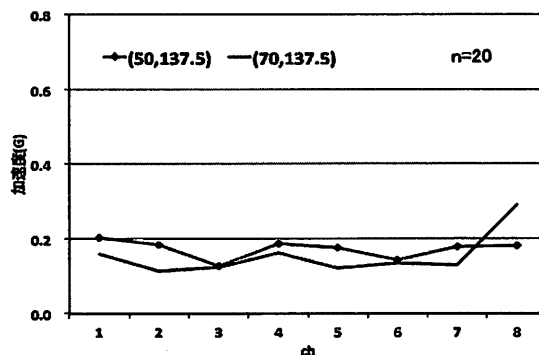


図10 RSにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

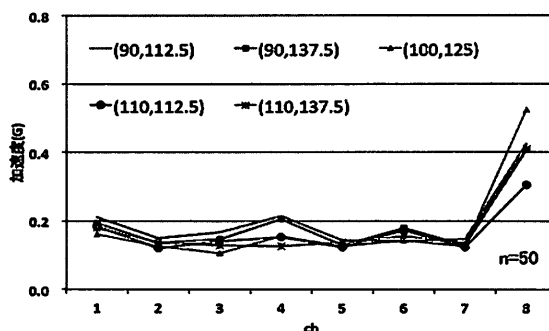


図11 R-lにおける落下地点ごとの振動特性 (30cmデータ)

3. C-lの誤判別について

C-lは、領域中央に設置された加速度計の真上である(100, 75)地点へ落下した際の誤判別率が最も高く、R-mへの誤判別が多かった。これは、図6と図7から分かるように、C-lとR-mどちらも領域中央に設置された加速度計が大きな値を示さなかったことにより、判別に影響する振動特性を得られなかったことが原因であると考えられる。さらに、図12は、C-lの(110, 87.5)地点で20cmの高さからボールを10回落下させた振動特性を示したものである。図12よりC-lの(110, 87.5)地点は、ボールを落下させるごとに振動特性が変化することが分かった。つまり、C-lは、ボールを落下させる地点によって振動しにくい地点や、振動が安定して得られない地点があるということである。これは、卓球台の天板が木製であることと、卓球台の支柱が下にないといった卓球台の構造が

影響しているものと考えられる。したがって、この地点については、振動を安定して得るために卓球台の天板を固定するなどの工夫が必要であると考えられる。

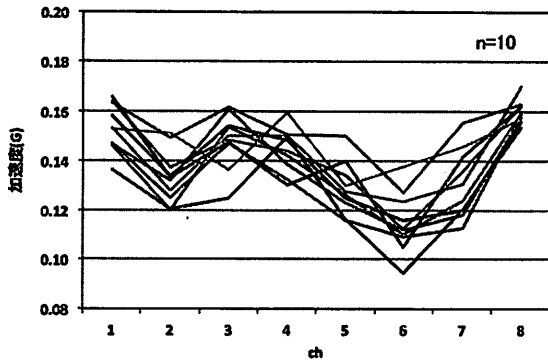


図12 (110, 87.5) 地点における高さ20cm 落下の振動特性

4. R-m の誤判別について

R-m で誤判別された領域は、全て隣接している L-m であり、誤判別があった落下地点は、(50, 112.5) のみであった。そこで、(50, 112.5) 地点の振動特性と L-m の振動特性を比較してみる。図13は、(50, 112.5) 地点において30cm の高さからボールを10回落下させた際の振動特性を示している。図13をみると、4 ch、6 ch、8 ch がやや大きい値を示しており、図8に示す L-m の振動特性と類似している。つまり、相互の振動特性が類似しているために誤判別をおこしたものと考えられる。さらに、図14に示した R-m の (50, 112.5) 地点に20cm の高さから落下させた振動特性と図13を比べると、R-m は高さが変化しても加速度の大きさは変化しないことが分かる。つまり R-m は、他の領域に比べると振動しにくいという特性があることが考えられる。

これまでの考察をふまえると、middle 領域における LS の (70, 12.5) 地点、R-m の (50, 112.5) 地点、long 領域の L-l については、判別に影響する振動特性が類似して得られることが分かった。これは、卓球台の支柱付近である 6 ch と 8 ch の振動が安定して得られるためであると

考えられる。同様に、short 領域の誤判別率が低い要因は、卓球台のネット付近が金具で固定されているため、安定した振動特性が得られるからであると考えられる。これに対して、卓球台片面の中央付近である L-m と C-l については、他の領域とは異なる振動特性があり、安定した振動を得にくいことが分かった。これらの地点については、領域設定と加速度計設置位置の再検討や、安定した振動を得るための工夫が必要である。

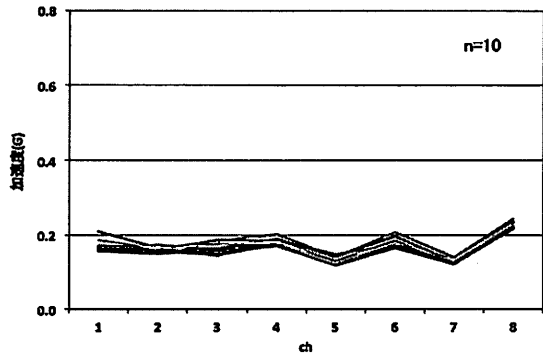


図13 (50, 112.5) 地点における高さ30cm 落下の振動特性

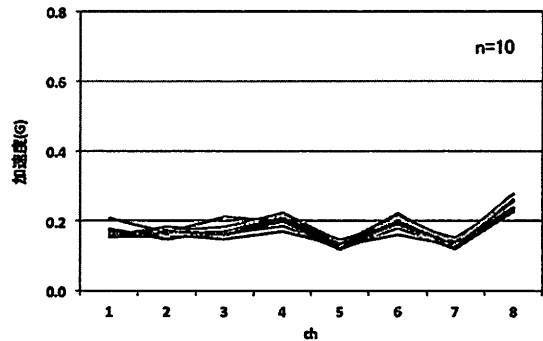


図14 (50, 112.5) 地点における高さ20cm 落下の振動特性

V. まとめ

本研究は、卓球競技における選手が打球した配球情報を即時的に定量化できれば、高度な戦術分析が可能になるものと考え、ボールが卓球台へ落下した際に得られる振動特性からボール落下地点の推定を行った。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

1. 多変量解析の判別分析によって、ボール落下

地点を推定できる可能性が示唆された。

2. short 領域と long 領域の両サイドについては、比較的安定した振動特性が得られるため、それらの地点については高い確率で判別できることが示唆された。
3. ボールが落下する高さに変化しても判別できる可能性が示唆された。
4. 卓球台の中央付近においては、加速度計の近くであっても振動特性が明確になりにくい地点がある。

VI. 今後の課題

本研究は、振動特性が明らかな地点については、かなり高い確率で判別することができた。今後の課題は、本研究で判明した卓球台の特性による振動特性が明らかになりにくい地点において、振動特性を明らかにするための方法論を検討していくことである。また、異なる型式の卓球台に対して、即時的に振動特性を調査し、その結果に応じて加速度計設置位置を決定できるような方法論についても検討を行っていききたい。

引用参考文献

- 1) 楊飛ほか：大学卓球選手の三球目までの攻撃パターンについて、新潟県体育学研究第28巻、pp.51-56、(2010)
- 2) 楊飛：卓球競技における配球パターンの分析法、新潟大学大学院現代社会文化研究科修士論文、(2009)
- 3) 関有李ほか：配球パターンとボールの飛行時間の関連からみた卓球ゲーム分析法、新潟県体育学研究第29巻、pp.91-99、(2011)
- 4) 関有李ほか：加速度計を用いた卓球ボールの落下地点推定法の検討、新潟県体育学研究第30巻、pp.55-62、(2012)
- 5) 関有李：卓球競技における配球特性分析と戦術の検討、新潟大学大学院現代社会文化研究科修士論文、(2011)
- 6) 上島慶ほか：卓球競技における選手の技能評価に関する研究、新潟県体育学研究第28巻、pp.39-44、(2010)
- 7) 上島慶ほか：卓球競技のカット主戦型におけるボールの飛行特性に関する研究、新潟県体育学研究第29巻、pp.83-90、(2011)
- 8) 岡部荘一ほか：卓球競技における打球線の頂点につ

いて、日本体育学会大会号47号、p538、(1996)

- 9) 小西貞則：「多変量解析入門－線形から非線形へ－」、pp.127-167、岩波書店、(2010)

付録

判別分析 (discriminant analysis) とは、複数の群がある場合、将来観測されるデータ (新規データ) がどの群へ属するのかを判別することを目的として、既にどの群へ属するのか判明しているデータ (学習データ) に基づいて判別方式を構成する手法である。判別分析には、線形判別分析とマハラノビス距離による判別分析がある。マハラノビス距離 (Mahalanobis distance) とは、新規データと各群の重心 (標本平均ベクトル) との距離を定義したものである。本研究は、加速度計から得られる 8 変数に関する 8 次元学習データから次のように標本平均ベクトルと標本分散共分散行列を算出し、マハラノビス距離を計算した。具体的には以下に示す方法により各群の重心を求め、判別を行うサンプルと重心との距離を求め、距離が最小となる群にサンプルが属すると判定される。

判別の対象として g 個の群 G_j があるととし、各群から観測された p 次元 n_j 個の学習データを以下のように定義する。

$$G_j: x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_{n_j}^{(j)}, \quad j=1, 2, \dots, g.$$

各群の学習データに基づく標本平均ベクトルと標本分散共分散行列を次式で求める。

$$G_j: \bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i^{(j)}$$

$$S_j = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (x_i^{(j)} - \bar{x}_j)(x_i^{(j)} - \bar{x}_j)^T$$

観測データ x と各群の標本平均ベクトル間のマハラノビス距離を、それぞれの群の標本分散共分散行列 S_j で測った

$$D_j^2 = (x - \bar{x}_j)^T S_j^{-1} (x - \bar{x}_j) \quad j=1, 2, \dots$$

が最小となる群へ判別する。