

Title	加速度センサによるサンバリズム運動の分析
Author(s)	松村, 耕平
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3533
Rights	
Description	Supervisor: 藤波 努, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

加速度センサによるサンバリズム運動の分析

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識社会システム学専攻

松村 耕平

2007 年 3 月

修 士 論 文

加速度センサによるサンバリズム運動の分析

指導教官 藤波努 助教授

審査委員主査 藤波努 助教授
審査委員 國藤進 教授
審査委員 西本一志 助教授
審査委員 金井秀明 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科知識社会システム学専攻

550066 松村 耕平

提出年月: 2007 年 2 月

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の動機と目的	1
1.2	アプローチ	2
1.3	関連研究	3
1.3.1	モーションキャプチャ装置を用いたサンバダンスの習得過程の研究	3
1.3.2	歩行発達の研究	4
1.3.3	チェロの運弓スキルの研究	4
1.3.4	加速度センサを用いたゴルフスイング技能評価システムの開発	5
1.4	本論文の構成	6
第2章	理論と背景	7
2.1	リズム運動	7
2.2	体幹部の重要性	9
2.3	サンバ	10
2.4	時系列解析に用いた手法	14
2.4.1	データの補正処理	14
2.4.2	自己相関関数	17
第3章	リズム運動観察実験	22
3.1	概要	22
3.2	実験設定	22
3.2.1	目的	22
3.2.2	被験者	22
3.2.3	方法	22
3.3	実験内容	23
3.3.1	練習	23
3.3.2	ダンス運動	24
3.3.3	シェイカー演奏	24
3.4	システムの構成	25
第4章	結果	33
4.1	リファレンスデータ	35

4.2	データの分類	37
4.3	テンポ安定性の向上	38
4.3.1	異なるテンポに対するテンポ安定性	46
4.4	アクセント表現の出現	49
4.5	ダンスとシェイカー演奏の関係	56
4.5.1	テンポ安定性の獲得及び、アクセント表現の推移	63
4.5.2	ダンスの習熟とシェイカー演奏の習熟の関係性	67
第5章	結言	70
5.1	まとめ	70
5.2	考察	71
5.2.1	体幹部の重要性	71
5.2.2	他の運動への応用	71
5.2.3	センサーの選択	72
5.3	今後の展開	72

目 次

2.1	フィードバック制御とフィードフォワード制御	8
2.2	人間の運動における運動連鎖	11
2.3	サンバのアクセント	13
2.4	3次スプラインによるデータ補完	15
2.5	高周波ノイズを含んだ加速度データ	16
2.6	バターワースフィルタとチェビシェフフィルタの周波数特性	17
2.7	バターワースフィルタの適用	18
2.8	ランダムデータとその自己相関関数	20
2.9	正弦波とその自己相関関数	21
3.1	練習の様子	24
3.2	計測システムの構成	26
3.3	ワイヤレス加速度センサ装着位置	27
3.4	ワイヤレス 3 軸加速度センサ (H48C)	28
3.5	Bluetooth ワイヤレス 3 軸加速度センサ	29
3.6	Canon IXY DV M5	29
3.7	Panasonic TOUGH BOOK CF-18	30
3.8	TVC-D4	31
3.9	LVS-400	31
3.10	合成された加速度波形と実験映像	32
3.11	DIGA DMR-E87H	32
4.1	腰部上下方向の加速度時系列データ (シェイカー演奏無し)	33
4.2	シェイカー演奏を伴ったダンスの加速度時系列データ	34
4.3	インストラクターの体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数	35
4.4	インストラクターの体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数	36
4.5	A 段階の例	38
4.6	B 段階の例	38
4.7	C 段階の例	39
4.8	被験者 A の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)	40
4.9	被験者 A の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/25)	41
4.10	被験者 B の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)	42

4.11	被験者 B の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/11)	43
4.12	被験者 C の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)	44
4.13	被験者 C の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/25)	45
4.14	100BPM の曲におけるテンポ安定性	47
4.15	120BPM の曲におけるテンポ安定性	48
4.16	被験者 D の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/27)	50
4.17	被験者 D の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (9/7)	51
4.18	被験者 E の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)	52
4.19	被験者 E の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (7/27)	53
4.20	被験者 F の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (6/22)	54
4.21	被験者 F の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (9/13)	55
4.22	被験者 G の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)	57
4.23	被験者 G の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (6/8)	58
4.24	被験者 H の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)	59
4.25	被験者 H の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (6/15)	60
4.26	被験者 I の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)	61
4.27	被験者 I の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (10/25)	62
4.28	被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関 数 (3/30)	64
4.29	被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関 数 (5/11)	65
4.30	被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関 数 (6/15)	66
4.31	インストラクターの体幹部上下運動及び手首部前後運動の加速度とその自 己相関関数	69

表 目 次

3.1	サンバ実験に用いた曲一覧	23
4.1	実験によって得られた加速度時系列データの分類	33
4.2	自己相関による体幹部および手首部の運動評価	68
4.3	体幹部及び手首部の運動評価における組み合わせ分類	69
4.4	体幹部の段階について Kruskal-Wallis 検定を行った結果	69

第1章 はじめに

1.1 研究の動機と目的

楽器の演奏やスポーツ、職人の技といった身体技能は、一般に習得までに長い時間を要する。これらの技能の獲得方法として、技能に関する基本的知識を学習することや、その技能において優れた人の実演や動作を記録したビデオを観察し、模倣をすることなどがある。しかし、模倣によってなされる動作は、筋肉の使い方など経験者による身体の実際の動きとは異なる場合があり、模倣そのものだけでは技能の獲得を行うことはできない。結局のところ、技能の獲得のためには自分で動作を試行錯誤・反芻していく過程を経る必要があり、これが獲得を難しくしている理由となっていると思われる。このような身体技能の獲得を助けるためには、技能の獲得プロセスについて検証し、言葉で説明が難しい身体の動きや感覚といったものを解析し、言語化する必要があると考える。

陶芸の菊練り動作を解析し、身体各部位における活動における時間的な情報とスキルの関係について考察した阿部らの研究 [AYF03, 阿部 03] や、サンバリズムを身に付けることによって運動能力が向上することを示し、サンバリズムの習得がその他の身体技能に応用できる可能性について示した井口ら [IYF06] の研究などによって、身体技能においてその動作の相互の連動やリズム的な動作というものが重要であるということが示唆されている。多賀 [TYS91, 多賀 02] は、人間の歩行においてその制御が、その周期的な運動パターンを作る神経系である CPG (Central Pattern Generator) からの信号と身体骨格系および環境とが相互作用を伴い、リズム的な歩行を生み出しているとした。多賀は、運動生成において人間の神経系のリズム的な活動の存在を仮定し、特に歩行系においてその検証を行った。多賀の研究からは、人間が歩行を獲得する段階において、そのリズムというものを環境から作り出し、体内の神経系に構築するモデルを捉えることができる。これらの研究に示されることは、身体運動において、リズムの表現というものがスキルの獲得に関係しており、そういったリズムの表現がされるためには神経系などの身体内の運動もリズムである必要があるということである。

近年、運動において体幹部の動作が重要であるという示唆が複数の研究によってなされている。仰木ら [仰木 04] はゴルフのスイングにおいて、加速度センサを身体、及びゴルフクラブに装着し、ゴルファーのスキルについての考察を行い、体幹部の減速現象について言及した。植野ら [植野 05] は、チェロのボーイング動作の研究において、関節のしなやかな動きの実現のためには、その関節の一つ以上手前の関節を動かすことの必要性について示唆した。古川ら [古川 05] は McMillen ら [MG03] が行った、鞭運動の力学的解析

を体幹部に適用することによって、チェロ演奏の弓の返し運動について言及した。阿部ら [AYF03, 阿部 03] の行った菊練り動作における各部位の時間的周期性の検証においても上級者ほど体幹部の安定がみられている。

これらの知見をもとに、本研究では、身体運動におけるリズムの獲得過程について調べる。これはすなわち、いくつかの身体運動においてリズムの表現というものがスキルレベルに関係しているという知見から、リズムの表現というものがどういう過程を経て表れるのかを検証することである。リズムの表現において一般的なモデルというものがあるとするならば、そのモデルに従い身体技能の適切な教授法を生み出すことができるだろう。本研究では、強弱の表現や周期性などが既に分かっているようなリズムを表現するようなスキルの獲得過程について検証する。これは、例えば菊練りのように、最終的にどのようなリズムが表現されるかわからないものではなく、ゴールを設定することでそのゴールを達成するまでの過程を検証することができるからである。過去の複数の知見をもとに、本研究では、リズム運動のスキル獲得のためには体幹部が重要な役割を果たすことを仮説として持つ。リズム運動において、その獲得がどのように為されるのかを、検証することは、その仮説の証明を助けると考えられる。

本研究ではリズム運動について一定期間の観察を行なった。身体の動きと技能レベルの関係を見出す題材としてサンバを選んだ。サンバは基本的に 16 ビートであり、その 1 拍が { 強・弱・弱・強 } の 4 音からなるアクセントが特徴的である。このリズムは、特に我々日本人にとってなじみの薄いパターンであり、意識的にこのリズムを取ろうとしてもなかなかその表現を行うことはできない。このようなリズムを体得するためには、ある程度の期間が必要である。また、サンバはその特徴として、腰・体幹部の運動が中心となっている。本研究では、10ヶ月間にわたってこの獲得プロセスを調査し、サンバのダンスとシェイカー演奏において、どれほどの期間でそのリズムが獲得できるのか、また、その獲得において、獲得者の身体運動についてどのような変化がみられるかを観察した。

1.2 アプローチ

本研究では、身体におけるリズム運動の観察を行う題材としてサンバを選び、サンバダンスの技能習得過程と、シェイカー演奏の技能習得過程について、約 30 名の被験者の身体の運動を計測し、その分析・比較、そして考察を行った。また、この運動のリファレンスとしてサンバのインストラクター 1 名の運動についても、定期的に計測し、分析・比較に用いた。

身体の運動計測には、加速度センサを用いた。加速度センサは、体幹部及び手首部に装着した。体幹部の運動の周期性とその特徴を捉え、その運動がどのように付随する運動であるシェイカー演奏スキルに関係してくるのかを検証した。

サンバは被験者が数ヶ月で基本的な動きを確立できるリズム運動である。サンバの動きを加速度センサを用いて観察・評価することで、リズムミックスな動きにおける体幹部の関係について新たな知見を得ることを目標とした。

本研究ではリズムを周期性とアクセントという観点から検証した。本研究の流れを以下に列記する。

1. 加速度データとビデオによる動作観察

インストラクターのサンバダンスにおいて、体幹部の加速度データにどのような特徴が表れるのかをビデオ観察により調査した。ここでは、データからサンバリズムにおける特徴を周期性とアクセントという観点において、どのように捉えるかの検討も行った。

2. サンバダンスの加速度データ計測実験

先に得られた知見を用いて、加速度センサを被験者の体幹部に装着し、サンバダンスの習得過程において、その加速度データがどのように変化するのかを検証するためのデータ計測を行った。

3. シェイカー演奏の加速度データ計測実験

加速度センサを被験者の腕部に装着し、シェイカー演奏の習得過程において、その加速度データがどのように変化するのか。また、サンバダンスの習得とシェイカー演奏の習得についてどのような関係が得られるのかを検証するためのデータ計測を行った。

4. 結果の考察

実験で得られたデータを元に、各被験者の習得過程においてデータにどのような変化があるのかを、相関解析や周波数解析などの方法を用いて比較・検証した。

1.3 関連研究

1.3.1 モーションキャプチャ装置を用いたサンバダンスの習得過程の研究

石川、山本、藤波は [石川 06, YIF06] はモーションキャプチャ装置を用いてサンバダンスの習得過程について観察した。この研究では、2名の初心者のサンバダンスの上達過程を6ヶ月にわたり観察することによって、被験者に { 強・弱・弱・強 } のサンバ特有のリズムの習得がなされたことが、モーションキャプチャの身体運動のデータに対して自己相関による分析と身体の局所的な部位（右ひざ）の高さ方向からみた波形の分析から示された。

自己相関の観察においては、初回の実験では強弱のアクセントが表現できていない状態である全ての拍において同様の表現を行うような運動であったのに対し、5ヶ月後に行われた5回目の実験では強弱のアクセントがつけられたパターンに変化したことが示された。

石川らのアプローチは、被験者に対して5ヶ月という長期間に、一定の間隔においてデータをモーションキャプチャ装置を用いて計測し、初心者がサンバダンスを獲得する過

程を検証するものである。しかし、モーションキャプチャ装置を用いたことから、被験者が少人数に限られてしまい、多くのデータを計測できていない。また、ダンスにおけるサンバリズムについての知見にとどまっている。本研究は、この石川らの研究成果をもとに、多人数・長期間のサンバリズムの習得過程のデータ収集を行い、さらにサンバリズムにあわせた楽器演奏（シェイカー演奏）に関するデータ収集を行った。

1.3.2 歩行発達の研究

多賀 [多賀 02, Tag97] は、彼の一連の研究で得た現象論をもとにして、歩行発達についてモデル化を行った。ここでは、特に歩行発達における神経振動子の活動の自由度の変化について言及している。多賀は、神経系のモデルを、リズム生成系と姿勢制御系という二つの系から構成し、原始歩行期、姿勢制御発達期、独立歩行の開始、成人型歩行の4段階の変化を仮定した。多賀は、歩行の運動発達において、関節角の自由度である静的自由度と、筋肉の自由度である動的自由度を定義し、その自由度の凍結、動作の位相の分化などが段階的に行われるモデルを示した。

多賀のアプローチは、CPGといわれる神経系を体内に仮定し、人間が生得的に持つ歩行獲得のメカニズムについて、神経系・動作系などのコンピュータシミュレーションから実際の運動獲得を説明するものである。この歩行獲得のメカニズムは、他の動物に応用できる可能性もあり、実際にCPGの存在は除脳を行ったネコの実験によりネコにその存在を認めている。

本研究は、サンバリズムという生得的、本能的ではないリズム運動というものの獲得過程について検証するものである。歩行獲得においては赤ちゃんが成長する過程になされるものであり、本研究の成人後のリズム獲得という点で多賀の研究とは異なる。また、多賀のアプローチがコンピュータシミュレーションからの言及によるのに対して、実際にあられる現象を検証する段階である本研究とは研究のフェーズを異にしているといえる。しかしながら、多賀の仮定したCPGを中心とした神経系のモデルはサンバリズムのような後天的に獲得されるリズムの表現に適用することはできよう。筆者は、多賀のアプローチを支持する立場をとる。サンバリズムを表現するためのスキルが獲得されるために、CPGのような神経系の相互作用があるという説明は不自然ではない。しかし、そのためには先ず人間がサンバリズムの表現をどのように獲得するのかを明らかにする必要がある、本研究ではそのメカニズムについて扱う。

1.3.3 チェロの運弓スキルの研究

植野、古川 [植野 05] は、特にチェロ演奏の運弓動作のスキルについて、モーションキャプチャ装置によってデータ計測を行い、計測されたデータに対して自身が考案したアルゴリズム、PRESTOを用いることにより解析した。植野はここで、身体制御においてタイミングに着目し、タイミングに関するスキルをピークタイミングシナジーとしてモデル

化した。植野は、ピークタイミングシナジーとは、身体各部のタイミングを協調させるような制御に関する動作一貫性制約であり、運動タスクを遂行するために必ず満たさなければならない身体知であるとした。動作一貫性制約とは、スキルの分析において、その取り扱いが問題となる動作の冗長性を取り除くために、熟練者が示すような再現性の高い部分だけを計測データからモデル化したものであり、解剖学的なものと時空間的なものの2制約がある。解剖学的な制約とは、関節可動域や機能的肢位からの逸脱距離などであり、時空間的制約とは、身体と道具との相対的肢位や、これらの相対速度である。植野は、筋電図を用いて、チェロの運弓動作の筋活動電位を計測し、その運動中の解剖学的制約について筋活動から説明した[UHF97] また、背中の姿勢と、時空間的制約についての言及も行った。

PRESTO は、ピークタイミングシナジーについて身体計測データから自動的に構築するアルゴリズムである。計測された波形データから多角形近似を用いて、波形の変化ピークとその時間的なズレを特徴点として抽出し、時系列データマイニングによりこれらの法則性を導くことでピークタイミングシナジーを導出する。

植野のアプローチは、身体スキルについて動作一貫性制約という視点から考察することで、解釈を与えるものである。これは、主に熟達者からのスキルの抽出という点に着目しており、本研究が新しいスキルの獲得をターゲットとしているものとは趣を異にしていると考えられる。一方で、動作一貫性制約という視点において熟達者のスキルに対しての解釈をあたえることで、初心者のスキル獲得を助ける可能性もある。特定のスキルについてこの制約について一定の知見が得られ、それが段階的説明できれば、スキル獲得過程の検証に用いることも可能であろうと考える。

身体スキルについて、動作制約モデルからアプローチした植野らの研究は、スキル獲得において制約条件を定め、その条件から演繹的に身体動作を求めることができる。そのような制約条件は、全ての身体スキルに適用できるような一般的な解が存在するわけではない。すなわち、その制約条件の設定にはスキルの抽出が不可欠である。本研究では、スキルの獲得過程に注目することで、スキルの抽出を試みる。

1.3.4 加速度センサを用いたゴルフスイング技能評価システムの開発

本研究と同様に加速度センサを用いた身体知研究として、仰木ら[仰木04]は、ゴルフのスイングにおいて、加速度センサを身体、及びゴルフクラブに装着し、ゴルファーのスキルについて考察を行い、スイングを評価するアプリケーションを開発した。仰木らは、体幹・下肢のポイントとして、ゴルファーの間では「左の壁」などという言葉で表現されてきた、身体のエネルギーを損なうことなく効果的にボールに伝達するために必要と考えられている体幹の左右方向の動き、および上肢については、手首とクラブを固定しているコックに関して、ダウンスイング開始後の手首関節角の増加であるコック解放（アンコック）のタイミングの2点に着目し、プロゴルファーとアマチュアゴルファーの比較を行った。ここで、ダウンスイング中の体幹の左右方向の減速現象および、手首の加速度の極小

値の出現タイミングによってゴルファーの技能を判定することが可能であるとした。

この研究からは、加速度センサによって、ゴルファーの技能といった比較的ナイーブな評価が可能であることが示されている。これは、同様に、加速度センサを用いてサンバ運動のデータ収集を行う本研究の機材の適当性を示しているとも考えられる。

ゴルフは、多数の人に親しまれており、その競技人口の多さから今までスポーツ科学的にも多くの知見が得られていた。これらの知見と加速度センサによるデータを照合することによって、技能の判定を可能にしたということが考えられる。一方、サンバはブラジルでは広く親しまれているが、我々には親しみの薄い運動である。それゆえに、その技能の判定が可能であるほどの研究がなされていない。また、ゴルフにはボールの方向や飛距離あるいはスコアといった客観的な評価を行う指標があるのに対して、サンバにはそのような指標というものが存在しない。本研究は、スキルを指標化しにくい対象に関する評価基準を考えるための基礎的な研究と捉えることも可能で、仰木らの研究とはの研究のフェーズという意味でも異なるものと考えられる。

1.4 本論文の構成

本論文は、全5章から構成されている。本章では、研究の背景と目的、そしてアプローチについて触れた。第2章では、理論と背景として取り上げるリズム運動とサンバについて説明し、その関係の中で何を明らかにするのかを述べる。また、その解析手法について述べる。第3章では、リズム運動の観察実験について、その実験構成と内容について述べる。第4章で3章で得られたデータの結果についてまとめる。最後に第5章として、本研究のまとめと考察、将来の展望について述べる。

第2章 理論と背景

本研究では、リズム運動の観察を行う題材としてサンバを選び、その上達過程を検証する。ここでは、リズム運動とは何であるのかを明らかにし、身体におけるリズム運動において体幹部に注目する理由について述べる。また、題材として取り上げるサンバにおけるリズム運動について述べ、リズム運動を解析するための手法について説明する。

2.1 リズム運動

人間の身体内では数多くのリズム運動が行われている。リズム運動とは、時間的な変化はあるがそれがある一定の周期をもって繰り返すような運動である。歩行やダンスといった単純な繰り返し運動だけでなく、ボールを投げるピッチング、サッカーにおけるキックなども、リズム運動と言えよう。このようなリズム運動は、どのようにして獲得されるのだろうか。

音楽のリズムというものは我々が日々慣れ親しんでいるものである。音楽のリズムの起源については、それぞれの音楽によって異なるものと考えられるが、そのリズムを受けて、我々は身体を動かすことが出来る。ダンスはその最たる例で、音楽のリズムに合わせて身体を動かし、リズムを表現する。

フィードバックとフィードフォワード ここで、音楽リズムの獲得・表現に関わる身体の感覚運動システムについて、制御工学で扱われる制御モデルと対比させて説明する。制御モデルは大別してフィードバック制御とフィードフォワード制御の2種類(図 2.1)に分類される [沢田 05]。

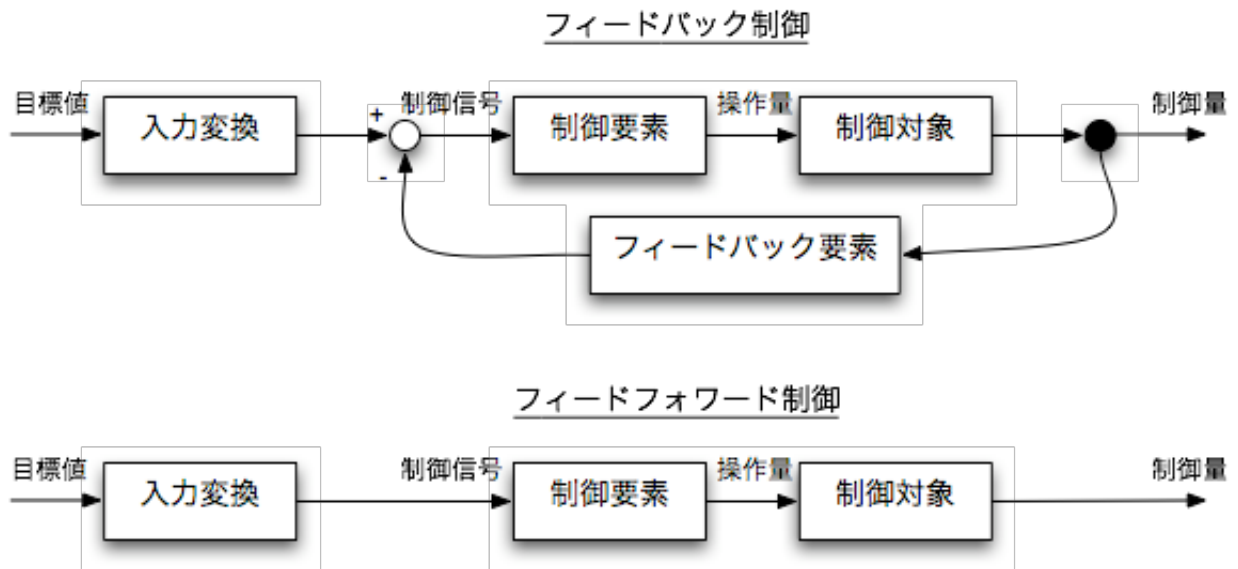


図 2.1: フィードバック制御とフィードフォワード制御

二つの制御に共通する処理の流れとしては、制御の目標値が入力されると制御信号へと変換され、制御器において制御対象への操作量が計算される。制御対象からはその操作量に応じて制御量が出力される。フィードバック制御では、目標値と制御量からのフィードバック要素信号によって制御信号が定まるが、フィードフォワード制御では、目標値によってのみ制御信号が定まり、フィードバック要素を持たないことが特徴となっている。

Wiener は著書サイバネティックス (Cybernetics) において、入力-出力系からなる物体全てについて、フィードバック制御による説明を試みた [WL49]。例えば、動物において手や足などの出力器（制御対象）の情報を、目や耳などの感覚器官で連続的に観察し、その情報を活用し出力器の制御を行うというものである。

ところで、このような感覚運動システムにおけるフィードバック制御では間に合わないような運動というものが考えられよう。例えば筆者はこの文章をキーボードを用いてタイピングしているわけだが、このような運動において直前に行った運動結果をフィードバックしては、継時的な素早い運動を説明することができない可能性がある。現実には、運動制御システムの特徴として、神経信号の処理や伝達に時間遅れがある。例えば、視覚刺激-運動という系では 100-300ms の遅延が生じているとされている [沢田 05]。このため、身体感覚運動システムにはなんらかの予測機構が存在すると考えられている。また、この予測機構をもとにしたフィードフォワード制御の存在がなければ、数百 ms オーダーのシステムの時間遅れのもとで安定した運動を行うことが出来ないと考えられる。Lashley は、このような問題意識のもと、感覚器官からのフィードバックによらない運動のモデルを考え、神経中枢による運動制御の存在を主張した [Las51]。感覚器官の遅れの問題とは別に Libet は、人間が行動を開始しようとする 0.5 秒前には準備として脳活動において電位が発することを実験により説明した [Lib04]。Keele は、抹消器官からのフィードバックに影響されずに実行できる筋運動の命令群が、実際の運動の開始前に生成されるとし、こ

れを運動プログラムとして定義した [Kee68]。そして、この運動プログラムに基づく制御を、プリプログラム制御 (preprogrammed control) と呼んだ。本稿において、このようなフィードバックを持たない制御は、プリプログラム制御、フィードフォワード制御、と呼んでいるのはこの制御を指している。

現実の運動モデルとしては、フィードバック制御、フィードフォワード制御どちらかを採用しているという単純なモデルになっているわけではないと考えられる。運動をプリプログラムし、フィードフォワード実行するようなモデルと感覚の一部をフィードバックするような複合モデルとなっていることが想定できよう。Jordan と Romelhart によって提案された順逆モデリング [JR92] は、事前に制御対象のフィードフォワードモデルを学習しておいてからその後フィードバックによって逆モデルを構成するといった複合モデルになっている。

リズム運動においても、音を聞いていては遅れてしまう、かといってプリプログラム制御では他の演奏者と合わせることができない、などの問題からフィードバックおよびフィードフォワードが入り組んだモデルとなっていることが考えられる。このように身体の信号処理や伝達の遅れ要素を含むリズム獲得と表現の問題は興味深い分野である一方、そのモデル化が非常に難しいだろう。本研究において現段階では、このような制御モデルとしてサンバダンスを捉えることは行わない。しかし、このような制御・学習モデルをとというのが神経系に存在することは疑わない。ただ、獲得モデルの推定、及び、制御モデルまでの一般化を扱うのは非常に難しい問題となるために、現段階では現象論としてのモデル推定にとどめる。本研究のアプローチは、このリズム獲得という問題に対して、身体の制御という面からではなく外部から観測される身体の運動情報から、リズムをテンポとアクセントという要素で捉え、リズム運動の獲得について分析するものである。筆者は本研究の結果が、サンバリズムの獲得過程の検証を通して身体運動のモデル化のための一つのケースとなることを期待する。

2.2 体幹部の重要性

ここでは、身体におけるリズム運動において本研究が体幹部に注目する理由について述べる。この理由は、主に二つあり、体幹部が身体における重心となっていること。また、運動の連鎖の中心になっていることがある。この二点について述べる。

身体の重心と ZMP 近年盛んに研究されている対象として、二足歩行を行うロボットがある。この二足歩行ロボットが、ダイナミックに歩行を行うための基本的な考え方の一つとして ZMP (Zero Moment Point) [VS72] を考慮することが挙げられる。ZMP の考慮によってロボットの二足歩行において、重心と外力 (重力などの外から加えられる力) との関係を単純化することが可能になる。二足歩行するロボットにおける ZMP は外力の床面上の作用点重心まわりに発生するモーメントの水平成分がゼロとなる点である。例えば、床反力のみを外力とすれば ZMP は床反力の中心点となる。ここで、ロボットの歩行のた

めに、次の動作のための ZMP を設定し (目標 ZMP)、そこから逆運動学的に足の位置などを決めることが、多くの二足歩行ロボットでは行われている。このように、多くのロボットでは重心と ZMP を考慮することにより、歩行動作を行っている。すなわち、歩行という基本となる動作においても重心の存在が非常に重要となる。ここから、ダンスにおいても同様にこの重心の移動が重要になると考えられる。リズムミックに重心を移動する能力が、リズム運動には求められるだろう。

人間の重心は静止時には体幹部にある。また、体幹部の運動が重心の移動に密接に関連している。これはリズム運動において体幹部の動作に注目する理由に相当する。

運動の連鎖 古川ら [古川 03] はチェロのボーイング動作の研究において、関節のしなやかな動きの実現のためには、その関節の一つ以上手前の関節を動かすことの必要性について示唆している。本研究において、体幹部の動きを重要とするのは、体幹部が、このような関節の連鎖においてその始点となり得る部位であるからである。

Zatsiorsky[Zat99]によると、人体は関節によって連結された多数の身体部分から構成される多軸の系とみなすことができ、このような連結を運動連鎖 (Kinematic chain) と呼ばれる。最も単純な運動連鎖は、1つの関節で連結された2つのリンクから交際され、関節で連結された隣接する2つのリンクの組み合わせは運動対 (kinematic pair) と呼ばれる。人間の上肢や下肢は、ひと続きの運動連鎖と捉えることが可能である。体幹は、2個の股関節、2個の肩関節、体幹と頸椎の関節の5つの運動対が含まれる。この運動連鎖は、開放性と閉鎖性に分類され、運動連鎖の一端が自由に動くとき、その連鎖は開放性と呼ばれる。開放性の例としては、手を宙に浮かべたときの肩関節と肘関節の運動連鎖や、肘関節と手首関節の運動連鎖などが考えられる。いずれも、一端を自由に動かすことが可能である。一方、閉鎖性連鎖は、連鎖の両端に制限があるものを呼ぶ。図 2.2 は、身体動作の運動学 [Zat99] より引用した人間の運動における運動連鎖の図解である。ここで、a,b,m は開放性連鎖を示し、A,B,C,D,E 及び、d,f,l,d1 は閉鎖性連鎖を示している。

このような運動連鎖は、身体のおかれる状況に応じて変化することになる。図 2.2 においても、右手を腰に当てている状態においては、肩・肘・手首が閉鎖性連鎖となっているのに対して、左手は自由になっていることからそれらが、開放性連鎖となっている。体幹部である腰部は、特に閉鎖性連鎖の中心となっており、状況に応じた変化が無い [VHA82]。ここからも、運動において中心となる可能性が高い。

2.3 サンバ

サンバは、19世紀の終わり頃にブラジルで成立した音楽で、現在ブラジルを代表する音楽として認知されている [Wik06]。黒人達が持ち込んだアフリカ系のリズミカルな民族舞曲と、ショーロといったブラジルの伝統的な音楽、そしてポルカやマズルカといったヨーロッパ系の舞曲の要素が組み合わせてつくられたものといわれており、裏打ちのリズムは実に特徴的である。このリズムは、表打ちになれた我々日本人にとっては新しいリズムで

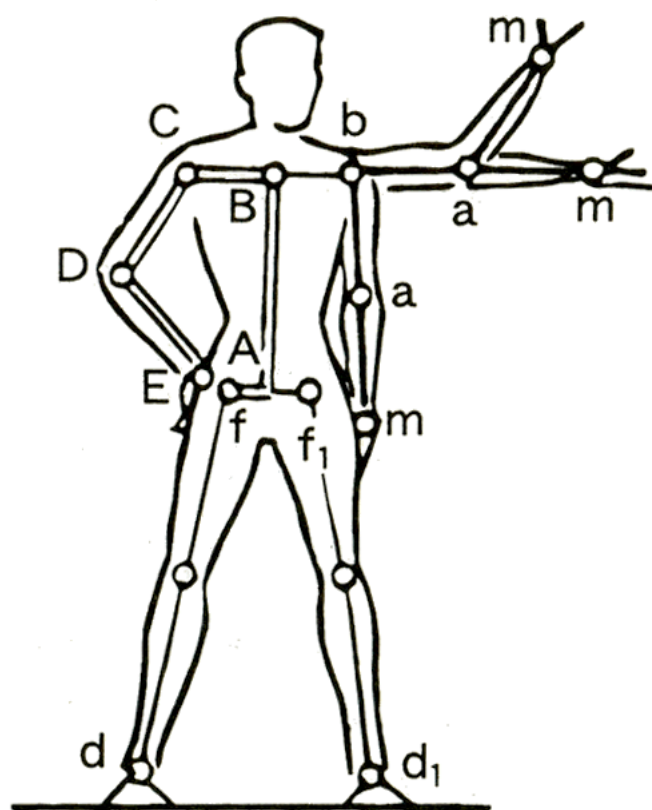


図 2.2: 人間の運動における運動連鎖

あるといえる。また、特に日本では本来のサンバの認知よりも、サンバからそのリズムを単純化し、叙情的な詞をのせて歌うサンバ・ボサノヴァが広く受け入れられている傾向がある。

アフリカ・ヨーロッパの舞曲の要素を取り入れていることから、サンバは舞曲としてその役割を果たしており、カーニバルといわれるように複数人でチームを組んで踊るスタイルが標準的なものである。なかでもリオ・デ・ジャネイロのカーニバルは世界的に有名であり、ヨーロッパで活躍するブラジル人サッカープレーヤーもこのカーニバルの時期になると一斉に帰省し、この祭りに参加することが知られている。この、カーニバルにおいてはエスコラ・ジ・サンバというチーム単位でサンバ・パレードを繰り広げ、このチームごとにパレードの審査を行うコンテストによって順位が決定する。

カーニバルのビデオなどをみると、そのダンスは実に体幹部が中心となっている運動であることが推測される。規則的な腰の上下運動が中心となって、それに付随するようなステップ、臀部の左右の振りがなされていることがわかり、身体運動における体幹部の重要性について扱う題材として適当であると言える。

サンバに関する研究として、石川ら [石川 06, YIF06] はモーションキャプチャ装置を用いてサンバダンスの習得過程について観察した。この研究では、2名の初心者のサンバダンスの上達過程を6ヶ月にわたり観察することによって、被験者に{強・弱・弱・強}のサンバ特有のリズムの習得がなされたことが、モーションキャプチャの身体運動のデータに対して自己相関による分析と身体の右ひざの高さ方向からみた波形の分析から示された。井口ら [IYF06] は、サンバのリズムを身に付けることによって、サッカーのドリブル能力が向上することを、モーションキャプチャーによるサンバダンスの解析と反復横飛びとスラロームドリブルのスコアの向上から示し、サンバリズムの習得が、その他の身体技能に応用できる可能性を示唆した。また、上村、山本ら [上村 04, YF04] はシェイカーを用いたリズム演奏に注目し、モーションキャプチャ装置を利用してその習得過程を追った。

本研究はサンバにおける身体運動の計測に、モーションキャプチャ装置よりも小型で安価な加速度センサを用いた。加速度センサはそのポータビリティの高さから、場所を問わずに使うことができる。また、より多人数におけるサンバリズム習得過程を客観的に評価することが可能になる。本研究では、加速度センサを用いることにより、サンバリズム習得過程の見地を更に深めることを目的とする。

サンバは黒人達が持ち込んだアフリカ系のリズミカルな民族舞曲、ポルカやマズルカといったヨーロッパ系の舞曲の要素が組み合わせてつくられたものといわれていることから [Wik06]、音楽としてリズムックであり、舞曲としての要素を持つために、サンバ音楽にはダンスは不可欠である。サンバダンスには、サンバの特徴的な{強・弱・弱・強}といったアクセントを持つリズムがあらわれていることが想定でき、実際にカーニバルのビデオなどを観察するとそのように見える。ここで、サンバのリズムアクセントについて、図 2.3 を用いて説明する。サンバにおいてアクセントは4拍中、1拍目と4拍目につくことが一般的とされる。図 2.3 において、アクセント無しで同じ 16 ビートのリズムを言葉で表せば「ダダダダダダダダダダダダダダ」となるところが、アクセントがある場合

は「ダズズダダズズダダズズダダズズダ」のように表現される。このとき「ダ」が強拍で「ズ」が弱拍である。

我々がこのようなリズムを表現するためには、身体において各部位が協調して動作する必要があると考えられる。リズムを表現するような運動をリズム運動とすると、それはまず周期的な運動であるといえる。陶芸の菊練り動作という周期的運動に注目した阿部らの研究 [AYF03, 阿部 03] では、身体各部位について、動作の同期と位相のずれなどのリズムミッ的な協調が示されている。

このような身体各部位の協調関係はサンバにおいても同様にあらわれるものと考えられ、音楽的なリズムを表現するためには、その身体運動自体もリズムミッである必要があるといえる。ここで、サンバにおけるシェイカー演奏では、先述した「ダズズダ…」といったリズムを手を持ったシェイカーによって表現することになるが、シェイカーを動かす手だけがリズムミッな動きをしているのだろうか。古川ら [古川 03] がチェロのボーイング動作において、なめらかな運弓動作のためには動かしている関節の一つ以上前の関節を動かす必要があると示したように、サンバにおけるシェイカー演奏の場合もシェイカーを動かす手だけの運動ではなく、身体各部位の連動を伴うようなリズムミッな動きがあると考えられる。

本研究では、このような協調関係のなかで、閉鎖性連鎖の中心となる体幹部の動きに注目し、初心者がサンバダンスとシェイカー演奏を習得していく過程において、その身体動作を加速度センサで計測し、その動きとスキルの関係について分析・考察する。ここで、サンバのリズム、アクセントは、どのような過程を経て身に付くのか。また、そのようなリズムを獲得する上で体幹部はどのような働きをするのか、そしてそれがシェイカー演奏にどのように作用するかを検証する。



図 2.3: サンバのアクセント

2.4 時系列解析に用いた手法

本研究では、サンバリズムの解析のために得られた時系列加速度データに対して自己相関解析を行った。ここでは、自己相関解析の手法について解説する。

2.4.1 データの補正処理

実験から得られた全ての加速度時系列データに対して10Hzをカットオフ周波数とするローパスフィルタリング処理を行った。日立金属製のセンサとATR-Promotions製のセンサから得られる加速度データが異なるタイムスケールを持つため、スプラインによるデータ補完によりそのマッチングを行った。ATR-Promotions製のセンサは各々のセンサが時計機能を有しており、同時計測によりその同期が可能であるが、プロトコル上、各々のセンサは数msから十数msずれて計測を行っている。このずれも補完によって訂正した。ATR-Promotions製のセンサから得られた加速度時系列データに対してスプライン補完処理を以下の手順で行った。

1. 実際に計測された66.7Hzのデータに対し1000Hzまで補完を行う
2. 同時に計測された複数センサの時間を合わせる
3. 日立金属製のセンサの時間分解能である200Hzまでダウンサンプリングを行う

これらの処理について以下に詳述する。

スプライン補完によるタイムスケールマッチング

タイムスケールマッチングは、時間分解能の異なる複数種類のセンサのデータを等しく扱うために必要となる。本研究では、時間分解能の異なる二種類のセンサを用いた。一つは、単独でしか計測することができないが、時間分解能は200Hzであるもの。もう一つは、同様の時間分解能を性能としては持っているが、複数台のセンサから安定してデータを計測するために、データロガーに制約があり66.7Hzの時間分解能でしかデータが計測できないものである。また、後者のセンサでは、個々のセンサが時計を持っており、その時間の同期を行うことでセンサデータの同期を取ることが可能となっているが、仕様上、同時刻にセンシングを行うことが出来ない。このために、同期されたデータとして扱うためには、データから時間を補正する必要がある。この2つの問題を解決するために、本研究ではスプライン補完によって時系列データを補完し、タイムスケールマッチングを行うことで対応した。

スプライン補完[AL68]は、ある区間のデータから、そのデータにある各点を通るような曲線を近似する関数を求め、中間のデータを補完するもので、3次関数による近似から補完を行う3次スプライン補完が良く使われている。3次スプライン補完は、lagrange補

完多項式の欠点であった大きな区間を補完する際に、部分区間に分けて補完曲線を近似するために生じる、部分曲線の接続部（節点）の導関数が不連続であるために滑らかに近似できないという問題を、各点間を3次の多項式で表し、接点においては低次の導関数を滑らかに接続させるような曲線近似である。与えられた n 個の列 $(x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ をとり、区間 $(x_i, x_{i+1}) (i = 0, 1, \dots, n-2)$ の3次スプライン曲線の係数を決定するために必要となる条件は以下の3条件である。このような3条件を満たす係数を決定し、スプライン補完関数を求めることになる。

1. 各区間 (x_i, x_{i+1}) でスプライン補完関数 $p(x)$ は次式である
2. 各点 x_i で、 $p''(x), p'(x), p(x)$ の値は連続であり、 $p(x_i) = f_i$ である
3. 両端 x_0, x_{n-1} では端末条件を満たす

本研究においても3次スプライン補完を用いてそのデータの補完を行った。図2.4は、実際の計測データに対して3次スプライン関数により補完を行ったものである。

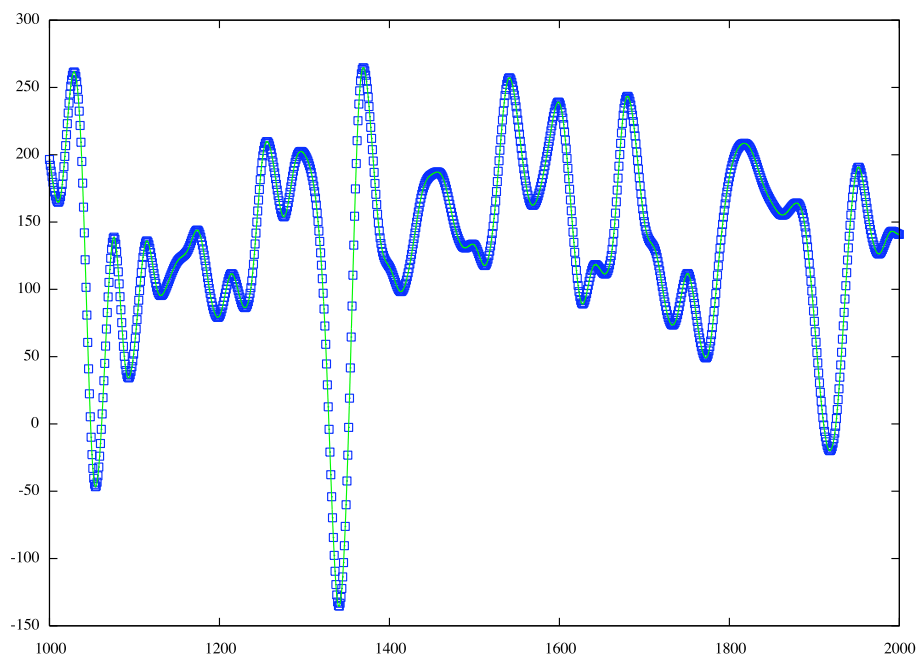


図 2.4: 3次スプラインによるデータ補完

ここで、青い四角シンボル（□）で表されるものが、実際の計測データの点、緑の実線が補完後のデータとなる。

ローパスフィルタを用いたノイズの除去

観測されたデータには、実際の運動とは関係を持たないと考えられる細かな微震動や計測ノイズを含まれているために、適切に周期性を計測するためにはその除去が必要である。ここでは、ローパスフィルタによるノイズ除去について説明する。

ローパスフィルタ (Low Pass Filter) とは、ある時系列データにおいて、遮断周波数といわれる特定の周波数以上の信号を減衰させ、それ以下の周波数の信号を通過させる働きをするものである。加速度センサから得られたデータに対してこれを用いることによって、図 2.5 で示されるような、実際の運動とは関係を持たないと思われる、細かな微震動や計測ノイズを除去し、適切に周期性を計測することが可能になると考えられる。

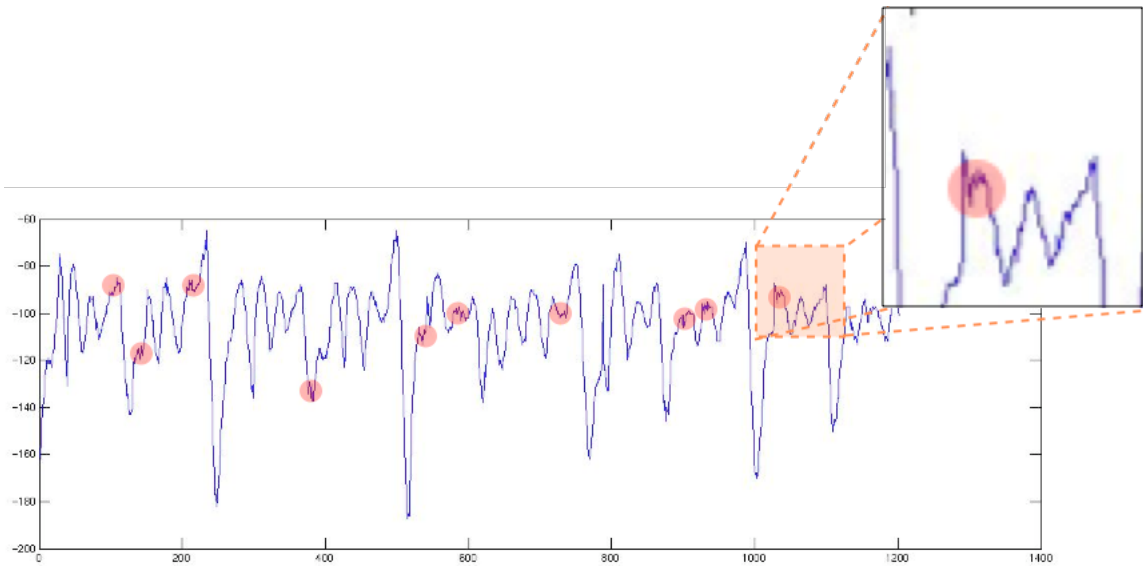


図 2.5: 高周波ノイズを含んだ加速度データ

ローパスフィルタには、周波数特性の異なる様々なフィルタが考案されており、代表的なものとしてバターワースフィルタ (Butterworth Filter)[But30] やチェビシェフフィルタ (Chebyshev Filter)[Dan74] などが挙げられる。バターワースフィルタの周波数特性は以下の式 2.1 で表される。

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (2.1)$$

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + F(\omega)^2} \quad (2.2)$$

これを一般化して式 2.2 としたとき、 $F(\omega) = \omega^n$ と置けば、これはバターワースフィルタに対応する。バターワースフィルタでは、フィルタの特性 $\frac{1}{1+\omega^{2n}}$ は ω が 1 よりも小さいときには 1 に近づく値を、 ω が 1 よりも大きいときは 0 に近づく値を取る。チェビシェフフィルタは、 $F(\omega)$ を ω が 1 より小さいときは極力小さい値を、 ω が 1 より大きいとき

は極力大きな値を取るような多項式を用いたものである。このような条件を満たす多項式をチェビシェフ多項式と呼ぶ。このチェビシェフ多項式 $C_n(x)$ と任意定数 ϵ を用いて、 $F(\omega) = \epsilon C_n(\omega)$ と置いたものがチェビシェフフィルタである。

バターワースフィルタと、チェビシェフフィルタにおける、50Hz を遮断周波数としたときの周波数特性を図 2.6 に図示する。図 2.6 から、チェビシェフフィルタのほうが急激な減衰特性を持っている一方で、通過域である 0-50Hz の周波数域において遮断周波数以下の通過域でリップルといわれる通過うねり¹が発生していることがわかる。対して、バターワースフィルタは減衰はチェビシェフフィルタに比べてなだらかなものの、通過域でのリップルが発生しておらず素直な特性を持っていることが見て取れる。

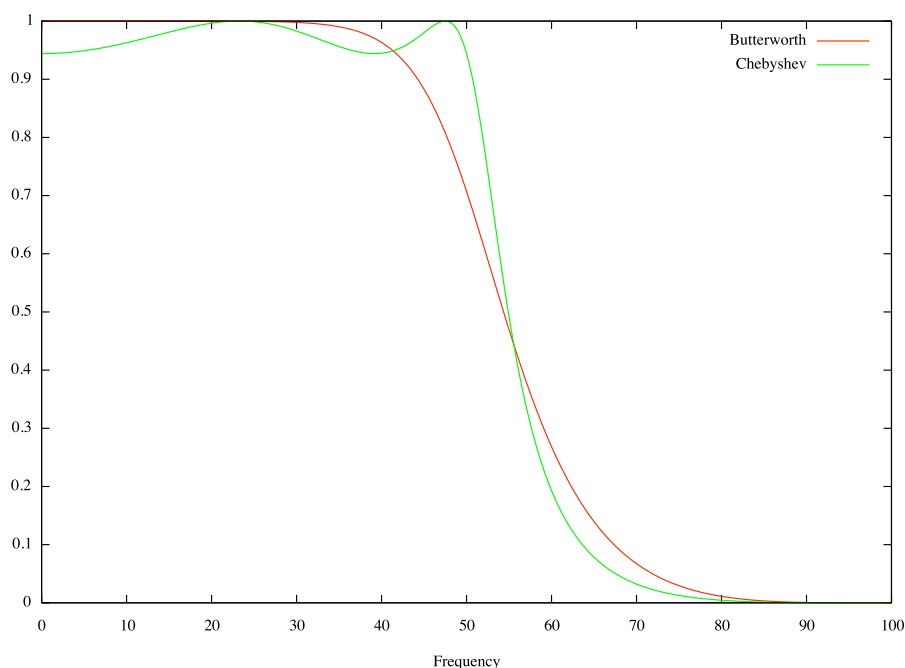


図 2.6: バターワースフィルタとチェビシェフフィルタの周波数特性

ここで、本研究では、位相特性が線型に近く、遮断周波数以下の通過域でリップルといわれる通過うねりが無いバターワースフィルタを用いて加速度センサから得られたデータのフィルタリングを行うこととした。

図 2.7 は、実際に加速度センサから得られた時系列データと、その時系列データに対して、10Hz でバターワースフィルタによるローパスフィルタを施したものである。

2.4.2 自己相関関数

サンバのダンス運動のように、一定の周期で繰り返される運動を解析する方法として自己相関関数がある [BJ94]。例えば、1 から N までの時間をとる時系列データを $X =$

¹通過域の周波数帯での信号の透過度が一定でなくうねったような通過特性となる

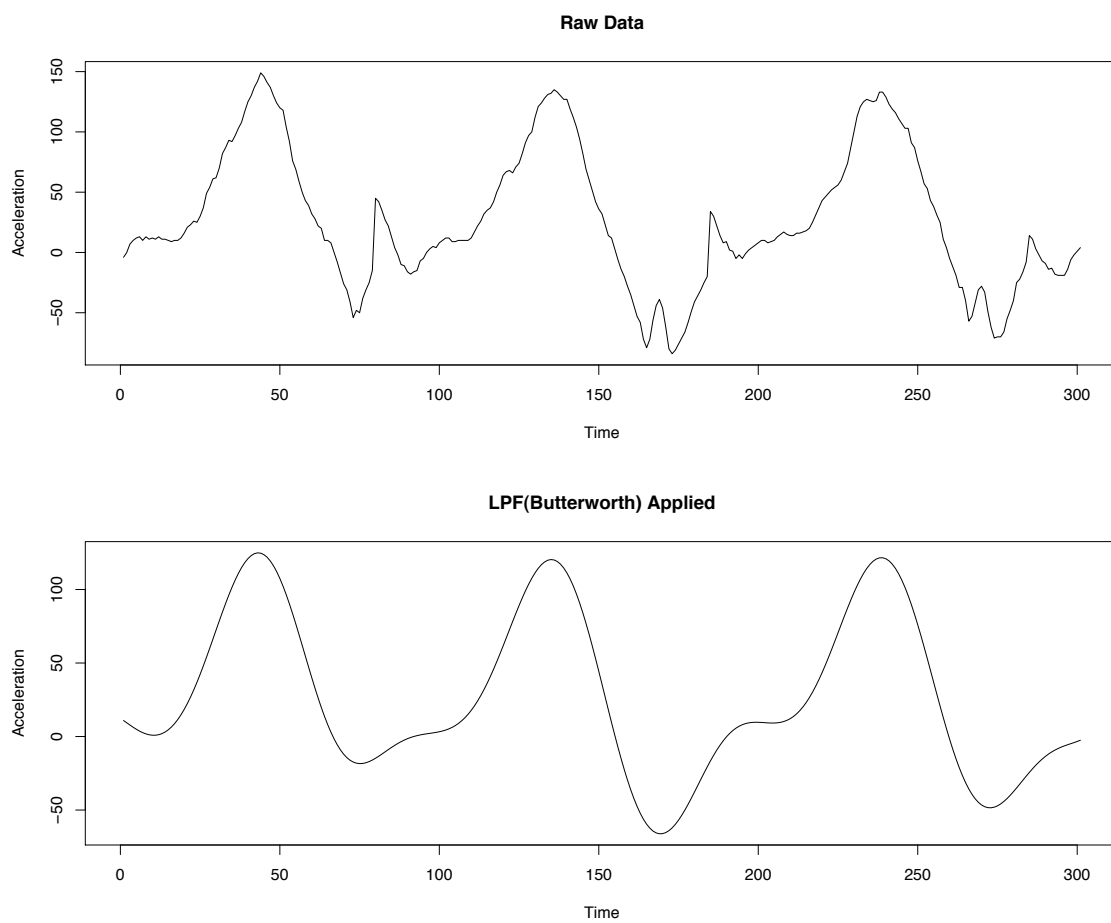


図 2.7: バターワースフィルタの適用

$\{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$ としたとき、その自己相関係数 r_l は、時間ずらし量ラグを l としたとき、式 2.3 で表される。

$$r_l = \frac{\sum_{i=1}^{N-l} (x_i - \bar{x})(x_{i+l} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

自己相関関数は、1つの時系列データに対して、そのデータをラグ l ぶんずらしたものと相関係数をとる操作である。この操作によって、ある時系列データの時間的周期性を観測することができる。

ここで、周期性を持たないランダムなデータに対して、その自己相関関数を求めることにする。図 2.8 は Mersenne-Twister 法 [MN98] により生成した疑似乱数と、その自己相関関数である。ランダムデータには、時間的周期性が無いために、自己相関関数からもそのピークが観測されない。

これに対して、周期関数の例として正弦波 (Sine Wave) について、自己相関関数を求めてみることにする。図 2.9 は正弦 (Sine) の値を 0 から 2π まで、 $1/360$ 刻みで繰り返し 5 回プロットしたものとその自己相関関数である。正弦関数は、 2π の周期性を持つ関数として知られている。これはつまり、ある実数 x の正弦、 $\sin(x)$ の値に 2π 或いは、これに任意の実数 y をかけた $\sin(x + 2\pi y)$ が等しいということである。図 2.9 の上部に示された正弦波においてもこれと同じことが言えるが、これは正弦 (Sine) の値を 0 から 2π まで、 $1/360$ 刻みで繰り返しプロットしたものであるから、この周期は 360 となる。ここで、下図の自己相関関数をみると、ランダムデータの場合とは異なり、ラグ 360 付近に相関係数のピークがでていることがわかる。また、その倍数である 720 にも同じようにピークが出ている。図からは読み取れないが、このピークにおける相関係数は 1、すなわち完全な正の相関があることを示している。このことから、この正弦波は 360 の周期をもつ周期関数であることが言える。

この自己相関関数による解析を行うことでサンバのダンスやシェイカー運動の時間的周期性を定量的にみる事が可能になると考える。石川ら [石川 06, YIF06] は、モーションキャプチャを用いたサンバダンスの計測結果について、身体運動の上下動について自己相関関数を適用し、サンバのリズムの特徴が表れることを示した。ここから、加速度センサから得られる時系列データについても同様の特徴が観察できることが推定できる。

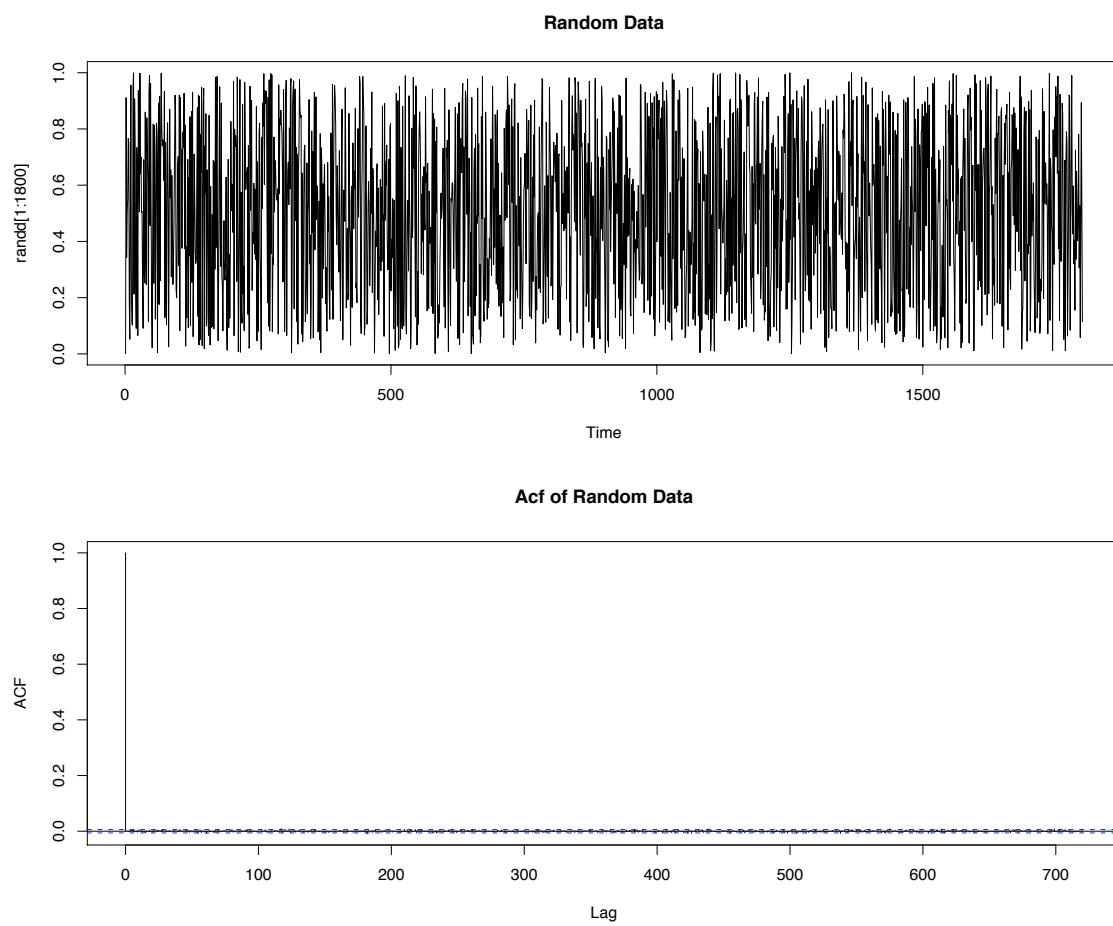


図 2.8: ランダムデータとその自己相関関数

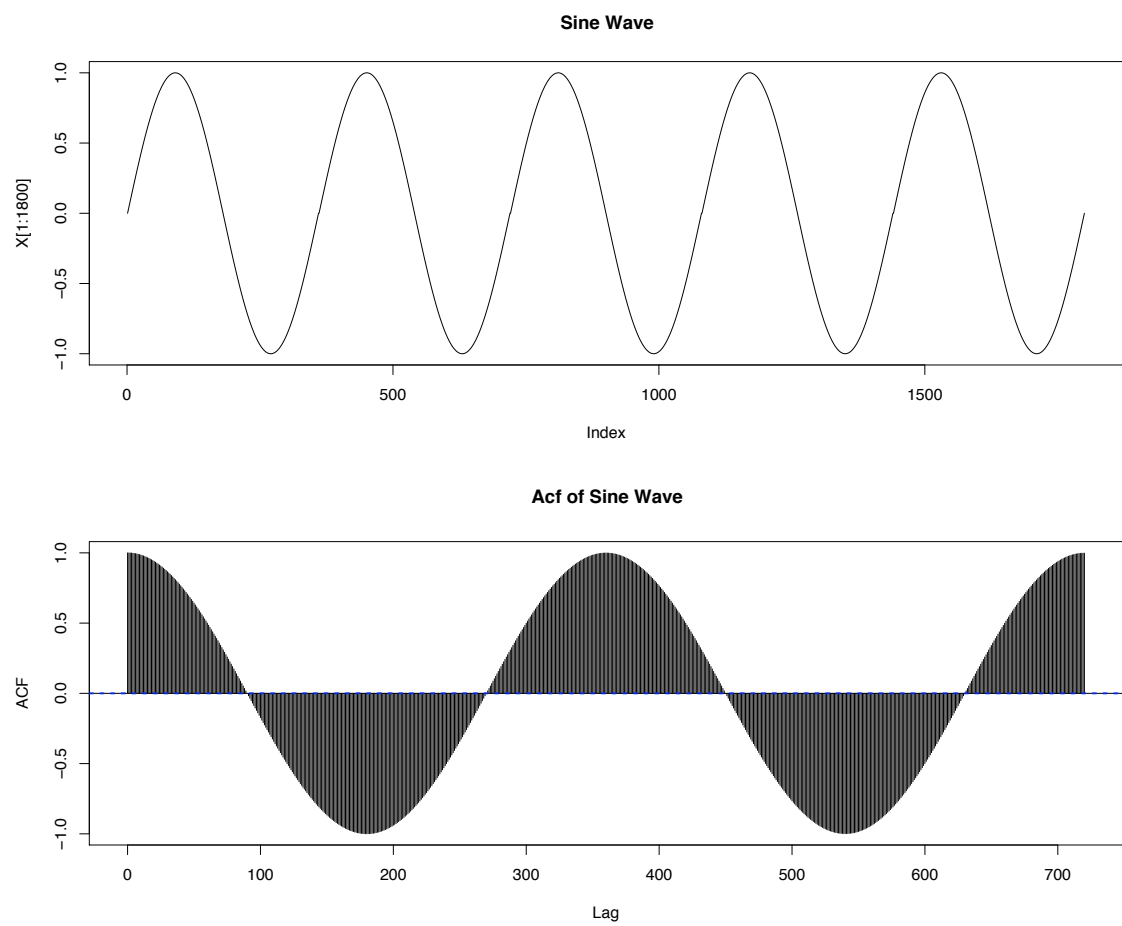


図 2.9: 正弦波とその自己相関関数

第3章 リズム運動観察実験

3.1 概要

実験は、被験者がサンバのリズム、すなわち曲のテンポに対応する周期的な運動と強拍と弱拍の差で表されるアクセントの表現を獲得するプロセスを検証するために行われた。被験者は高校のブラスバンド部に所属する30名である。実験は週に一回、毎月4回程度、10ヶ月間にわたって行われた。一回の実験で、3名程度の被験者を抽出し、腰及び手首にワイヤレス加速度センサを装着することによりデータを計測した。

3.2 実験設定

3.2.1 目的

サンバに親しみがない被験者を対象に10ヶ月間のサンバの練習を行い、その過程において身体の動作がどのように変化するかを検証する。

3.2.2 被験者

被験者は、30名の高校生である。被験者が所属するブラスバンド部は、コンクールなどに入賞するなどの実績があり、日頃から音楽に触れている。サンバのリズムには親しみがなく、サンバに関しては初心者と言える。

3.2.3 方法

被験者に対して、1週間に1回程度インストラクターによるサンバの指導を行なった。指導は、サンバリズムにのったシェイカー演奏技能を獲得することを目標とした。毎回の指導後に、数名の被験者に加速度センサーを装着して身体の運動を計測した。これを10ヶ月間にわたり行うことで、各被験者の身体運動の変化を検証した。

表 3.1: サンバ実験に用いた曲一覧

曲名	BPM
閉所恐怖症	90
競争が理想	105
Portlela e seus encantos	94
Amor proibido-Eu perdi voce-adeus,eu vou partir	100
Volta pro Morro	80
Te Segura	92
お祝いしよう	136
Beija-Flor	131
Nas Veias do Brasil	120
Peso na Balanca	133
Se Voce Quiser	134
Salario Manimo	126
Sai da frente	131
On line	111
La Nuit des masques	105

3.3 実験内容

3.3.1 練習

2月から7月まで及び9月から12月までの合計10ヶ月間にわたり1,2週間毎に一回ずつ合計34回、毎回1時間程度インストラクターによるダンス、及びシェイカー演奏の指導を受けた。

ここでは、ダンスの練習を先に行い、4月からシェイカー演奏の練習を行った。被験者の練習は、基本的に表3.1のうち、いずれかの音楽に合わせてインストラクターがダンスを実演し、それを模倣して踊ることを中心に行った。

この練習はある程度の広さを持つ教室にて行われたため(図3.1)、全員が同時に踊り、インストラクターが各人の踊りを動きながらチェックし、アドバイスを行う形態を採った。

これはシェイカー演奏においても同様であり、インストラクターによる実演に合わせて、被験者もシェイカー演奏の練習を行った。また、被験者が主にブラスバンド部員であり、音楽的知識を備えていることから、サンバリズムについては、踊り・シェイカー演奏といった実演する以外にも、ホワイトボードや黒板を用いて、その説明を音楽記号を用いて行うこともあった。



図 3.1: 練習の様子

3.3.2 ダンス運動

ダンス運動の計測は、被験者の腰部にワイヤレス加速度センサを装着することにより行った。加速度センサは X,Y,Z の三軸の加速度を計測することが可能であるため、それぞれ被験者の左右・上下・前後の動きを計測できる。また、同時にビデオカメラによってその動きを記録し、ダンス運動と加速度の関係についてビデオによる調査を行うために用いた。また、インストラクター及び数人の被験者に関してはビデオカメラの高速度モードによる記録によって 100fps の高速度撮影を行った。実験では、一回に 3 名程度のデータを計測し、ダンス運動を計測した延べ人数は、103 名である。実験の基本曲としては、表 3.1 のうち「競争が理想」という 105BPM のものを用いた。これは、サンバラしいといわれるテンポに近い BPM と考えられるからである。この他に、90BPM の「閉所恐怖症」及び 120BPM の「Nas Veias do Brasil」を比較のためにそれぞれ 3 試行、合計 6 試行の計測を行った。また、複数被験者間の相互作用について調査するために 5 試行について 2 人の被験者を対面させる条件、横向きに並列で並ぶ条件、後ろ向きに並ぶ条件によって同時に計測することを行った。

3.3.3 シェイカー演奏

シェイカー演奏の運動計測は、被験者の手首部にワイヤレス加速度センサを装着することにより行った。加速度センサは X,Y,Z の三軸の加速度を計測することが可能であるため、それぞれ被験者の手の動きの左右・上下・前後の動きを計測できる。また、同時にビデオカメラによってその動きを記録し、シェイカー演奏と加速度の関係についてビデオ

による調査を行うために用いた。また、インストラクター及び数人の被験者に関してはビデオカメラの高速度モードによる記録によって秒間 100 コマの高速度撮影を行った。実験では、一回に 3 名程度のデータを計測したが、ダンス運動の記録のみを行った実験もあったために、シェイカー運動を計測した延べ人数は、51 名である。実験の基本曲としては、表 3.1 のうち「競争が理想」という 105BPM のものを用いた。これは、サンバラしいといわれるテンポに近い BPM と考えられるからである。この他に、90BPM の「閉所恐怖症」及び 120BPM の「Nas Veias do Brasil」を比較のためにそれぞれ 3 試行、合計 6 試行の計測を行った。また、複数被験者間の相互作用について調査するために 5 試行について 2 人の被験者を対面させる条件、横向きに並列で並ぶ条件、後ろ向きに並ぶ条件によって同時に計測することも行った。さらに、シェイカー演奏において、体幹部から腕部までの位相のずれを調査する目的で、加速度センサを腰部・肩部・膝部・手首部の 4ヶ所に装着した実験も 4 試行を行った。

3.4 システムの構成

システム全体の構成は、最小で図 3.2 のような構成とした。
計測の流れとしては以下である。

1. 被験者にワイヤレス加速度センサを装着する
 2. ワイヤレス加速度センサから得られた加速度データを、パーソナルコンピュータ (PC) 上に記録する
 3. PC にて加速度データを時系列の波形データとして可視化する
 4. ダンスやシェイカー演奏の映像をビデオカメラにて記録する
 5. ビデオカメラからの出力と、PC からの出力をビデオミキサーにてミキシングする
 6. 加速度データと運動の様子がミキシングされた映像を HDD レコーダーに記録する
1. 及び 2. が被験者の運動における加速度データを記録するために必要な処理である。3. 以降は 2. までは記録できた加速度データと映像を照らし合わせてその特徴を分析するために用いた。実際には、1. において、ワイヤレス加速度センサからの情報を受信するために、日立金属株式会社製のセンサーの場合、PC に専用の USB 接続の受信装置が接続され、株式会社 ATR-Promotion 製のセンサーの場合、Bluetooth の USB アダプタが接続された。また、PC からの可視化された加速度データをビデオミキサーに入力する際には、ダウンスキャンコンバータと呼ばれる、映像信号を変換する装置を用いて PC からの VGA 信号はビデオ信号への変換が行われた。

最小構成は以上であるが、この他にその都度、運動の様子を細かに検証するための、高速度撮影が可能なビデオカメラや、実験風景を撮影する目的で、デジタルスチルカメラなどを用いた。

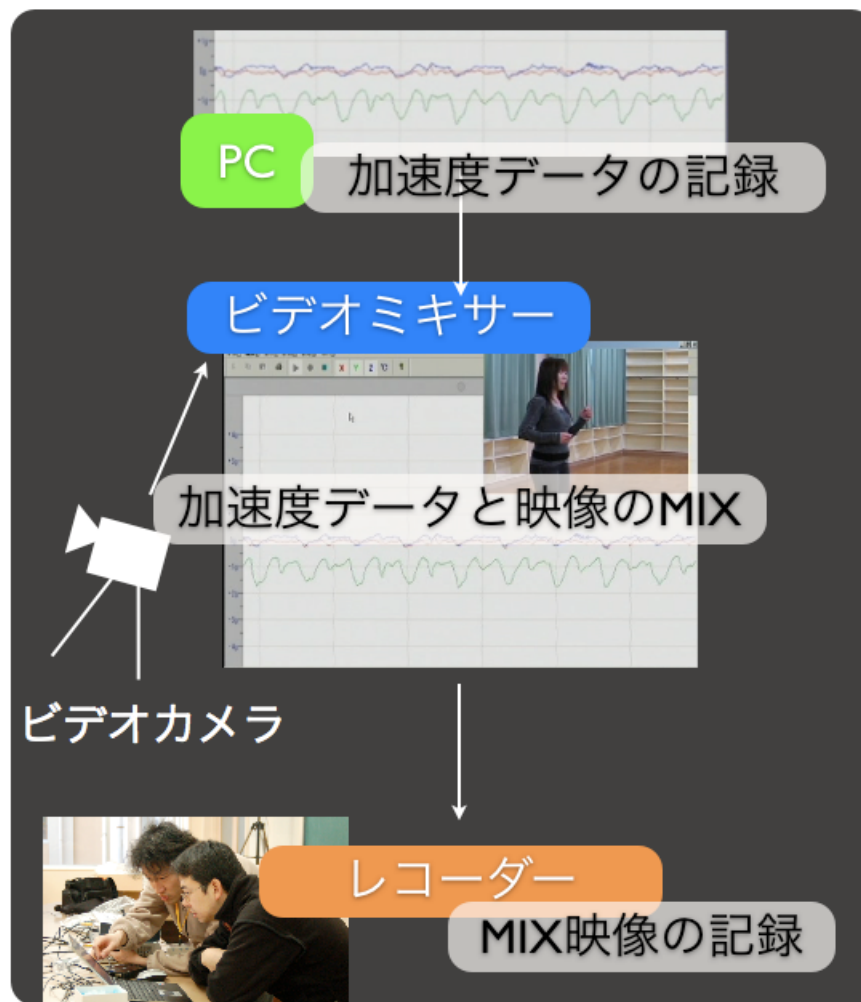


図 3.2: 計測システムの構成

加速度センサ 図 3.3 に示したように、ワイヤレス加速度センサを被験者の腰部と手首部に装着することにより被験者の運動を計測した。ワイヤレス加速度センサは日立金属株式会社のワイヤレス 3 軸加速度センサ (H48C) 評価キット、及び株式会社 ATR-Promotions の小型無線加速度センサを用いた。

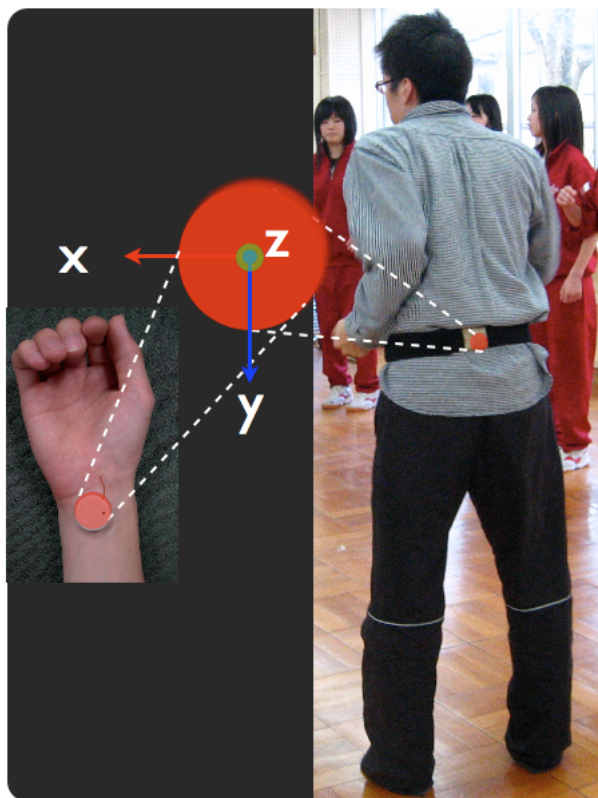


図 3.3: ワイヤレス加速度センサ装着位置

これらの二種類のセンサは、実験の状況に合わせて使い分けた。二種類のセンサの特徴について以下に詳述する。

特定小電力無線ワイヤレス加速度センサ

日立金属株式会社のワイヤレス 3 軸加速度センサ (H48C) 評価キット (図 3.4) は、特定小電力無線を用いたワイヤレス加速度センサである。このセンサは各軸 $\pm 3G$ の加速度を $8.8 \times 10^{-3}G$ の精度で計測することが可能であり、その時間分解能は 200Hz である。

最大で 3 チャンネルまで同時に計測することが可能であり、実験においては 2 台の PC を用いて同時に 2 チャンネル、2 台の加速度センサを使って計測を行った。

Bluetooth 無線ワイヤレス加速度センサ 株式会社 ATR-Promotions の小型無線加速度センサ (図 3.5) は、Bluetooth を用いたワイヤレス加速度センサである。このセンサは、日



図 3.4: ワイヤレス 3 軸加速度センサ (H48C)

立金属製のものと同様に、3 軸の加速度を各軸最大 $\pm 3G$ を計測することが可能で、センサー自体の時間分解能は 200Hz である。このセンサーは Bluetooth を採用しているために、同時に 7 台までの計測が可能で、各センサーの時刻同期を行うことにより、同期したデータを計測できるのが特徴である。

実験では、事前の予備実験によって安定してデータの計測が可能であった 4 台の同時計測を行った。これにより、日立金属製の加速度センサよりも一度に多くのデータを計測することが可能である。

しかし、センサー自体の時間分解能は 200Hz であるが、そのデータ計測プログラムの制約上、最大 66.7Hz でしかデータの計測を行うことができなかった。このため、日立金属製のセンサと同様の時間分解能でデータを扱うことができない。そこで、本研究ではデータを処理する前処理として補完を行うことで、2 種類のセンサを同様のタイムスケールで扱うための対応とした。これについては、他の項で述べる。

ビデオカメラ ビデオカメラは、実験において加速度データと実際の動きを確かめる用途と、実験中の様子を記録するために用いた。ビデオカメラは株式会社キヤノン製の IXY DV M5(図 3.6)を使用した。これは、MiniDV テープを採用したカメラで、秒間 30 フレームにて記録するスタンダードモードで 60 分の録画が可能である。また、外部入出力端子を持ち、録画中でも外部への映像と音声の出力ができる。本研究では、この外部入出力端子から、映像と音声の出力を行い、ビデオミキサーにビデオ映像を入力した。



図 3.5: Bluetooth ワイヤレス 3 軸加速度センサ



図 3.6: Canon IXY DV M5

パーソナルコンピュータ パーソナルコンピュータ (PC) は、加速度センサからのデータを記録するために、また、加速度データを可視化し、リアルタイムに波形を観察するために用いた。PC は松下電器工業の TOUGH BOOK CF-18(図 3.7) を使用した。この PC は、OS に Windows XP を採用しており、日立金属製の加速度センサからの情報を可視化するソフトウェアや ATR-Promotions 製の同様のソフトウェアを動作させることが可能である。また、外部への VGA 出力端子を持ち、可視化した加速度データを外部に出力することができる。本研究では、この VGA 出力端子からの出力をダウンスキャンコンバーターによってビデオ信号に変換し、ビデオミキサーに映像を入力した。



図 3.7: Panasonic TOUGH BOOK CF-18

ダウンスキャンコンバータ ダウンスキャンコンバータとは、パソコンなどの高周波数・解像度の映像信号をビデオ信号などの低周波数・解像度の信号に変換するものである。本研究では、PC にて出力した可視化された加速度波形データの映像を、ビデオミキサーに入力するために必要となる。ダウンスキャンコンバータとしては株式会社アイ・オー・データ機器の TVC-D4(図 3.8) を用いた。本研究では、ダウンスキャンコンバータに PC からのアナログ VGA 信号を入力し、ビデオミキサーに S ビデオとして出力を行った。

ビデオミキサー ビデオミキサーは複数の映像を合成し、単一の映像ソースとして出力するものである。本研究では、ビデオカメラによって撮られた実験映像と、PC からの加速度を可視化した映像をミキシングするために必要である。ビデオミキサーは、ローランド株式会社の LVS-400(図 3.9) を用いた。



図 3.8: TVC-D4

本研究では、加速度データの検証として主に使うために、図 3.10 のように、メイン画面として加速度波形を表示し、画像の右上に、被験者の様子を表示するように設定した。



図 3.9: LVS-400

HDD レコーダー HDD レコーダーはビデオミキサーで合成された映像を記録するために用いられた。本実験で使用した HDD レコーダーは松下電器工業社製の DIGA DMR-E87H(図 3.11) である。これは、160GB の HDD を内蔵しており、標準モードで約 70 時間の記録が可能である。また、DVD ドライブを内蔵しており、HDD 内に記録された映像を DVD に複製し、PC で読み込むことができる。

本実験では、合成された映像を HDD レコーダーに記録し、加速度と動作の関係についての検証を行った。

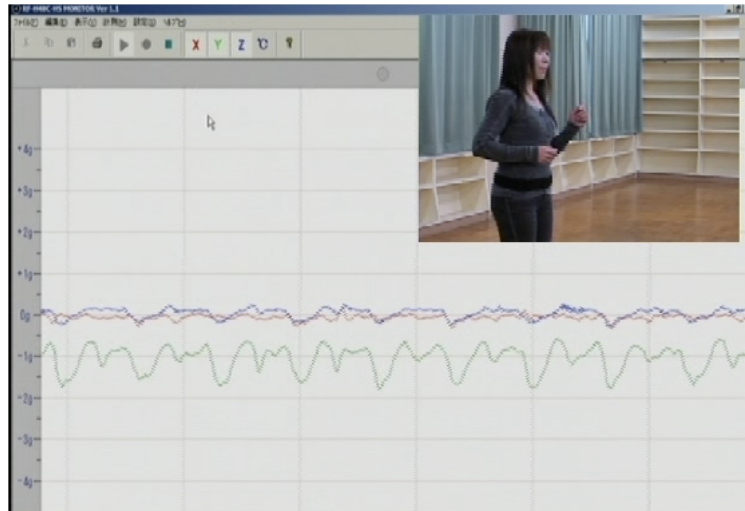


図 3.10: 合成された加速度波形と実験映像



図 3.11: DIGA DMR-E87H

第4章 結果

実験から、シェイカー演奏を伴わないサンバダンスについて加速度センサを腰部に装着し計測した加速度時系列データが21被験者103試行、シェイカー演奏を伴ったサンバダンスについて加速度センサを腰部、手首部の二ヶ所に装着して計測した加速度時系列データが17被験者51試行得られた(表4.1)。また、上記の試行とは別に、インストラクターのデータを、シェイカー演奏を伴わないサンバダンスについて2試行、シェイカー演奏を伴ったサンバダンスについて4試行の合計6試行計測した。

図4.1は、シェイカー演奏を伴わないサンバダンスの計測例である。図は腰部に装着した加速度センサにおける上下方向の加速度時系列データの一部である。同様に、図4.2は、シェイカー演奏を伴ったサンバダンスの計測例である。上図は腰部に装着した加速度センサにおける上下方向の加速度時系列データ、下図が手首部前後方向の加速度時系列データの一部である。

表 4.1: 実験によって得られた加速度時系列データの分類

シェイカー演奏の有無	有	無
被験者数	17	21
試行数	51	103
センサの位置	腰・手首	腰

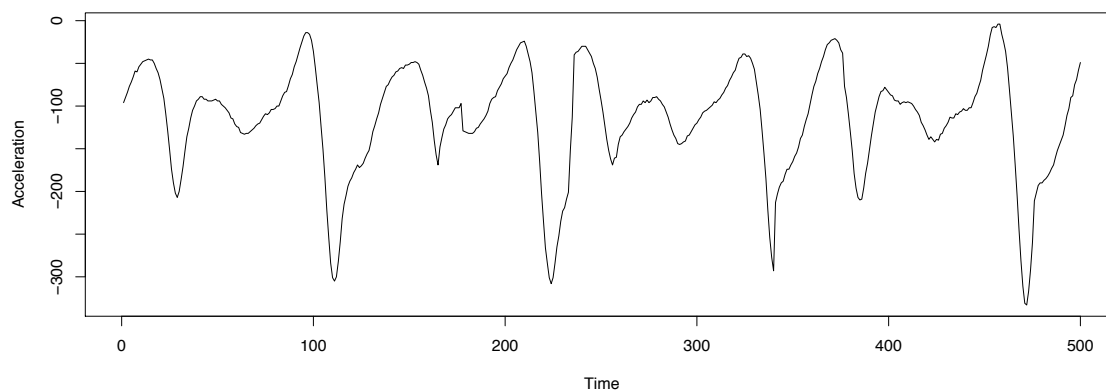


図 4.1: 腰部上下方向の加速度時系列データ (シェイカー演奏無し)

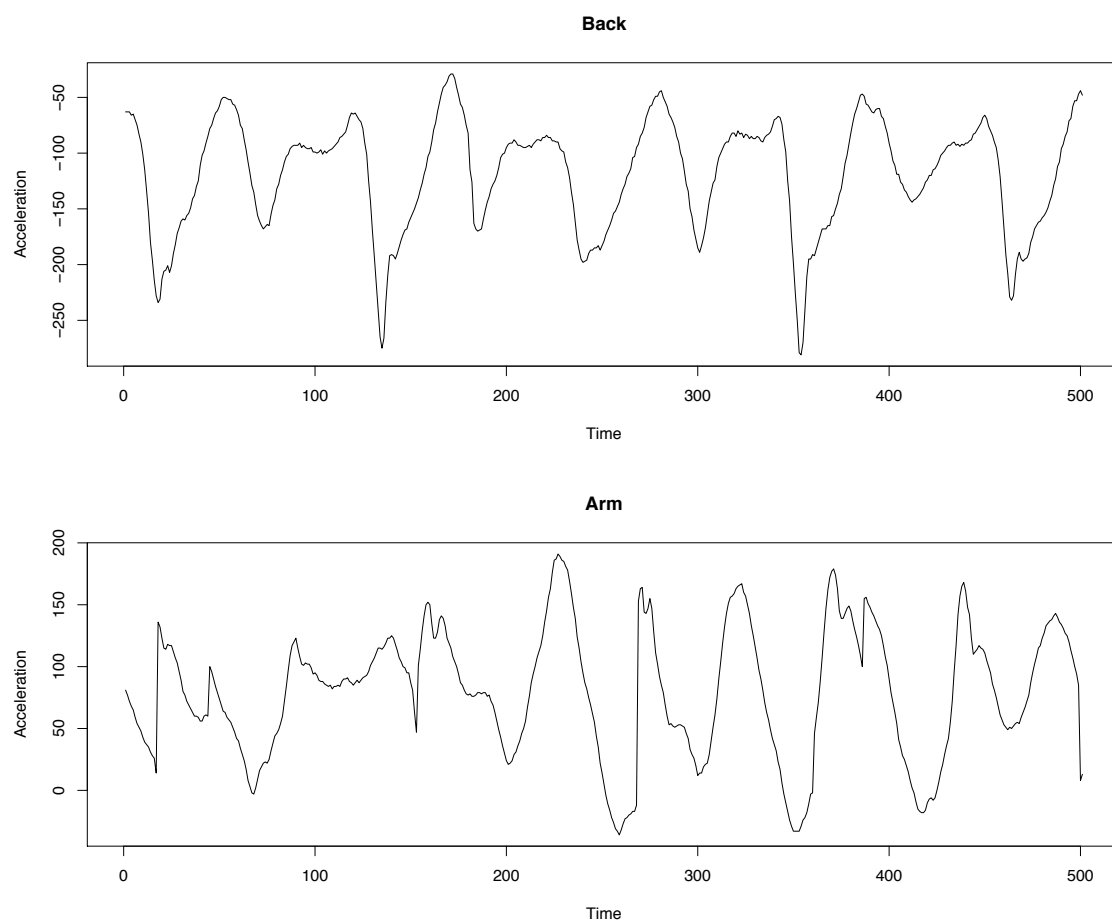


図 4.2: シェイカー演奏を伴ったダンスの加速度時系列データ
上:腰部上下方向
下:手首部前後方向

4.1 リファレンスデータ

図 4.3 は、インストラクターが、105.73BPM の曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。

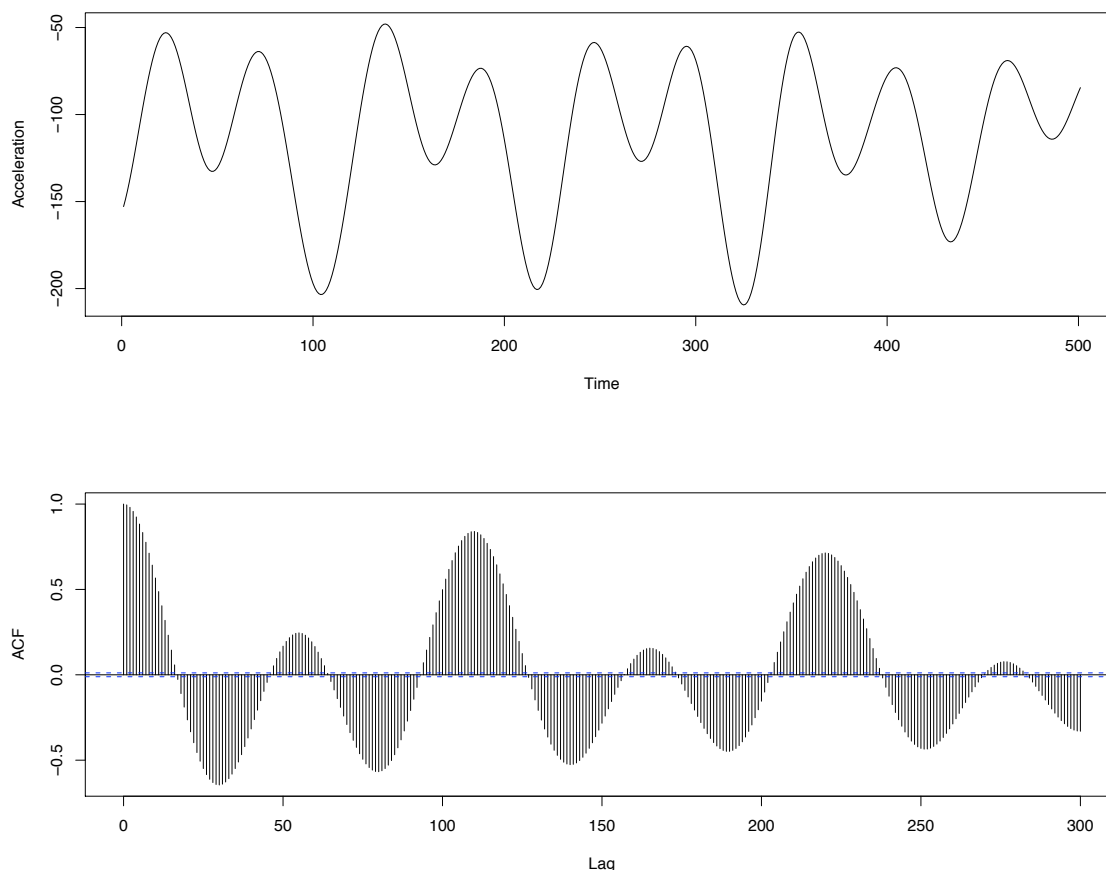


図 4.3: インストラクターの体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数

このデータから、周期性を読み取り、曲の周期との対応を考えるために、変換を考える。1 周期は 1 テンポに対応する秒数に 1 秒間あたりのデータ数であるから、この場合は $60\text{s}/105.73\text{BPM} \cdot 200\text{Hz}$ で、およそ 113.5lag に対応する。図 4.3 の下図、自己相関関数のピークは 113lag にでており、この曲に対応した周期的な運動がなされていると考えられる。また、ここで 57lag 付近にも小さなピークが出ていることが観測できる。これは、サンバの弱拍の運動に対応する振幅の小さな波と、強拍に対応する振幅の大きな波が、波形中に存在することによって、その相関が数値として表出されたものである。

図 4.4 は、図 4.3 についてアクセントの強弱について解釈を与えたものである。

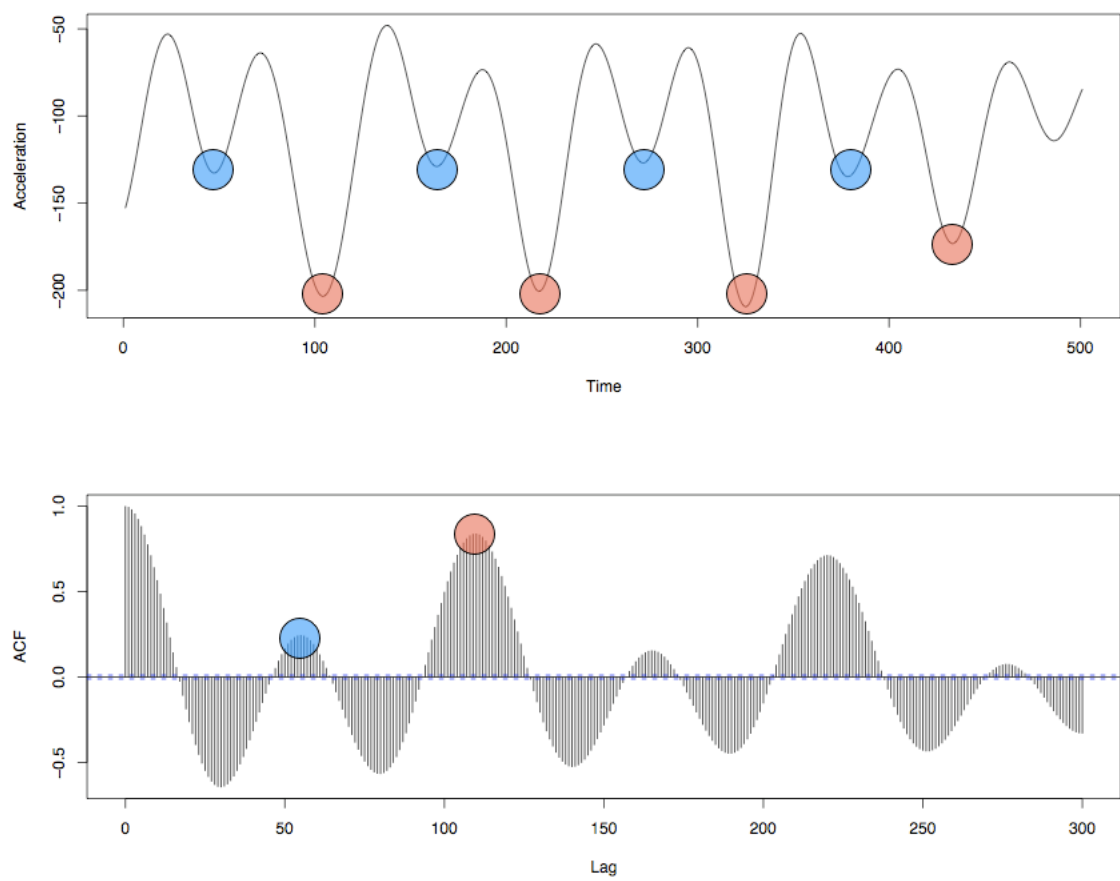


図 4.4: インストラクターの体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数

この図において、図中の赤色の丸で示される 113lag 付近にでているピークについてはテンポの面から述べた通りである。アクセントにおいて重要なのは図中で青色の丸で示される 57lag 付近に観測できる小さなピークである。これは、一周期中に含まれる強拍の大きな山（や谷）と、弱拍の小さな山（谷）が弱い相関をもつためであり、この性質を利用することで、強・弱のアクセントを抽出することが可能になると考えられる。

ここで、インストラクターのデータの解釈を行うと、図 4.4 上図の波形データにおいて、赤丸で示される強拍の間隔が 113lag におけるピークとして表され、赤丸と青丸の間隔が 57lag におけるピークとして表されているものと考えられる。また、自己相関関数の特徴から、強・弱（赤丸・青丸）の差が小さい場合は、図 4.4 下図において 57lag にある青丸の相関係数は大きくなり、逆に大きければ、その相関係数は小さくなる。つまり、自己相関関数において、曲のテンポに対応する lag の $\frac{1}{2}$ に相当する lag 付近のピークにおける相関係数を調べることによってアクセントの有無の解釈が可能となると考えられる。ここで、インストラクターの曲のテンポに対応する 113lag の相関係数は 0.85 であり、57lag の相関係数は 0.25 であった。その差の 0.6 が強弱の差をある程度表していると言える。

図 4.31 は、インストラクターが、曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動と、手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。ここでは、シェイカー演奏における腰と手首の運動で加速度の大きさ（運動のエネルギー）は異なるにも関わらず、自己相関関数において同様の特徴を表すことが示されている。ここから、手首部と腰部の双方において同様の解析が可能であることを示している。

すなわち、加速度センサによって計測した手首部と腰部、双方の加速度データの自己相関関数において、曲のテンポに対応する lag と曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に対応する lag に表れるピークの特徴を分析することによってサンバのスキルをテンポとアクセントの両面から検証することができる。

4.2 データの分類

リファレンスデータの解釈をもとに、統計的にデータを処理するために、被験者から計測された加速度データを A,B,C の 3 段階によって分類した。この評価は、自己相関関数の分析により行った。その評価の対象となるポイントは以下である。なお、この評価はインストラクターのデータを基礎に、ビデオに観察による動きの評価と、インストラクターの助言からサンバの正しい動きができているとされた被験者のデータから特徴を抽出したものである。

1. 曲のテンポに対応する lag に自己相関全体のピークがあらわれており、0.6 以上の相関係数である
2. 曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に対応する lag を中心にした山状のピークがあらわれている

3. 1. と 2. の相関係数の差分が 0.3 以上である

ここで、1. が満たされていることは、周期的な運動ができていると見なすことができ、この段階を B とした (図 4.6)。また、B 段階の評価を満たし、かつ 2., 3. の評価を満たしたものは、周期的な運動ができている、かつ動作にアクセントがあらわれているものとして、この段階を A とした (図 4.5)。B 段階にも達していないものを C とした (図 4.7)。

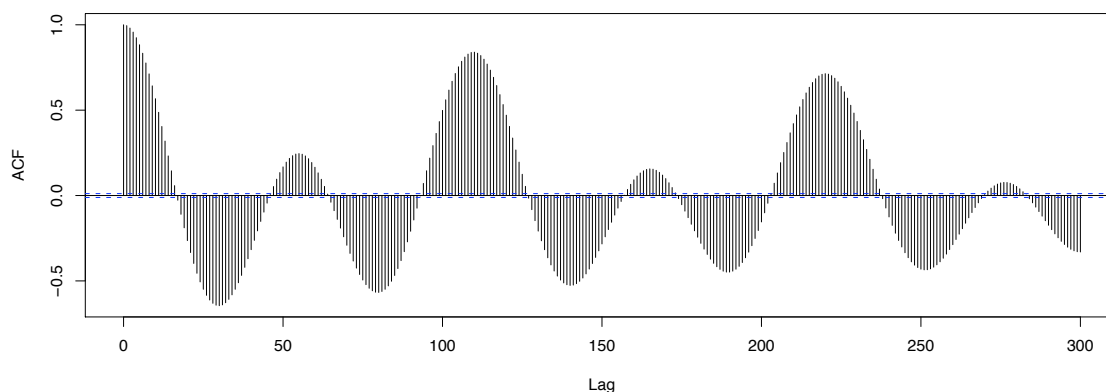


図 4.5: A 段階の例

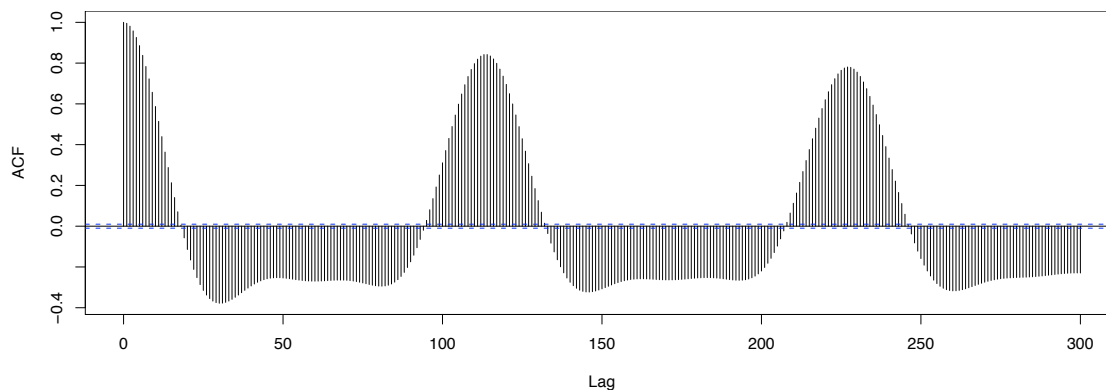


図 4.6: B 段階の例

4.3 テンポ安定性の向上

インストラクターのデータを理想として、他の被験者のデータについて観察を行ったところ、ほとんど全ての被験者からそのテンポ安定性の向上が観察できた。この向上は、分類において C 段階から B 段階への変化として表すことができる。ここでは代表例として 3 人の被験者のデータを示す。

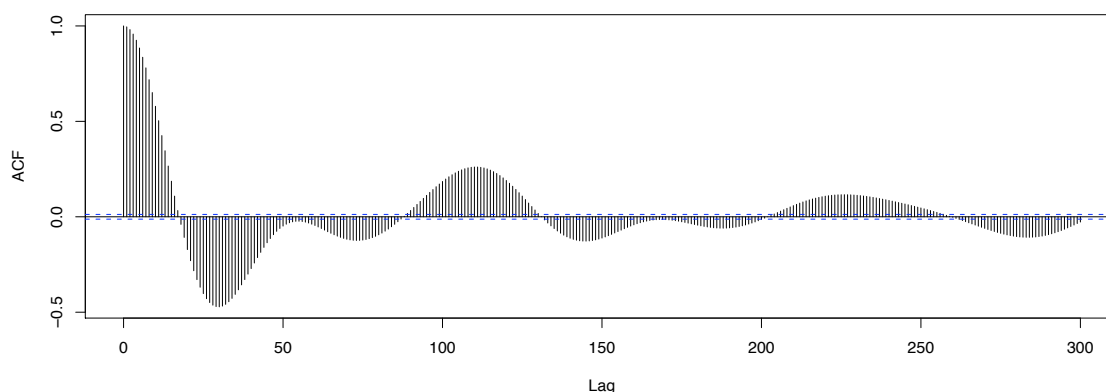


図 4.7: C 段階の例

被験者 A 図 4.8 は、被験者 A が 3 月 30 日に、105.73BPM の曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。ここでは、自己相関関数において、曲のテンポに対応する 113lag 付近に相関のピークがあるものの、その相関係数は大きくなく、周期的な運動がなされているとは言い難い。波形データの観察からも、安定した周期運動がなされていないことがわかる。図 4.9 は、同じ被験者 A から 2 ヶ月後 (5 月 25 日) に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応する lag にピークが出ており、周期的な上下運動がなされていることがわかる。

被験者 B 同様に、図 4.10 は、被験者 B が 4 月 6 日に、105.73BPM の曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。ここでは、自己相関関数において、定まったピークが観測されておらず、周期的な運動がなされていないことがわかる。これは、波形データの観察においても同様で、時間的一貫性が見られず、その周期性を観測できない。しかし、この被験者 B においても、初回の観測から約一ヶ月後の 5 月 11 日のデータである図 4.11 では、曲に対応する lag にピークが観測されており、周期性のある運動がなされていることが観測された。これは、波形データからもおよそ 120 の幅で、谷のような波が現れていることから見て取れる。

被験者 C 被験者 C においてもこの傾向は同様で、4 月 6 日のデータである図 4.12 からは、周期的な運動を観測できないが、およそ 2 ヶ月後の 5 月 25 日には、図 4.13 から非常に周期的に運動がなされていることが観測できる。

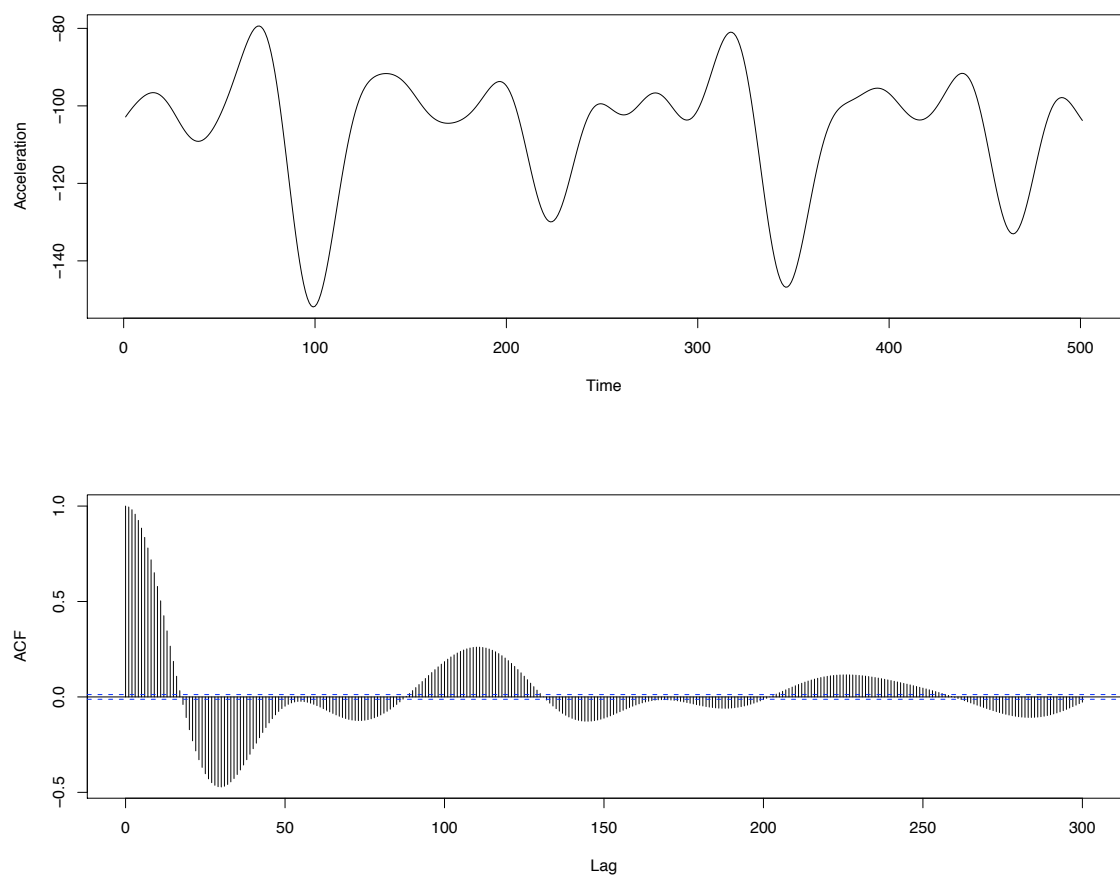


図 4.8: 被験者 A の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)

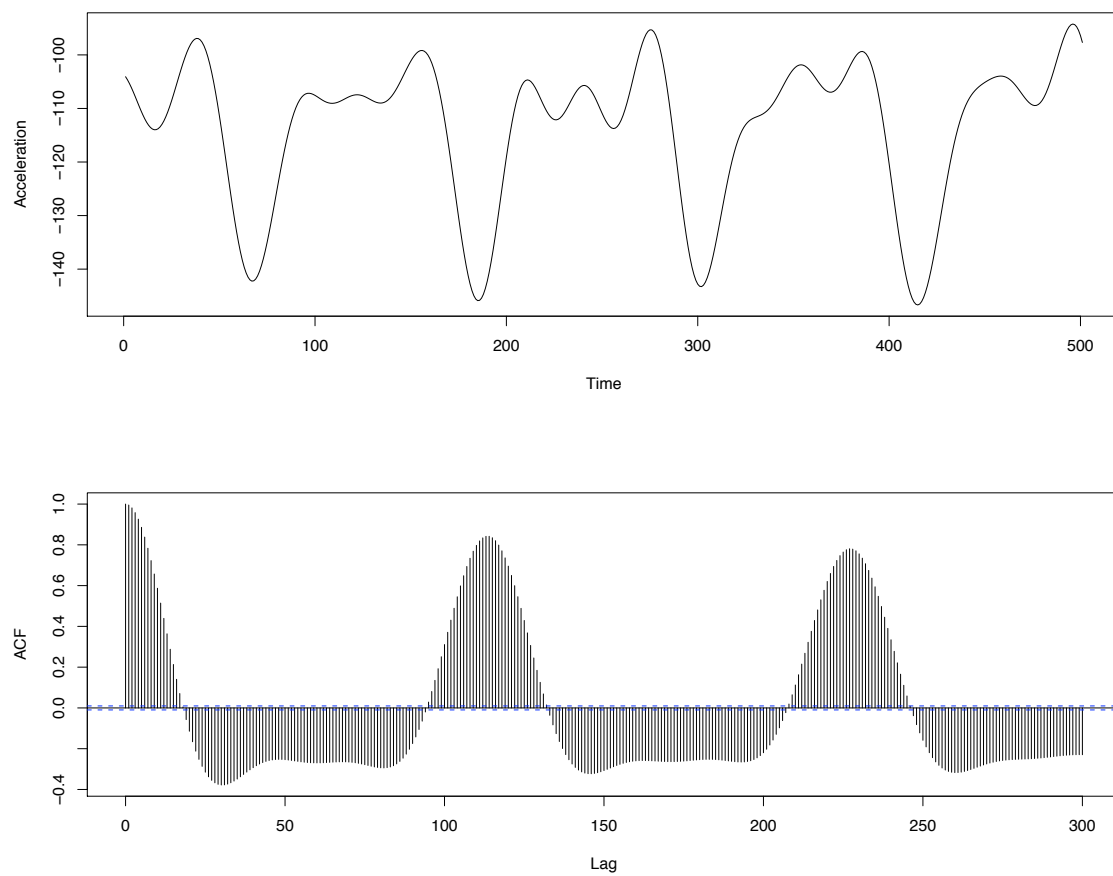


図 4.9: 被験者 A の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/25)

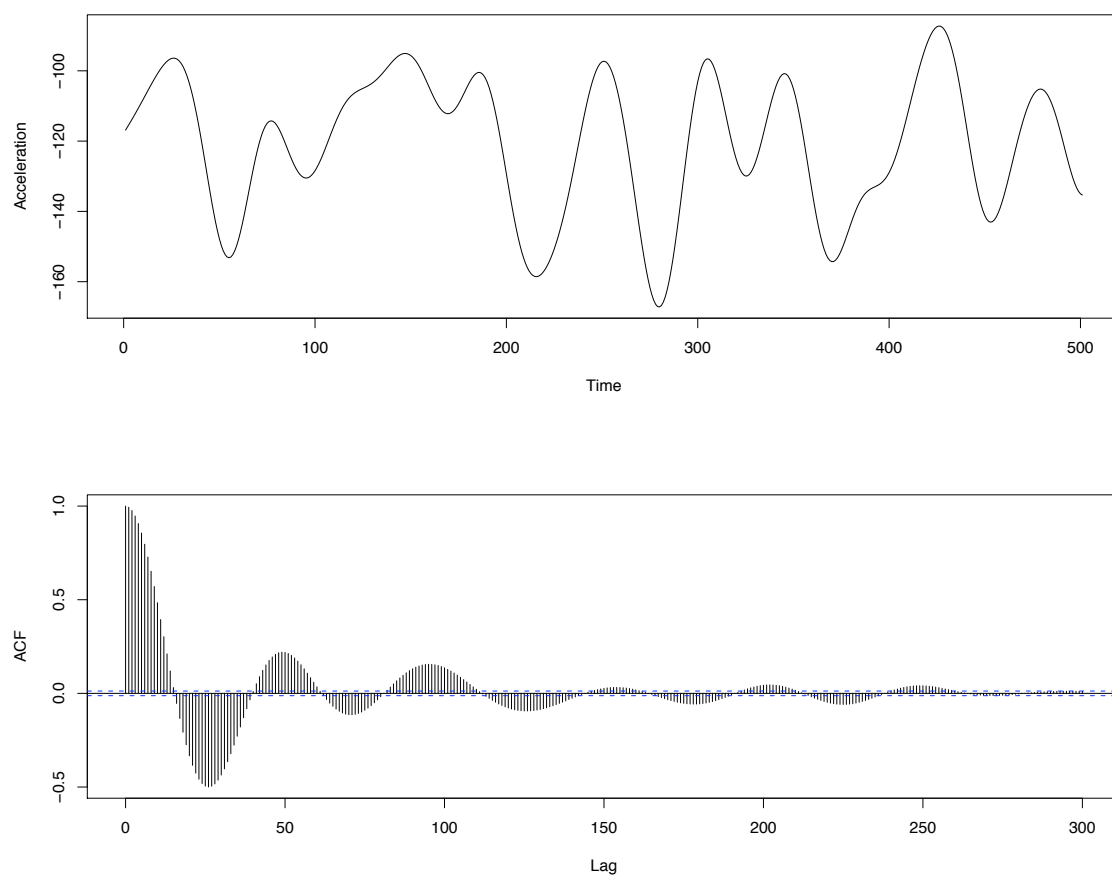


図 4.10: 被験者 B の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)

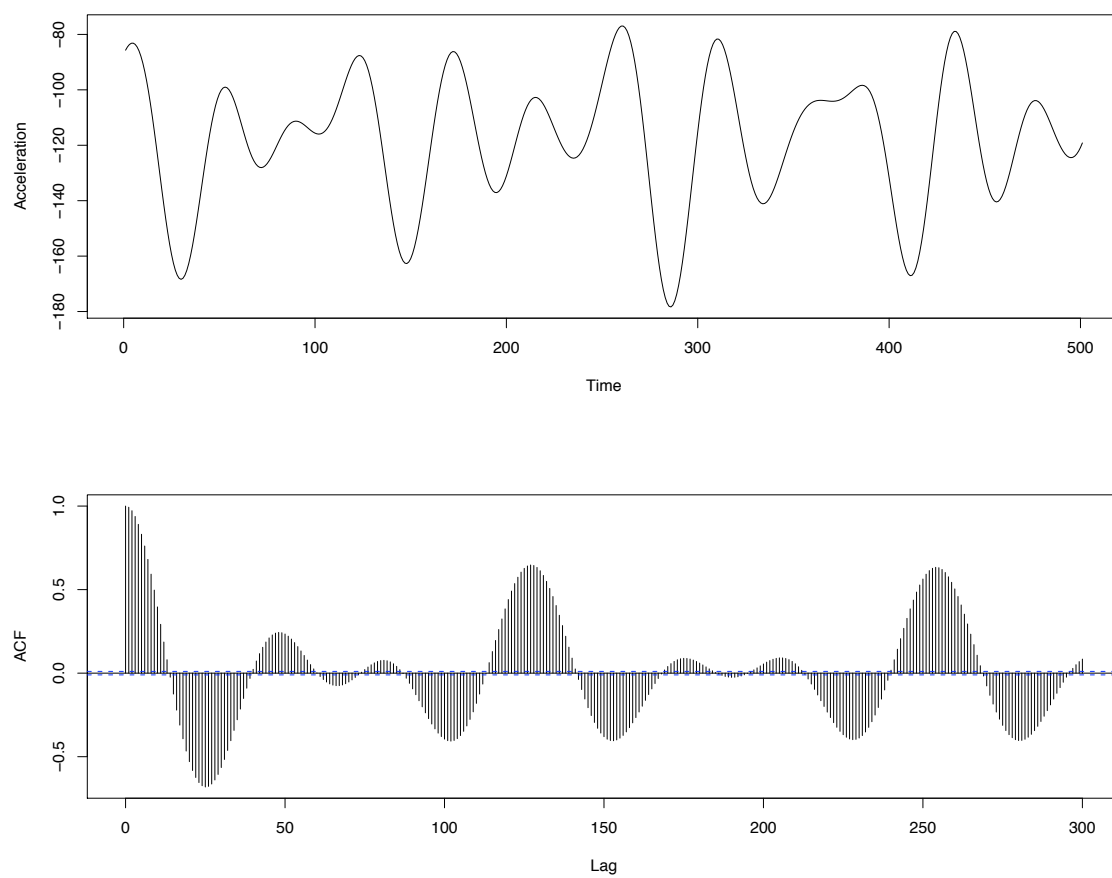


図 4.11: 被験者 B の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/11)

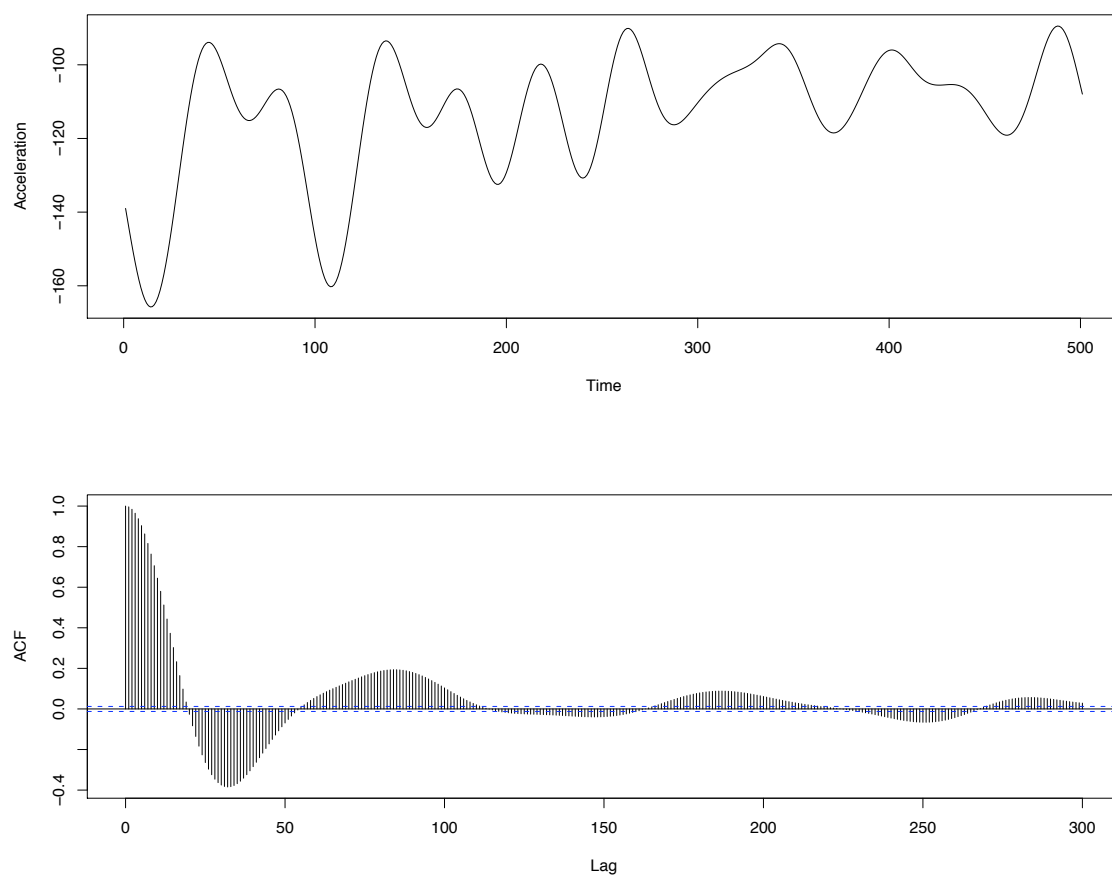


図 4.12: 被験者 C の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)

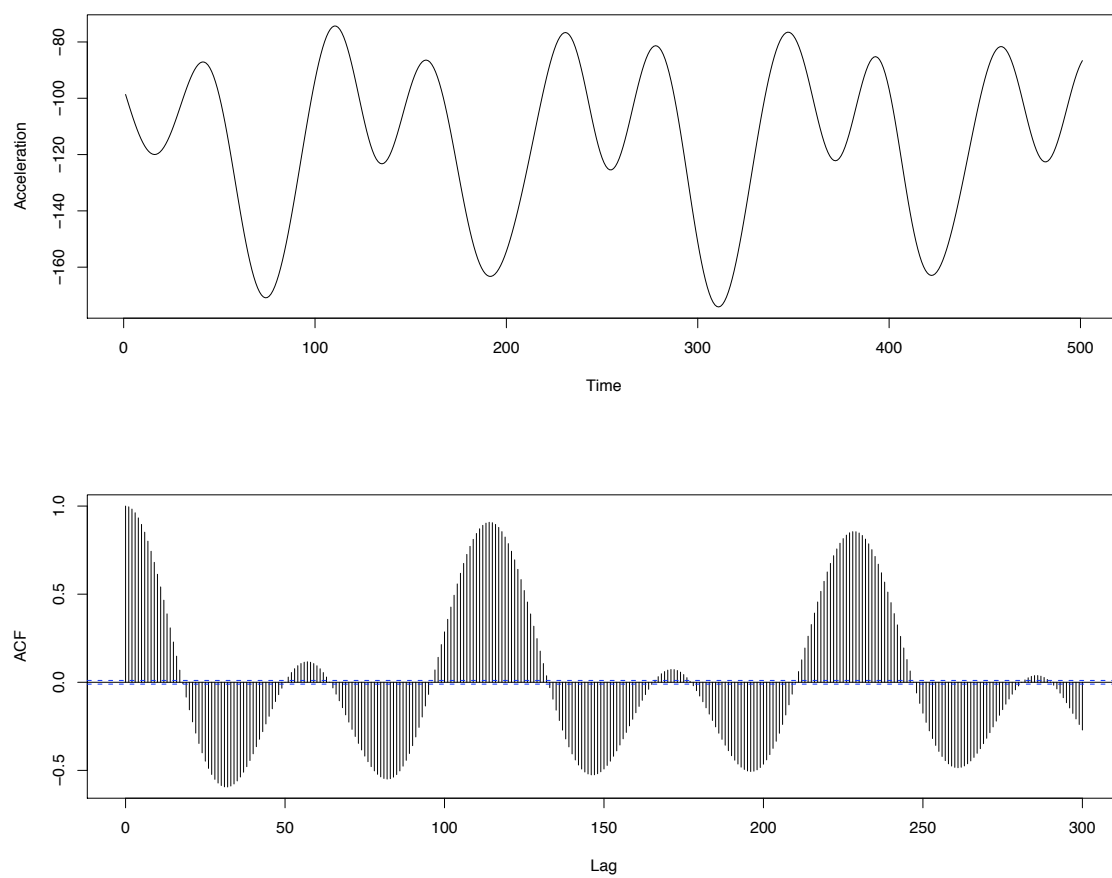


図 4.13: 被験者 C の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (5/25)

4.3.1 異なるテンポに対するテンポ安定性

これまでに挙げた例では、何れのデータもテンポは本研究において基準曲とした105BPMのものであった。ここでは、テンポの安定性を習得できたある1名の被験者が異なるテンポの曲に対しても同様のテンポ安定性が確認できたことを示す。

図4.14は、練習を始めて約2ヶ月経過し、テンポの安定性を習得したある被験者が100BPMの曲にあわせて踊った際に体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部(5秒弱)と、自己相関関数である。ここで、曲のテンポと対応する120lagにピークが観測できることから、この曲にあわせた周期的な運動がなされていることがわかる。

同様に、図4.15は、同じ被験者が120BPMの曲にあわせて踊った際に体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部(5秒弱)と、自己相関関数である。ここで、曲のテンポと対応する100lagにピークが観測できることから、この曲にあわせた周期的な運動がなされていることがわかる。

この二つのデータから、曲にあった周期的な運動を行うことができる被験者は、異なるテンポの曲においても、その運動の周期性が損なわれないことが確認された。

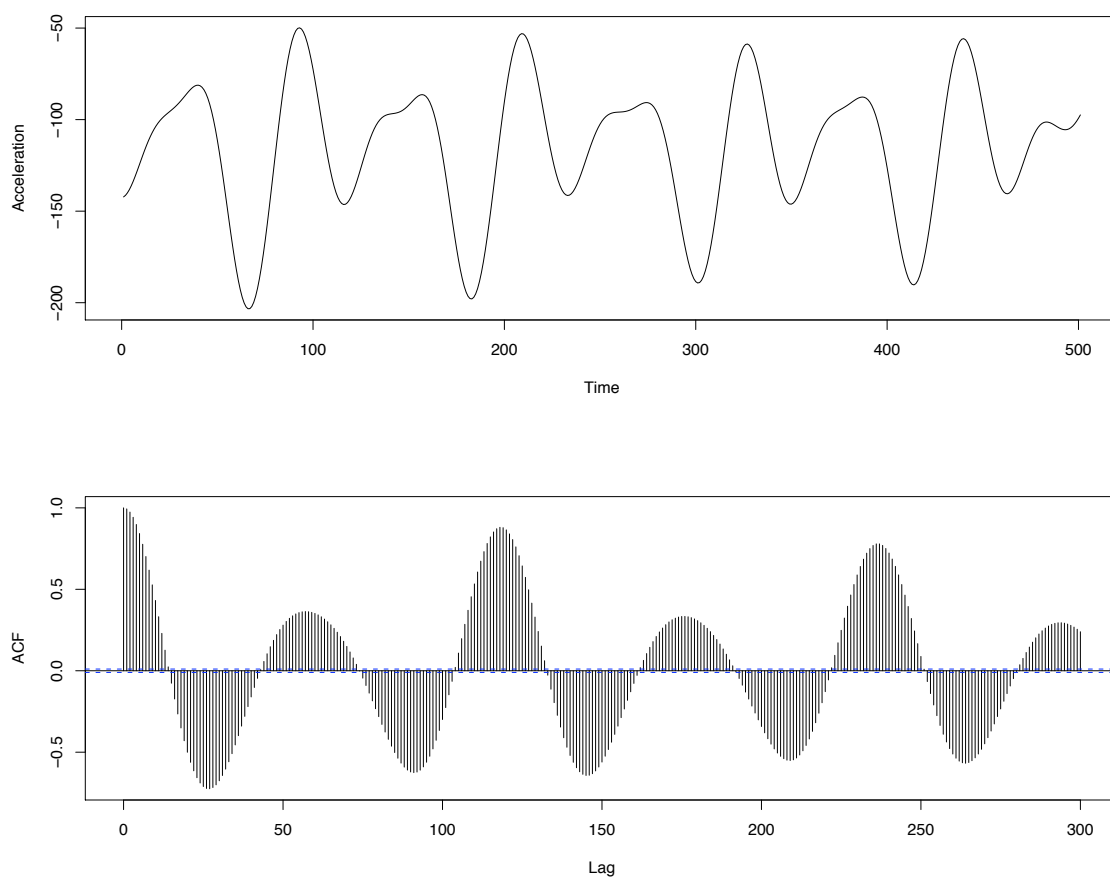


図 4.14: 100BPM の曲におけるテンポ安定性

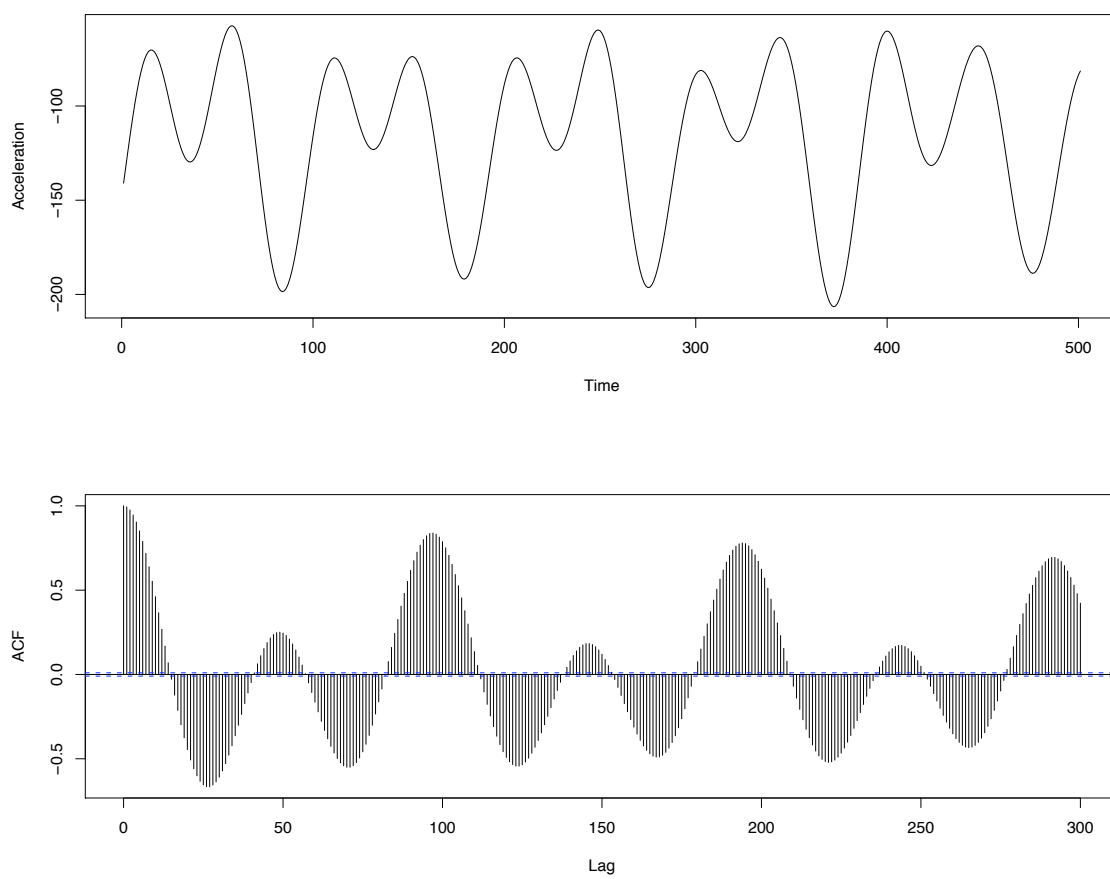


図 4.15: 120BPM の曲におけるテンポ安定性

4.4 アクセント表現の出現

インストラクターのデータを理想として、他の被験者のデータについて観察を行ったところ、自己相関関数の評価から、ほとんど全て被験者からアクセントの表現の出現が観察できた。これは、分類においてのCあるいはB段階からA段階への変化としてみることもできる。ここでは代表例として3人の被験者のデータを示す。

被験者 D 図4.16は、被験者Dが4月27日に、105.73BPMの曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部(5秒弱)と、自己相関関数である。ここでは、自己相関関数において、曲のテンポに対応するlagに相関のピークがあり、曲にあった周期的な運動がなされていることがわかる。しかし、曲の $\frac{1}{2}$ に相当するlagにピークがでておらず、アクセントがあらわれていないと考えられる(B段階)。これは波形データの観察からも言える。比較的規則的に小さな谷が見えるのは、実験のビデオを観察したところ、曲に合わせた強拍を打つための準備のためのカウントをしているためと考えられる。図4.17は、同じ被験者Dから約4ヶ月後(9月7日)に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応するlagにピークが出ており(赤丸)、周期的な上下運動がなされていることがわかる。また、曲の $\frac{1}{2}$ に相当するlagに小さなピークがでており(青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。アクセントという面では、この強拍(赤丸)と弱拍(青丸)の差が重要と考えられるが、その差もおよそ0.6であり、十分な差が表現できていると考えられる(C段階)。これは、加速度波形の観察においても、強拍(赤丸)と弱拍(青丸)の差がきちんと表現できていることがわかる。

被験者 E 同様に、図4.18は、被験者Eが3月30日に、105.73BPMの曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部(5秒弱)と、自己相関関数である。ここでは、自己相関関数において、定まったピークが観測されておらず、周期的な運動がなされていないことがわかる。これは、波形データの観察においても同様で、時間的一貫性が見られず、その周期性を観測できない(C段階)。図4.17は、同じ被験者Eから約4ヶ月後(7月27日)に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応するlagにピークが出ており(赤丸)、周期的な上下運動がなされていることがわかる。また、曲のテンポ $\frac{1}{2}$ に相当するlagに小さなピークがでており(青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。強拍(赤丸)と弱拍(青丸)の差はおよそ0.4であり、十分な差が表現できていると考えられる(A段階)。これは、加速度波形の観察においても、強拍(赤丸)と弱拍(青丸)の差がきちんと表現できていることがわかる。

被験者 F 図4.20は、被験者Dが6月22日に、105.73BPMの曲に合わせて踊ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動の波形データの一部(5秒弱)と、自己相関関数である。ここでは、自己相関関数において、曲のテンポに対応するlagに相関のピークがあり、曲にあった周期的な運動がなされていることがわかる。しかし、曲の

テンポ $\frac{1}{2}$ に相当する lag にピークがでておらず、アクセントがあらわれていないと考えられる (B 段階)。これは波形データの観察からも言える。実験のビデオを観察したところ、強拍の間にギザギザとした波形とが見えるのは、曲に合わせた強拍を打つために待ち動作をしているものと考えられる。図 4.21 は、同じ被験者 D から約 3 ヶ月後 (9 月 13 日) に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応する lag にピークが出ており (赤丸)、周期的な上下運動がなされていることがわかる。また、曲のテンポ $\frac{1}{2}$ に相当する lag に小さなピークがでており (青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差はおよそ 0.65 であり A 段階に相当する。加速度波形の観察においても、強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差がきちんと表現できていることがわかる。

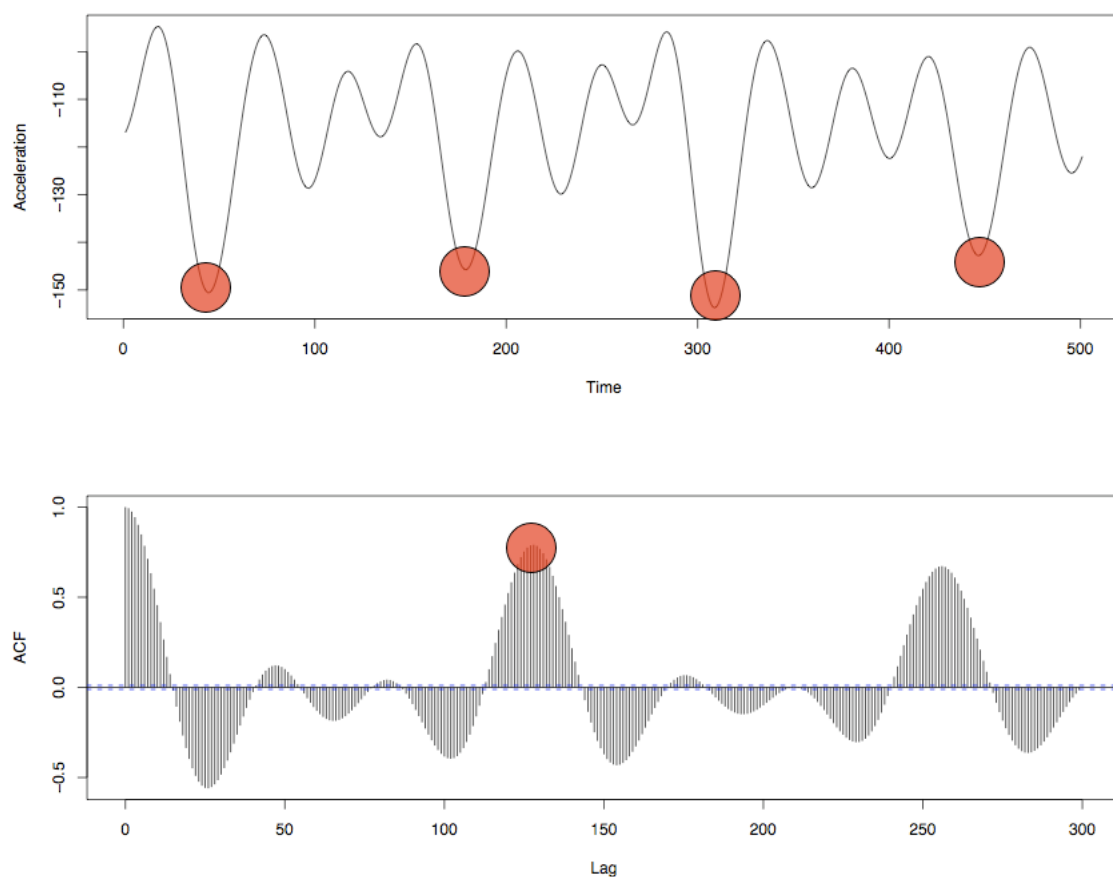


図 4.16: 被験者 D の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (4/27)

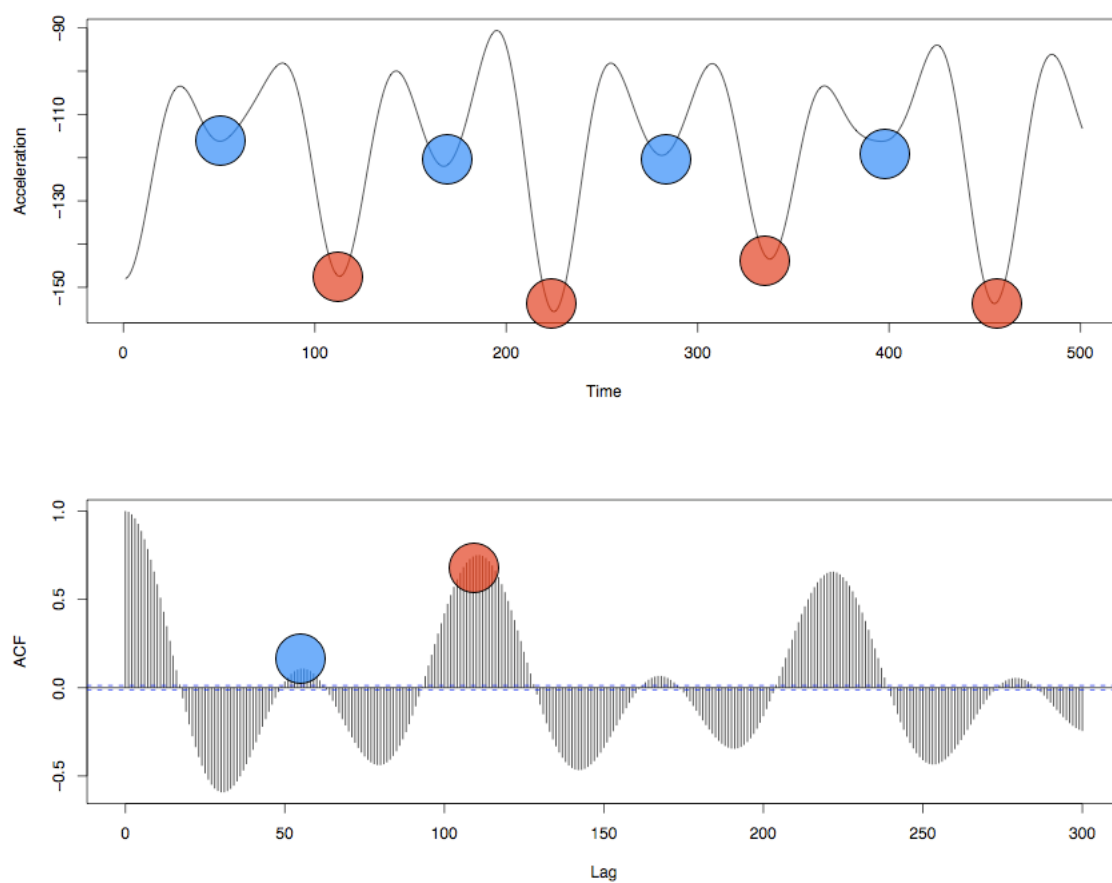


図 4.17: 被験者 D の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (9/7)

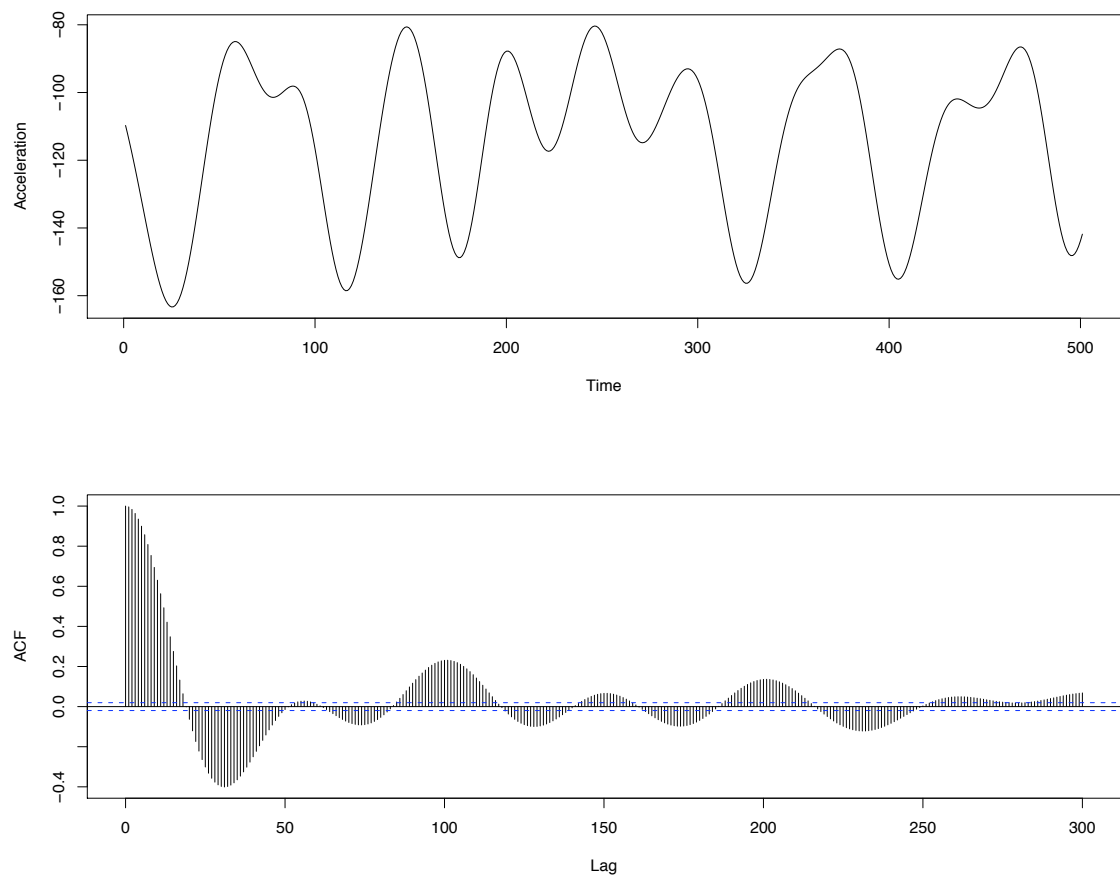


図 4.18: 被験者 E の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)

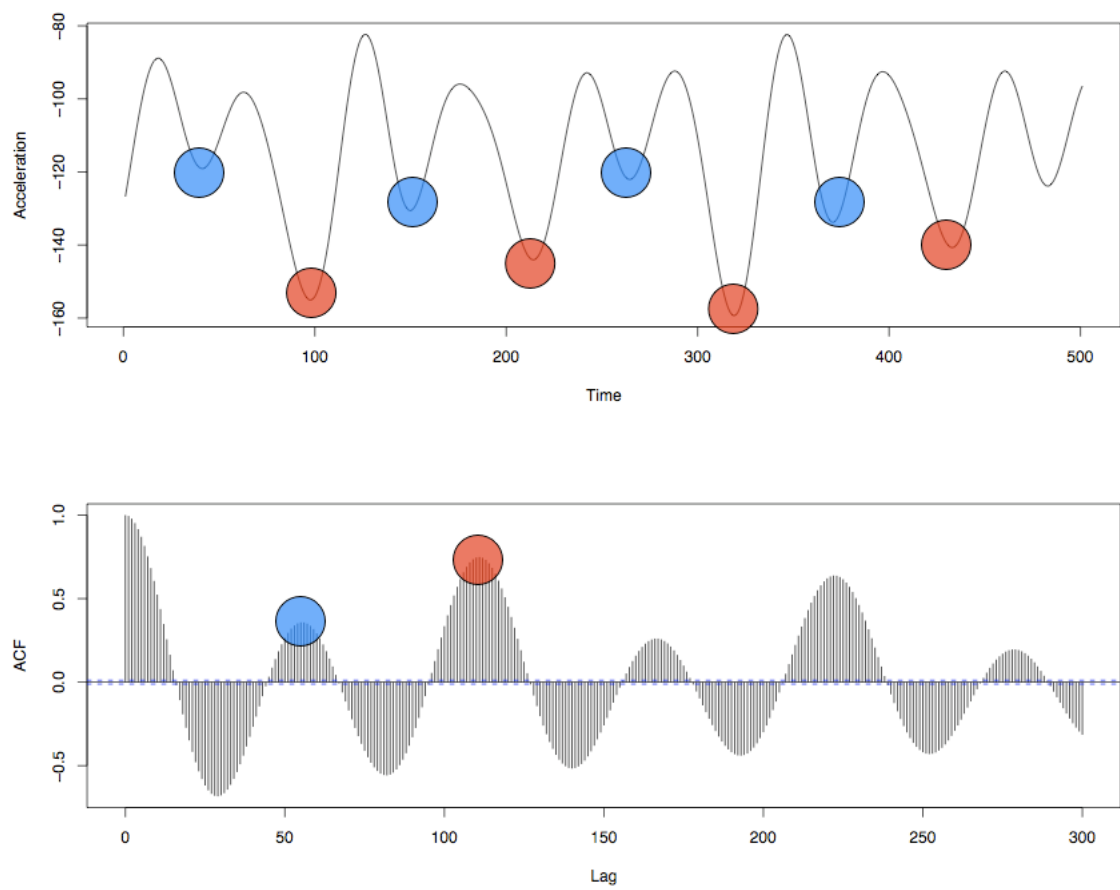


図 4.19: 被験者 E の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (7/27)

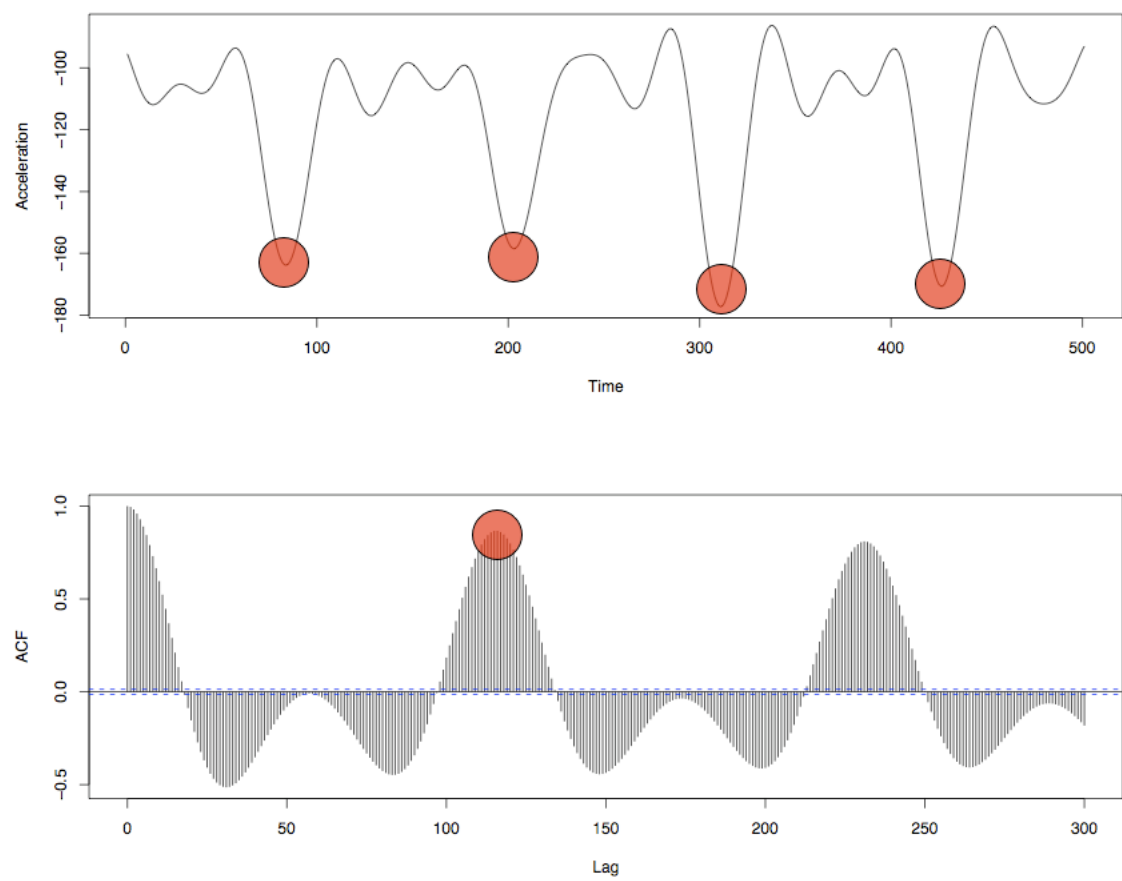


図 4.20: 被験者 F の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (6/22)

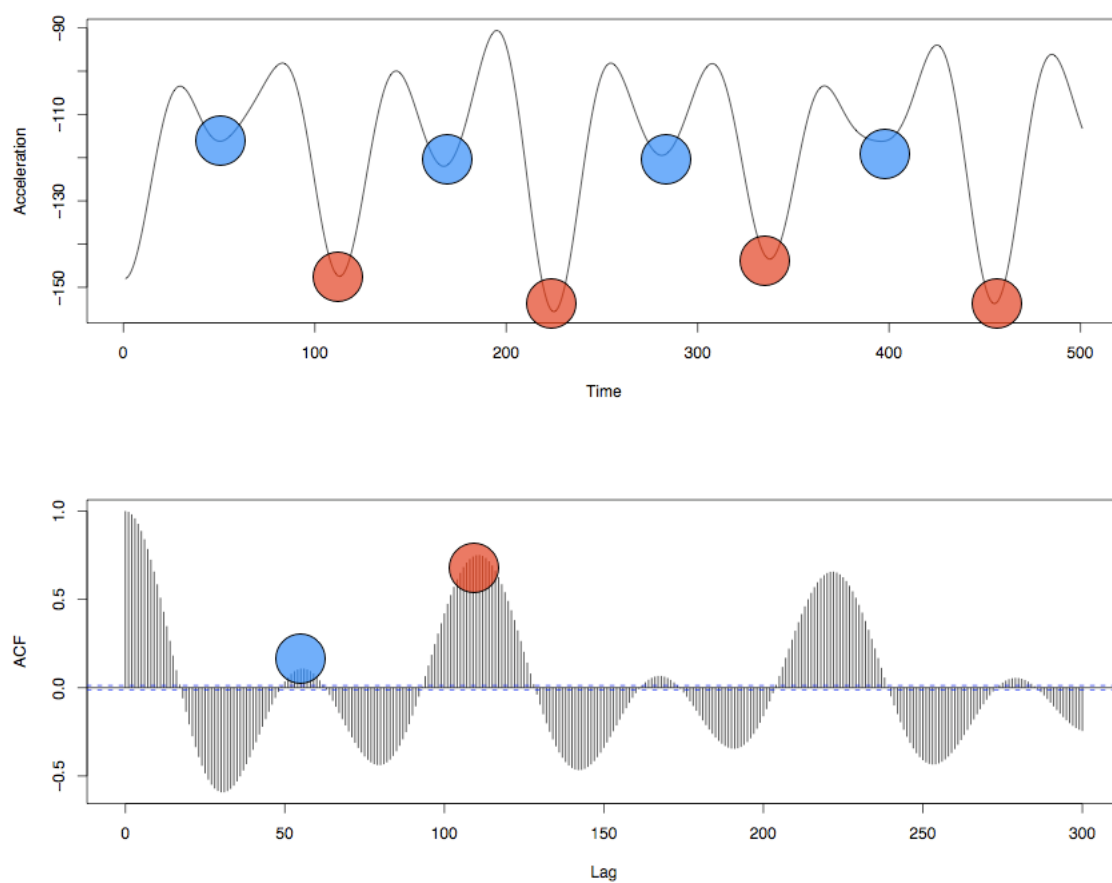


図 4.21: 被験者 F の体幹部上下運動の加速度とその自己相関関数 (9/13)

4.5 ダンスとシェイカー演奏の関係

このセクションでは、ダンスとシェイカー演奏の運動計測結果を独立に扱うのではなく、複合運動としての関係について探る。

被験者 G 図 4.22 は、被験者 G が 3 月 30 日に、105.73BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。このデータにおいて、シェイカー演奏をしている手首の前後動に、図中の赤色の丸で示されるように、100lag 付近にピークがでていることがわかる。しかし、この lag は曲のテンポに対応せず、ただ周期的に適当にシェイカーを振っているだけではないかと考えられる (C 段階)。ビデオ観察においても、被験者 G のシェイカー演奏は曲にあったものではなかった。また、アクセントに対応する、曲のテンポに対応する lag の $\frac{1}{2}$ にあたる lag にピークが観察できない。

図 4.23 は、同じ被験者 G から約 2ヶ月後 (6 月 8 日) に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応する 113lag 付近にピークが出ており (赤丸)、周期的なシェイカー演奏がなされていることがわかる。また、曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に相当する 57lag 付近にも小さなピークがでており (青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差はおよそ 0.6 であり、アクセントの表現ができていた A 段階と判断できる。加速度波形の観察においても、強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差がきちんと表現できていることがわかる。

被験者 H 図 4.24 は、被験者 H が 3 月 30 日に、105.73BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。このデータにおいて、シェイカー演奏をしている手首の前後動には定まったピークが得られていないことがわかる (C 段階)。加速度波形の観察においても同様で、規則的な前後運動がなされていないことがわかる。

図 4.25 は、同じ被験者 H が約 3ヶ月後 (6 月 15 日) に 120BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。ここでは、曲のピークに対応する 100lag 付近にピークが出ており (赤丸)、周期的なシェイカー演奏がなされていることがわかる。また、曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に相当する 50lag 付近にも小さなピークがでており (青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差はおよそ 0.5 とアクセントの表現がされていた (A 段階)。加速度波形の観察においても、強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差がきちんと表現できていることがわかる。

被験者 I 図 4.26 は、被験者 I が 4 月 6 日に、105.73BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の波形データの一部 (5 秒弱) と、自己相関関数である。このデータにおいて、シェイカー演奏をしている手首の前後動について曲のテンポに対応する 113lag とその $\frac{1}{2}$ に相当する 57lag 付近に 0.5 に近

い相関係数が見られ、57lag のほうが高い相関を示していることがわかる。これは、強拍と弱拍の差をなくシェイカー演奏を行ったためにみられたと考えられる (B 段階)。ビデオによってこの演奏を観察すると、実際にアクセント無くダダダダダダダとシェイカーを前後させている様子が見られた。これは、加速度波形の観察においても同様で、アクセント無く前後動を繰り返しているような波形が観察できる。

図 4.27 は、同じ被験者 I から約 6 ヶ月後 (10 月 25 日) に計測したデータである。ここでは、曲のピークに対応する 113lag 付近にピークが出ており (赤丸)、周期的なシェイカー演奏がなされていることがわかる。また、曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に相当する 57lag 付近にも小さなピークがでており (青丸)、弱拍の表現がなされているものと考えられる。強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差はおよそ 0.5 と十分で、アクセントの表現がされていると言える (A 段階)。加速度波形の観察においても、強拍 (赤丸) と弱拍 (青丸) の差がきちんと表現できていることがわかる。

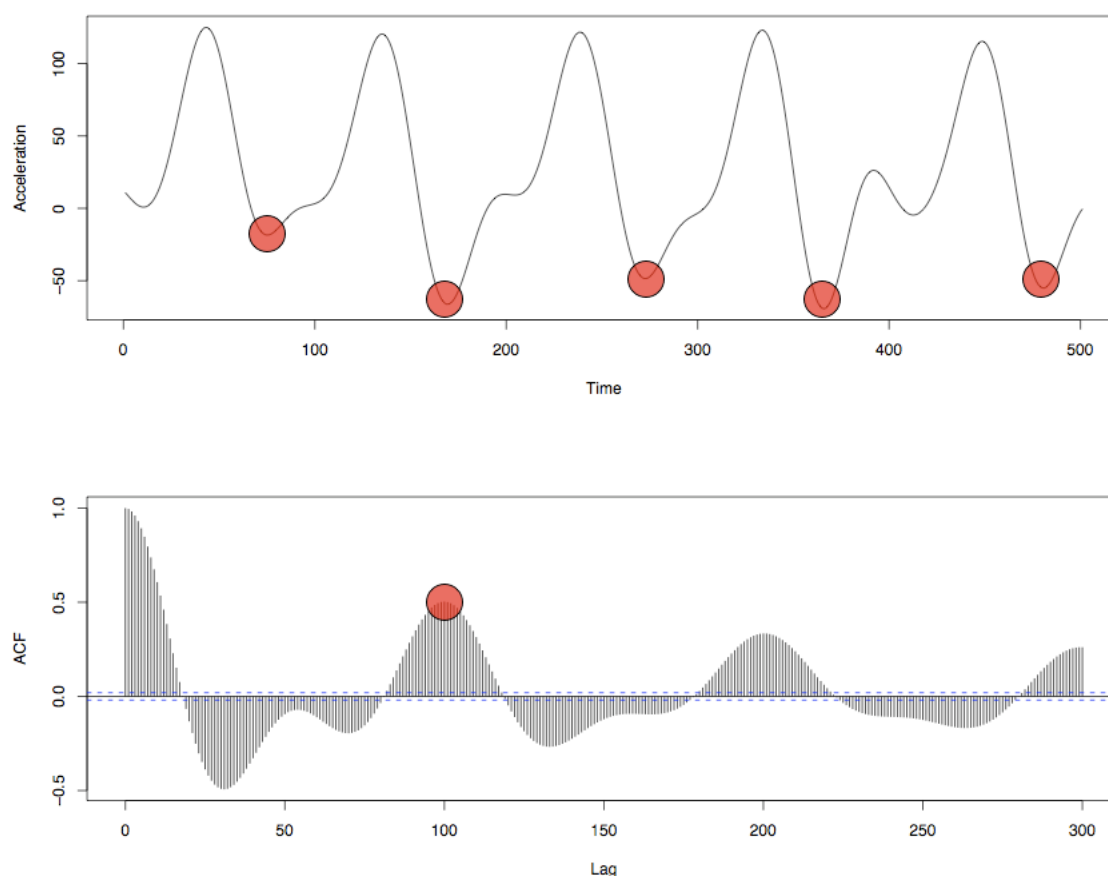


図 4.22: 被験者 G の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)

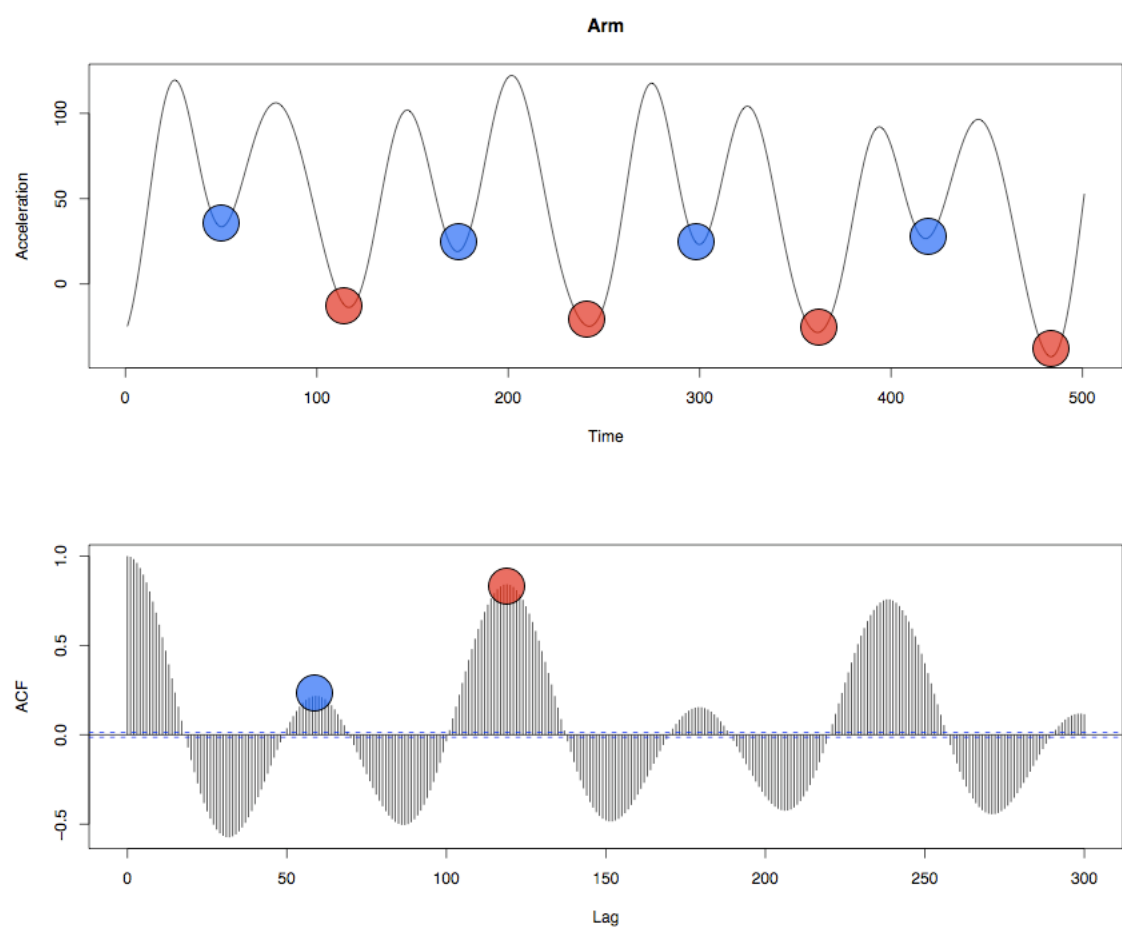


図 4.23: 被験者 G の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (6/8)

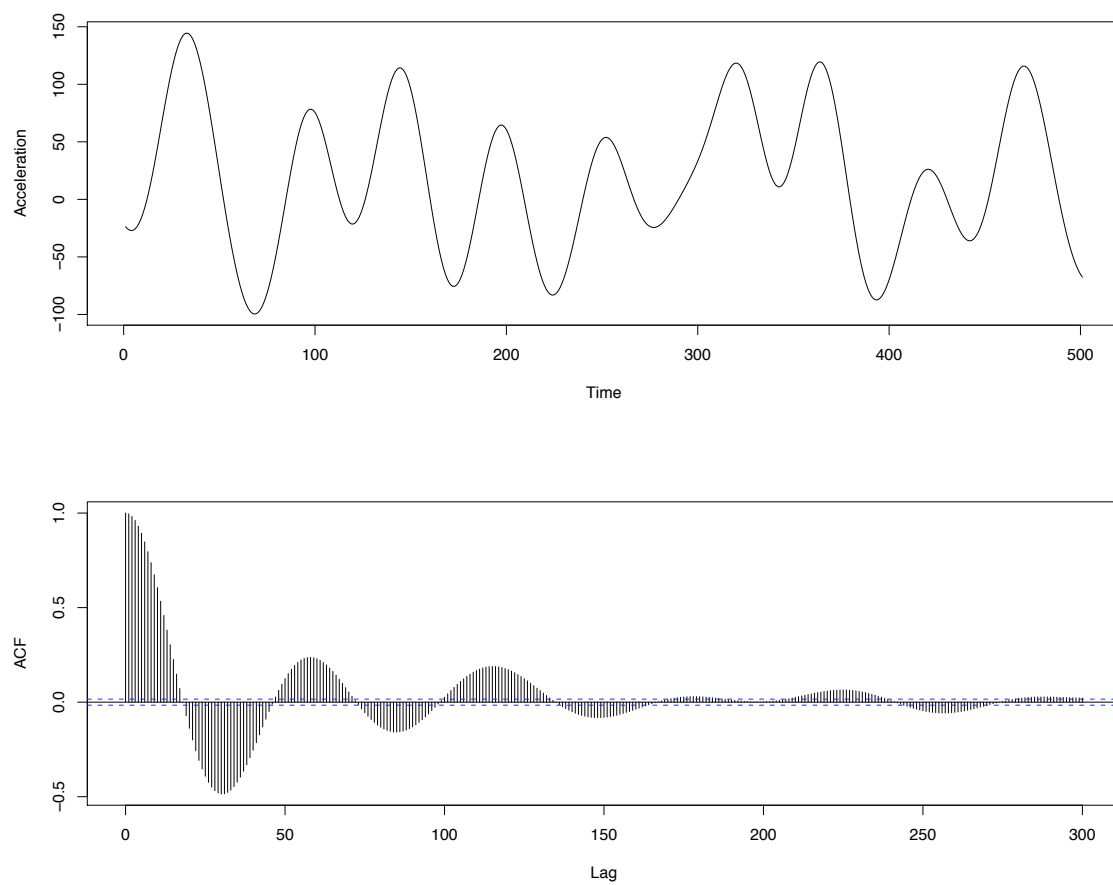


図 4.24: 被験者 H の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (3/30)

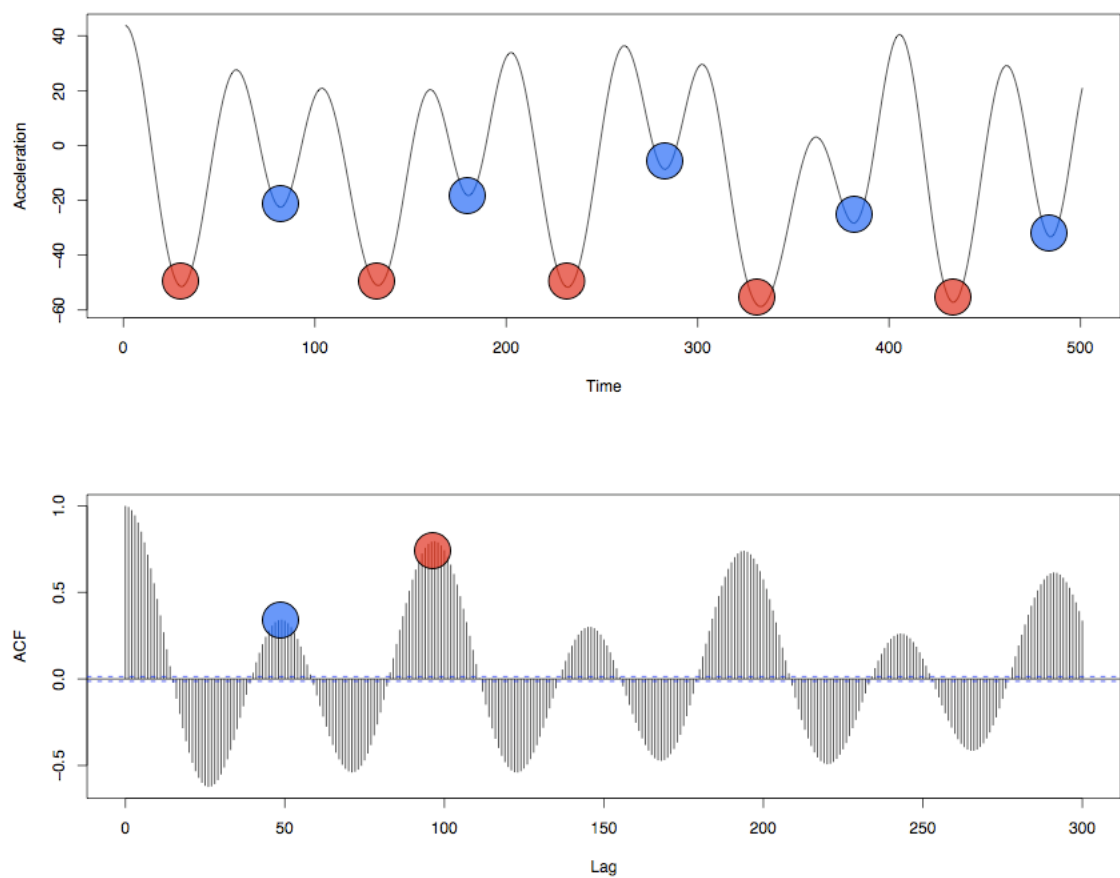


図 4.25: 被験者 H の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (6/15)

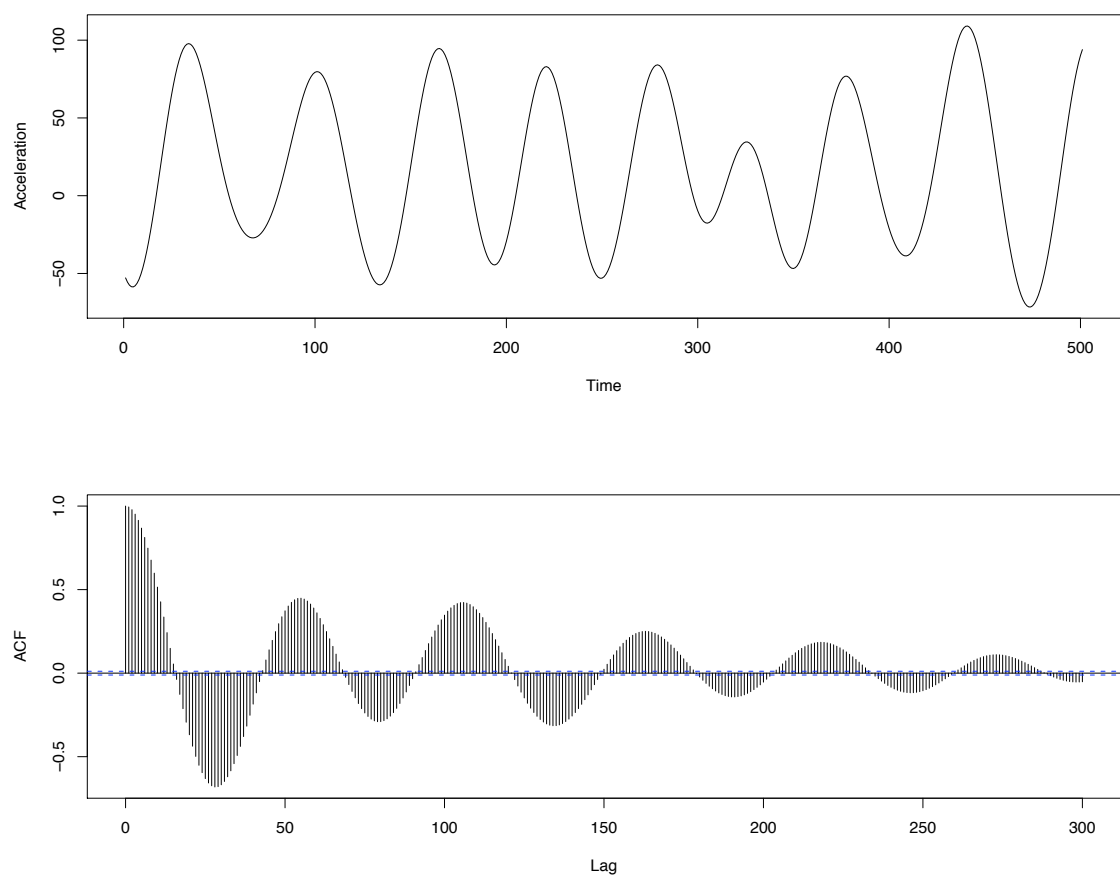


図 4.26: 被験者 I の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (4/6)

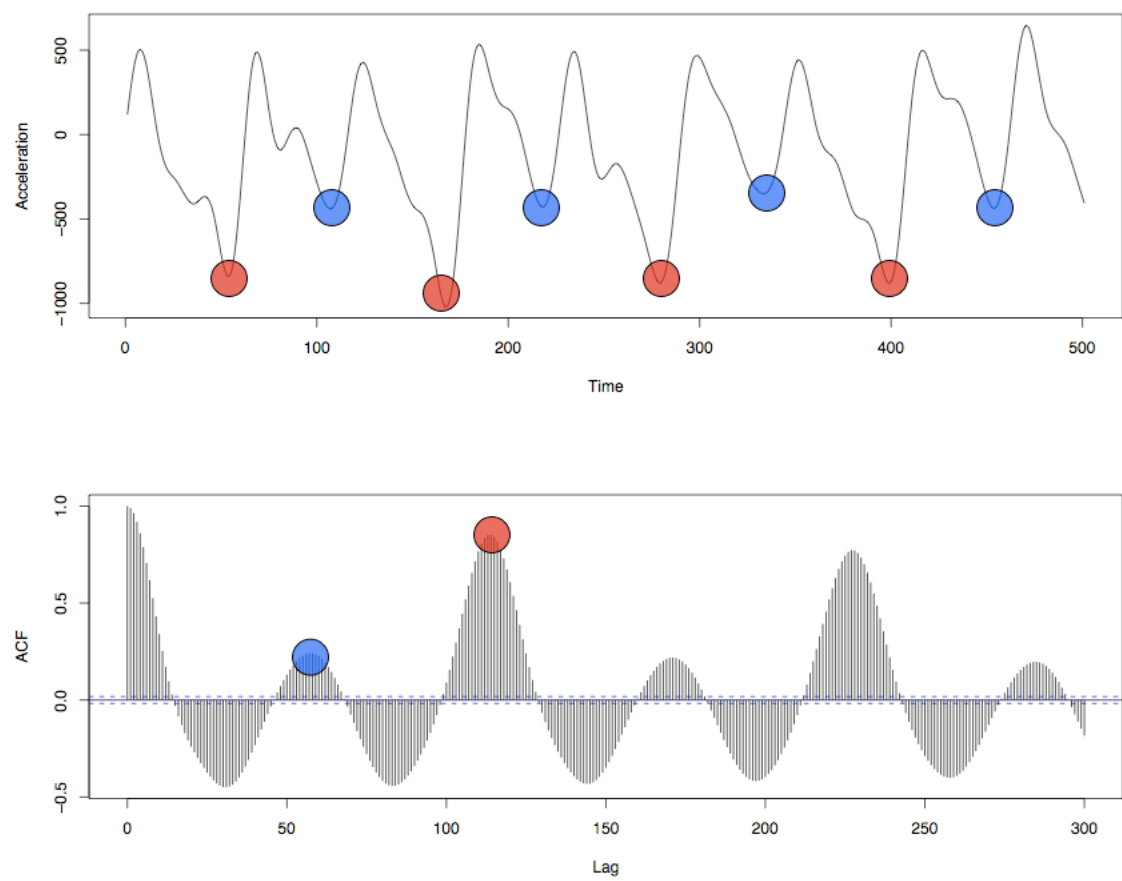


図 4.27: 被験者 I の手首部前後運動の加速度とその自己相関関数 (10/25)

4.5.1 テンポ安定性の獲得及び、アクセント表現の推移

ここまで、複数の被験者のデータを示すことで、被験者についてアクセントの表現能力が獲得できたことがわかったが、その能力というものはどのようにして獲得されるのだろうか。運動データが適正な間隔で計測でき、シェイカー演奏においてアクセントの表現がみられた、ある1名の被験者に注目して、どのように運動が変化してきたのかを考察する。

図 4.28 は、被験者 J が 3 月 30 日に、105.73BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動と、手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の加速度データにおける自己相関関数である。このデータにおいて、体幹部の前後運動及び、シェイカー演奏をしている手首の前後動には定まったピークが得られていないことがわかる。この段階では、定まったダンス・シェイカー演奏がなされていないと言える。分類においては、ダンス・シェイカー演奏の両者とも C 段階と分類できる

同様に、図 4.29 は、被験者 J が 5 月 11 日に、90BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動と、手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の加速度データにおける自己相関関数である。ここでは、図 4.29 の上図、体幹部の上下運動において、曲のピークに対応する 133lag 付近にピークが出ており（赤丸）、周期的な運動がなされていることがわかる (B 段階)。図 4.29 下図は、シェイカー演奏、手首部の前後運動の加速度データの自己相関関数であるが、ここでは、曲のテンポの $\frac{1}{2}$ に相当する 67lag 付近に大きなピークがでており、曲のテンポの $\frac{1}{2}$ 周期で、周期的な運動がなされたと解釈できる (B 段階)。これは、強拍と弱拍の差をつけることなくシェイカー振ってしまうことで現れる。つまり、この段階では、周期的な運動はできているものの、アクセントの表現までいたっていないレベルにあることが言える (両者とも B 段階)。

図 4.29 は、被験者 J が 6 月 15 日に、105.73BPM の曲に合わせてシェイカー演奏を行ったときに体幹部に装着した加速度センサからとられた上下運動と、手首部に装着した加速度センサからとられた前後運動の加速度データにおける自己相関関数である。ここで、体幹部の上下動にもシェイカー演奏をしている手首の前後動にも、図中の赤色の丸で示されるように、曲のテンポに対応する 113lag 付近にピークがでていることから、曲のテンポに対応した周期的な運動がなされていることがわかる。また、アクセントにおいて重要と考えられる、図中で青色の丸で示される曲のテンポに対応する lag の $\frac{1}{2}$ にあたる 57lag 付近に観測できる小さなピークも、体幹の上下動と手首部の前後動の双方の自己相関関数にて観察され、弱拍の表現がなされているものと考えられる。この段階では、ダンスにおける体幹部の上下動のアクセントの表現、シェイカー演奏における手首部の前後動のアクセントの表現の双方がなされている (両者とも A 段階)。

この約 3ヶ月間における 1 被験者の観察結果は、ダンスにおける体幹部の上下動とシェイカー演奏における手首部の前後動のスキルに何らかの関係がある可能性を示唆している。

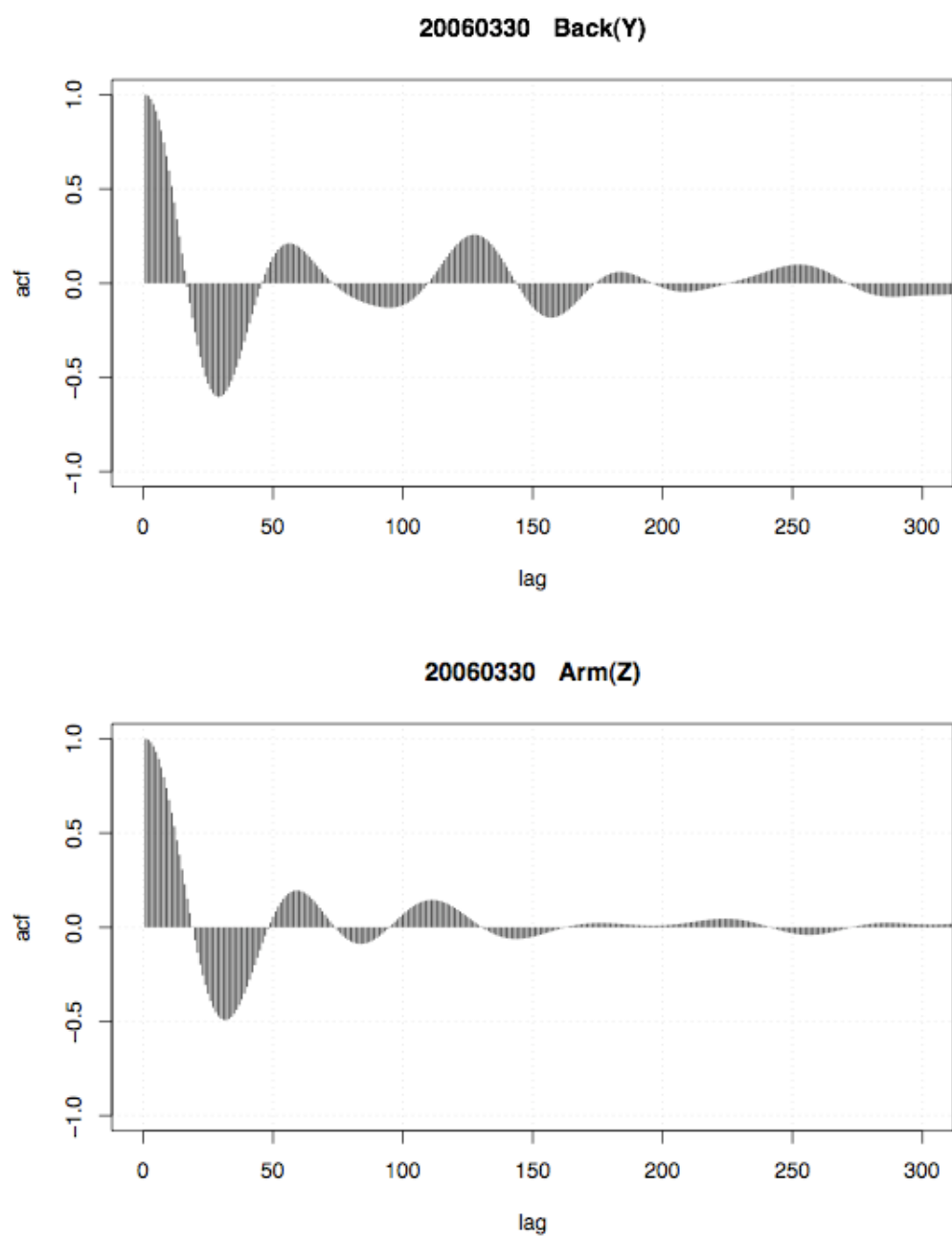


図 4.28: 被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関数 (3/30)

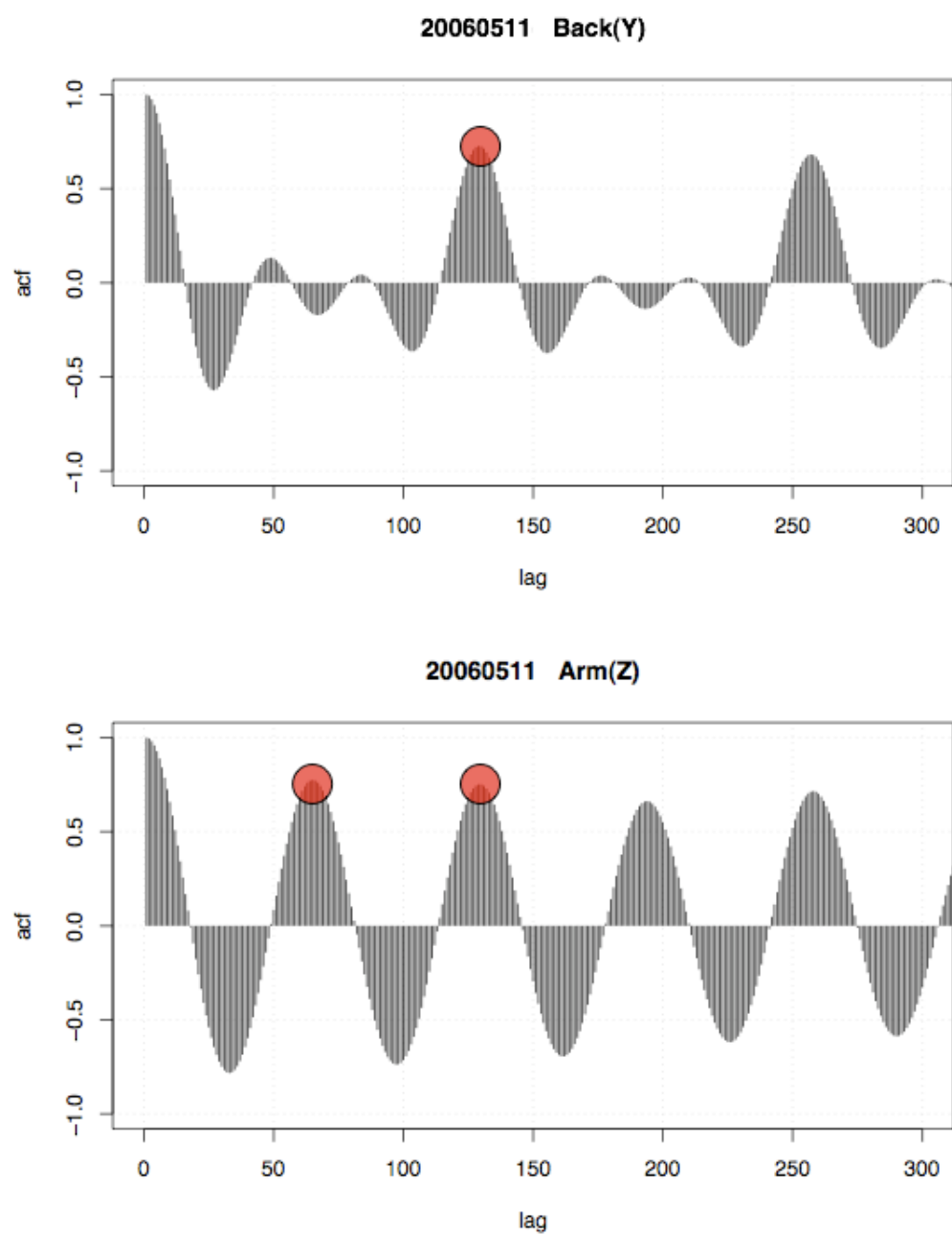


図 4.29: 被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関数 (5/11)

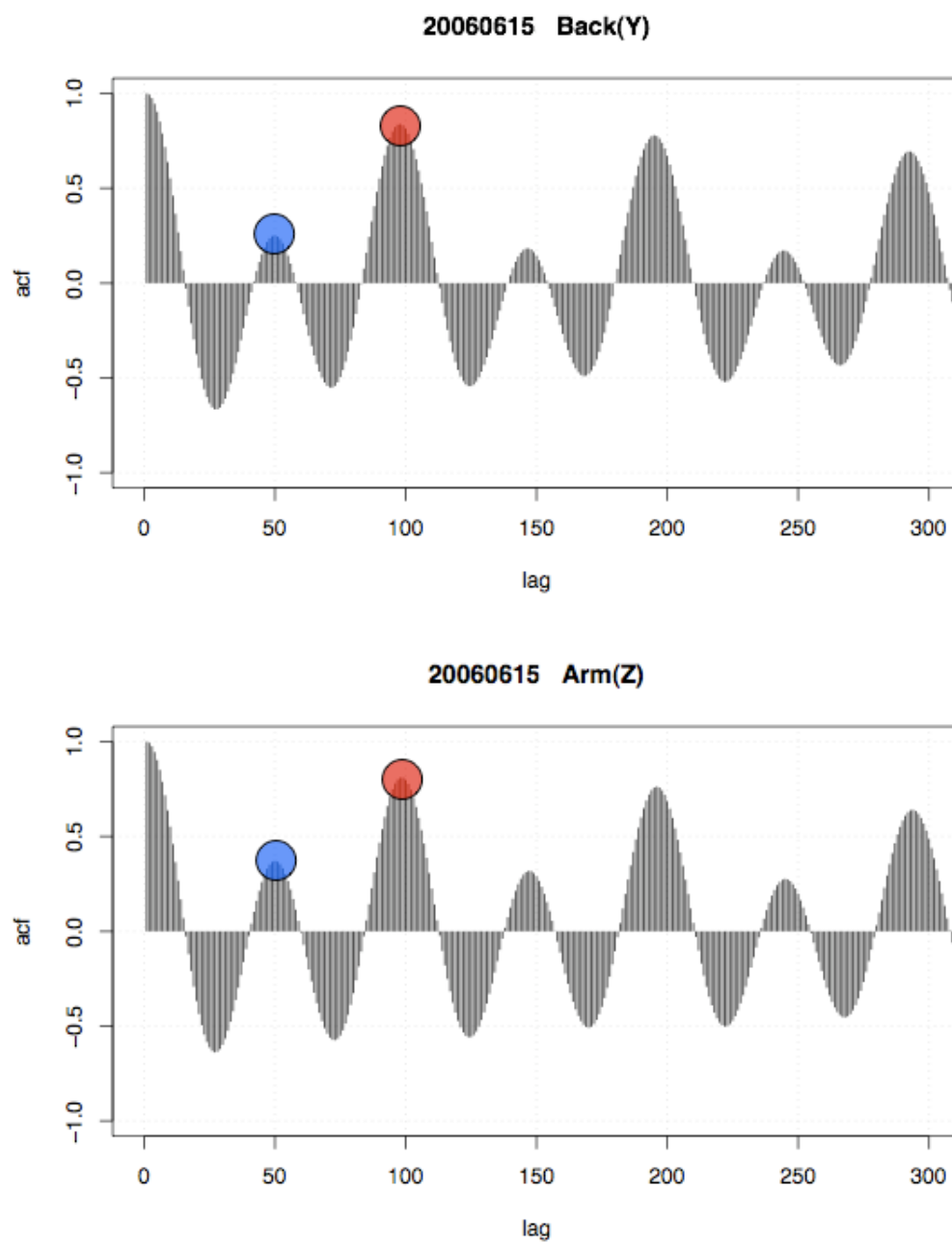


図 4.30: 被験者 J の体幹部上下運動と手首部前後運動の加速度における自己相関関数 (6/15)

4.5.2 ダンスの習熟とシェイカー演奏の習熟の関係性

体幹部と手首の加速度データに対して一つの方法で機械的に分類を行いレベル評価を行うことで、その関係性を考察できる。ここでは、ダンスの習熟とシェイカー演奏の習熟について、体幹部と手首部の加速度を同時に計測できた 51 試行に対して分類を行い、その関連性の考察を行う。

表 4.2 は、51 試行に対して、体幹部はその上下運動の自己相関関数について、手首部はその前後運動の自己相関関数について評価したものである。体幹部とシェイカー演奏における手首部の運動には、体幹部について A,B,C の 3 段階、手首部について A,B,C の 3 段階で、9 つの組み合わせが考えられる。

ここで、各々の試行を、この 9 つの組み合わせについて分類したものが、表 4.3 である。まず、表 4.3 について、シェイカー演奏における、体幹部の運動の評価が、手首部の運動の評価に対して有意に作用しているかどうかを調べる。表 4.4 は、体幹部の運動の評価 A,B,C の 3 群について、その評価が手首部の運動の評価に対して有意に作用するかどうか、Kruskal-wallis (クラスカルウォリス法) 検定を行ったものである。Kruskal-wallis 検定は、これは各被験者の評価を順位に直し、その順位の平均に差があるかどうかを検討するものであり、帰無仮説として「母集団平均が他の水準の平均とは異なる」、対立仮説として「少なくとも 1 つの水準の母集団平均が他の水準の平均とは異なる」をとる。表 4.4 の場合、カイ二乗値 (chi-squared) として 17.5494、自由度 (df) が 2 である。この自由度からカイ二乗分布を想定し、カイ二乗値 17.5494 を当てはめることで、帰無仮説の出現確率が求まる。この出現確率 p は 0.001546 (0.15%) で、有意水準を 1% ととった場合も、この帰無仮説は棄却される。これによりシェイカー演奏における、体幹部の運動の評価が、手首部の運動の評価に対して有意に作用することが言える。

表 4.3 にて赤く塗りつぶした部分は、シェイカー演奏における手首部の評価の段階に対して体幹部の評価の段階が同段階以上である試行数を示している。対して、白い背景の部分は、シェイカー演奏における手首部の評価の段階に対して体幹部の評価の段階が、より下の段階である試行数を示している。これを見ると、体幹部の運動においてリズム習得段階が、手首部の運動に対して先行していることが考えられる。この結果は、手首部の運動習得における体幹部の運動の重要性を示唆しており、仮説とした「リズム運動のスキル獲得のためには体幹部が重要な役割を果たす」ことに関して、サンバリズムにのったシェイカー演奏についてはこの仮説が検証できたと考える。

表 4.2: 自己相関による体幹部および手首部の運動評価

実験日時	体幹部の評価	手首部の評価	実験日時	体幹部の評価	手首部の評価
20060330a	C	C	20060622a	B	B
20060330b	C	C	20060622b	A	B
20060330c	C	B	20060622c	A	B
20060406a	C	C	20060727a	A	C
20060406b	C	C	20060727b	B	B
20060406c	C	C	20060727c	A	B
20060413a	B	C	20060727d	C	C
20060413b	B	C	20061019a	A	A
20060413c	C	C	20061025a	A	B
20060420a	A	C	20061025b	A	A
20060420b	A	C	20061025c	A	A
20060420c	A	C	20061101a	A	B
20060427a	B	C	20061101b	A	B
20060427c	C	C	20061101c	A	B
20060511a	C	C	20061101d	B	B
20060511b	C	C	20061101e	A	A
20060511c	C	C	20061207a	A	B
20060525a	B	B	20061213a	A	B
20060525b	A	B	20061213b	A	B
20060608a	A	A	20061213c	A	B
20060608b	C	C	20061213d	C	A
20060608c	C	C	20061213e	B	B
20060615a	A	A	20061213f	B	B
20060615b	A	B	20061213g	A	B
20060615c	A	A	20061213h	A	B
20060615d	A	A			

表 4.3: 体幹部及び手首部の運動評価における組み合わせ分類

体幹部の評価	手首部の評価		
	A	B	C
A	8	15	4
B	0	6	3
C	1	1	13

表 4.4: 体幹部の段階について Kruskal-Wallis 検定を行った結果

Kruskal-Wallis	
chi-squared	17.5494
df	2
p-value	0.0001546

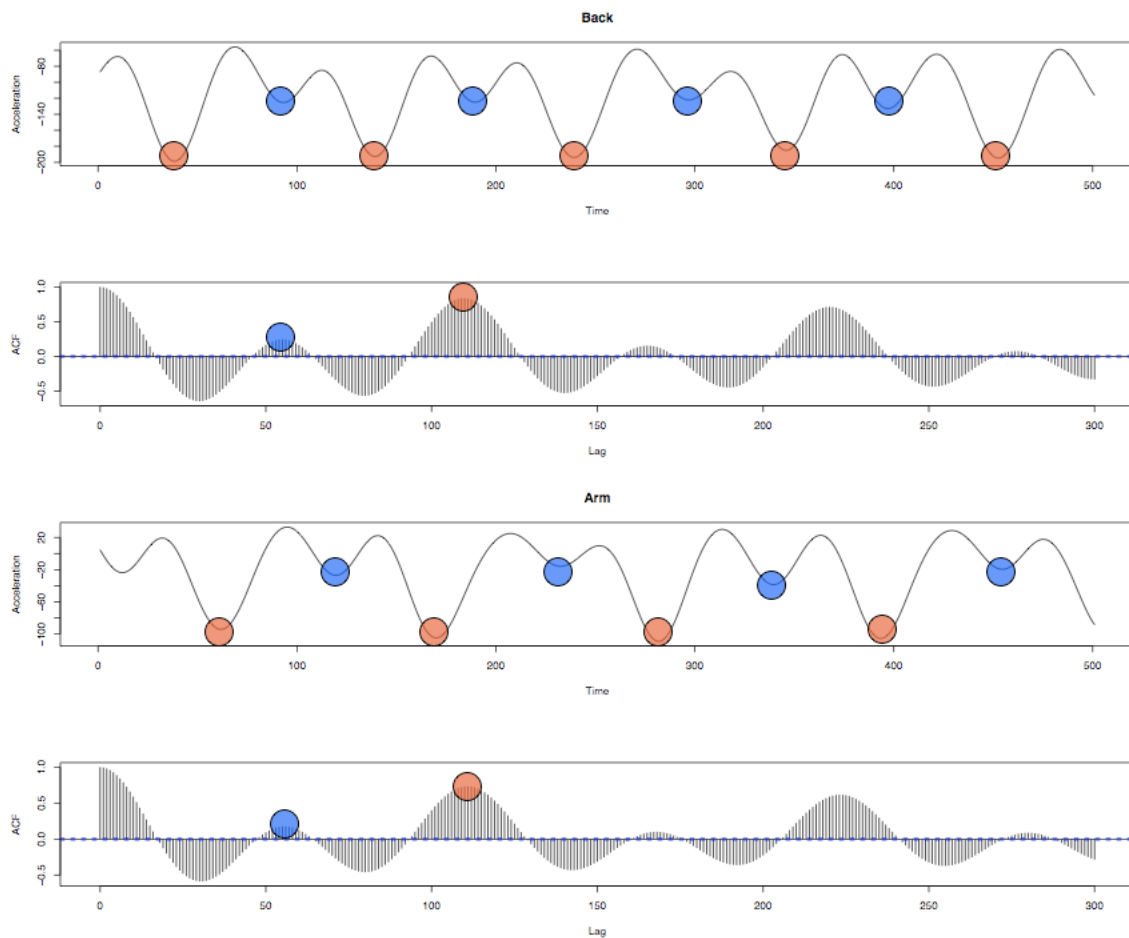


図 4.31: インストラクターの体幹部上下運動及び手首部前後運動の加速度とその自己相関関数

第5章 結言

5.1 まとめ

身体技能においては、その動作の相互の連動やリズムミックな動作が重要であると考えられている。また、複数の研究から、身体動作における体幹部の重要性について示唆されている。しかし、特にリズム感の観点からの技能向上過程や、その過程における身体各部の動作の関連については議論が尽されていない。本研究では、リズムを伴った身体動作の技能向上過程を検証するためにサンバを選び、サンバダンスの技能習得過程と、シェイカー演奏の技能習得過程について、およそ10ヶ月間にわたり約30名の被験者の身体の運動を加速度センサを用いて計測した。また、リズムをともなった身体運動を周期性とアクセントという観点から捉え、加速度センサの波形の分析を行った。

計測した加速度の時系列データの観察と自己相関による解析によって、数ヶ月から10ヶ月の練習により、殆ど全ての被験者が、ダンス運動において動作の周期性であるテンポと動きの強弱の差で表されるアクセントからなるリズムを習得することが確認された。また、シェイカー演奏における同様の観察と解析によって、殆ど全ての被験者が、動作の周期性であるテンポを獲得することが確認され、全体の1/3に相当する被験者が、強弱の差で表されるアクセントを習得することが確認された。リズムの習得過程については、始めに動作の周期性であるテンポの獲得がなされ、そのあとで強弱の差の表現ができてくる上達過程のケースを観測することができた。また、1名の被験者に対して曲のテンポを変更して動作の周期性の解析を行ったところ、そのテンポに対応した周期的な動作がなされることがわかり、一つのテンポにおける、その周期性の獲得は他のテンポにも対応できる可能性が示唆された。体幹部の動作技能が、シェイカー演奏の動作技能に与える影響に関しては、体幹部の動作技能とシェイカー演奏における手首部の動作技能の分類をそれぞれ3段階に分けて評価し、その分類を行うことで検証を行った。ここでは、Kruskal-Wallis検定により、体幹部の動作技能の段階がシェイカー演奏における手首部の動作技能に影響を与えることが示され、分類からは、体幹部の動作技能が向上した後に、手首部の動作技能が向上する過程が観察された。ここから、シェイカー演奏においては体幹部の動きが重要であることが示唆され、体幹部で獲得された技能が他の運動に応用できる可能性が示された。

5.2 考察

5.2.1 体幹部の重要性

リズムを表現するような運動について、シェイカー演奏スキルにおいて手首部においてリズムの表現を行うために、体幹部でリズムの表現が行われている必要がある結果から体幹部が重要である可能性を示唆された。

Bernstein[Ber96] は、運動の巧みさのレベルを A-D の4段階で分類した。レベル A は、体幹部の緊張のレベルであり、レベル B は複数の筋の協働、レベル C は空間場での運動、そしてレベル D は動作の連鎖からなる行為である。ここで、Bernstein は、レベル A といった低次のレベルは背景レベルとして高次のレベルを支えるとしている。本研究では、リズム運動において、背景レベルとしての体幹部の重要性について注目した。

ドラミングなど、リズムをとるといふ身体技能を観察すると、体全体でリズムを取っているような様子が見られる。体全体を動かすような運動は少なからず体幹部が関係している。これは、音楽的リズムの生成器官の一部が体幹部に存在している可能性を示す一つの例であると考えられる。サンバというリズムを伴う身体動作において、そのリズムは体幹部において獲得、表現され、体幹部で生成された動きを、末端の動きに伝えていく過程が存在し、末端の動きは体幹部の動きにモジュレーションをかけながら従属するといった運動連鎖をとるような体系を持つことが推測される。このことは、サンバダンスのように音楽的なリズムを持つような運動だけではなく、他の運動についても同様であることも推測できる。或いは、人間の神経系においてリズムを司る脳部位が存在すると仮定した場合、体幹部の作用がその神経系に大きな影響を与える可能性も考慮しなくてはならない。

5.2.2 他の運動への応用

上の考察において、他の運動への応用を示唆したために、これをさらに考察する必要があるだろう。そもそも、なぜサンバを題材として取り上げたかといえば、被験者にとって馴染みがないリズム的な運動を獲得するような場合、どのようなメカニズムで獲得がなされるのかを調べたいという動機があったからである。サンバは、被験者である日本人にとっては馴染みが薄い音楽である。これは拍のとりかたにも表れる。拍手をして、それに合わせて身体を動かしたとき、拍手音がしたときに身体が下がるのが日本人である。対してブラジル人は、音がしたときに身体が上がる。サンバダンスはベースの音に合わせて身体をあげて動くような運動である。このような動きの背景としては、文化的な違いがある。農耕民族である我々日本人は、田植え歌というように稲を植えるリズムを大人数で合わせる目的で作られた音楽があり、植えるという行為は下がるという動作によってなされる。文化的にも異なる音楽のリズムを獲得するということは、新しいリズム運動を獲得することに等しい。本研究において示したサンバにおける知見は新しいリズム運動を獲得する他の場面においても活かせる可能性があると考えられる。

5.2.3 センサーの選択

本研究では、加速度センサを用いてデータの計測を行った。加速度センサは、身体運動の計測に良く用いられ、石川らの研究[石川 06, YIF06]にも使われたモーションキャプチャ装置に比べて、安価・軽量であり、モーションキャプチャ装置が、その装置を特定の場所に設置して計測をするのに対して、持ち運びが可能で単独で計測できるポータビリティがあることが特徴である。ポータビリティの問題は、多人数で計測を行いたい場合に有効である。多くの被験者をモーションキャプチャ装置で計測することはもちろん可能であるが、その被験者を収めるだけの広いスペースにモーションキャプチャ装置を設置することが必要であり、現実的ではない。また、基本的に固定されたスペースに多人数の被験者を招くことは、非常に困難であろう。仮に、その二つが満たされたとしても、例えば光学式と分類される赤外光を用いたモーションキャプチャ装置では、多人数の被験者が入り乱れる環境では、ある被験者のマーカーを他の被験者が遮断してしまうオクルージョンの問題が発生することも考えられる。この問題についても、加速度センサは個々に独立したセンシングを行うために有効であると考えられる。前述したように、本研究においてはリズムを周期性とアクセントの2面から検証する。モーションキャプチャ装置は、3次元空間上の位置を正確に計測することが可能である。加速度センサにとって、位置の計測は、加速度センサが本体の加速度情報以外から情報を得られない場合には、ドリフトと言われる累積する性質を持つ誤差に対して補正機構を持たないために難しい。しかし、周期性とアクセントの2面から検証においてモーションキャプチャ装置で計測できる空間的な位置情報は不要である。また、加速度の性質は、人間の力の使い方というものに密接に関連する。これは、身体運動のスキルを計測する上で重要な筋肉の動きである力を入れるタイミング・力の強さということと同次元で計測が可能であることから言える。しかし、モーションキャプチャ装置を用いることで、加速度センサでは得られないデータを得られる可能性があり、平行して研究を進めていく必要があるものと考えられる。

5.3 今後の展開

本研究では、身体動作に表出されるリズムを、テンポ（周期性）とアクセント（強弱の差）で定義した。このうち、周期性については自己相関による解析によって、多くの部分が解析できていると考える。しかし、アクセントについては、微妙な強弱の差や時間差を利用したアクセントのつけ方などを検証できていない。この問題に対してウェーブレット変換などを用いた周波数解析的な手法を用いての検証を行うことで、3段階だけでなくもっと細かなレベル分類が可能になると考える。また、シェイカーの演奏技能の検証においては、センサの計測範囲の問題から、センサを手首部に装着することによって行ったが、別の実験からより末端部である手の甲などにセンサを装着した場合のほうが、シェイカー演奏の細かな動作を計測できることがわかった。細かなレベル分類には、センサの装着部位の選定とセンサの選択も必要となると考えられる。

本研究では、被験者が30人と多数であったために、多くの被験者における長期間の傾向を検証し、身体の動作と技能の関連を調べた本研究の目的を果たすことはできたが、個々人の習得過程を細かい時間間隔で計測することができなかった。上達過程の検証をおこなうためには、細かな時間間隔での計測を行う必要があるものと考ええる。

さらに、本研究で示唆された、シェイカー演奏における体幹部の動作の重要性について、体幹部から鞭のように運動連鎖が起こっている可能性を考慮して実験を行い、その検証を行う必要があるものと考ええる。そこで、身体の運動対について加速度センサなどを装着し、その連鎖を各センサからのデータの位相関係などを考慮して検証することが考えられる。

また、本研究においては個々人における内部のダイナミクスに注目したが、複数被験者間において、その動作のインタラクションが存在する可能性がある。これは例えば、ひとりでダンス運動を行っている際にはうまく踊れないが、インストラクターと同時にダンス運動を行うと、なんとなくうまく踊れているというような現象としてあらわれている。サンバというものは、グループ全体でノリというものを表現するものであり、そのような複数被験者間のインタラクションに注目することで、一体感などを説明できる可能性がある。また、技能伝達という見地からも、この検証は興味深い。

参考文献

- [AL68] P. M. Anselone and P. J. Laurent. A general method for the construction of interpolating or smoothing spline-functions. *Numerische Mathematik*, Vol. 12, pp. 66–82, 1968.
- [AYF03] Mamiko Abe, Tomoyuki Yamamoto, and Tsutomu Fujinami. A dynamical analysis of kneading using a motion capture device. In *Proceedings of 3rd International Workshop on Epigenetic Robotics*, pp. 41–48, 2003.
- [Ber96] N.A. Bernstein. On dexterity and its development. *Dexterity and its development*, pp. 3–244, 1996.
- [BJ94] George Edward Pelham Box and Gwilym M. Jenkins. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1994.
- [But30] Stephen Butterworth. On the theory of filter amplifiers. *Wireless Engineer*, Vol. 7, pp. 536–541, 1930.
- [Dan74] Richard W. Daniels. *Approximation Methods for Electronic Filter Design*. McGraw-Hill Education, 1974.
- [IYF06] Junpei Iguchi, Tomoyuki Yamamoto, and Tsutomu Fujinami. Samba helps football players improve their skill. In *Abstracts of the 5th World Congress of Biomechanics*, p. 556, 2006.
- [JR92] M.I. Jordan and D.E. Rumelhart. Forward Models: Supervised Learning with a Distal Teacher. *Cognitive Science*, Vol. 16, No. 3, pp. 307–354, 1992.
- [Kee68] SW Keele. Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, Vol. 70, No. 6, pp. 387–403, 1968.
- [Las51] K.S. Lashley. *The Problem of Serial Order in Behavior*. Bobbs-Merrill, 1951.
- [Lib04] B. Libet. *Mind Time: The Temporal Factor in Consciousness*. Harvard University Press, 2004.

- [MG03] T. McMillen and A. Goriely. Whip waves. *Physica D Nonlinear Phenomena*, Vol. 184, pp. 192–225, October 2003.
- [MN98] Makoto Matsumoto and Takuji Nishimura. Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, Vol. 8, No. 1, pp. 3–30, 1998.
- [Tag97] Gentaro Taga. Freezing and freeing degrees of freedom in a model of neuro-musculo-skeletal system for the development of locomotion. In *16th Int. Congress of the Society of Biomechanics*, p. 47, 1997.
- [TYS91] Gentaro Taga, Yoko Yamaguchi, and Hiroshi Shimizu. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, Vol. 65, No. 3, pp. 147–159, 1991.
- [UHF97] Ken Ueno, Fumito Higuchi, and Koichi Furukawa. Towards the understanding of the technique for playing string instruments. In *6th IFAC Symposium On Automated Systems Based On Human Skill*, pp. 49–52, 1997.
- [VHA82] Christopher L. Vaughan, James G. Hay, and James G. Andrews. Closed loop problems in biomechanics. *Journal of Biomechanics*, Vol. 15, pp. 197–200, 1982.
- [VS72] M. Vukobratovic and J. Stepanenko. On the stability of anthropomorphic systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [Wik06] Wikipedia. Samba — wikipedia, the free encyclopedia, 2006. [Online; accessed 27-December-2006].
- [WL49] N. Wiener and RB Lindsay. Cybernetics. *American Journal of Physics*, Vol. 17, p. 226, 1949.
- [YF04] Tomoyuki Yamamoto and Tsutomu Fujinami. Synchronisation and differentiation: Two stages of coordinative structure. In *Proceedings of Fourth International Workshop on Epigenetic Robotics*, pp. 97–104, 2004.
- [YIF06] Tomoyuki Yamamoto, Kohei Ishikawa, and Tsutomu Fujinami. Developmental stages of musical skill of samba. In *Abstracts of the 5th World Congress of Biomechanics*, p. 555, 2006.
- [Zat99] Vladimir M. Zatsiorsky. 身体動作の運動学. 有限会社ナップ, 1999. 鳥居 俊監訳, (原書: Kinematics of Human Motion).
- [阿部 03] 阿部真美子, 山本知幸, 藤波努. 技能獲得における身体動作のモーションキャプチャを用いた解析. 第 65 回情報処理学会全国大会予稿集, pp. 351–352, 2003.

- [岩永 a] 岩永信之. チェビシェフフィルタ (ディジタルフィルタ) . http://ufcpp.net/study/digital_filter/chebyshev.html.
- [岩永 b] 岩永信之. バターワースフィルタ (ディジタルフィルタ) . http://ufcpp.net/study/digital_filter/butterworth.html.
- [仰木 04] 仰木裕嗣, 馬場敏之, 坂口勇夫. ピエゾ抵抗型 3 軸加速度センサーを用いたゴルフスイング技能評価システムの開発. 日立金属技報, Vol. 20, pp. 45–50, 2004.
- [古川 03] 古川康一, 植野研, 五十嵐創, 森田想平, 尾崎知伸, 玉川直世. 身体知の解明を目指して. 人工知能学会全国大会第 17 回論文集, pp. 3D5–01, 2003.
- [古川 05] 古川康一, 尾崎知伸, 植野研. 身体知解明へのアプローチ. 人工知能学会全国大会第 19 回論文集, pp. 2B1–01, 2005.
- [上村 04] 上村章浩, 藤波努, 山本知幸. モーションキャプチャ装置を用いたリズム演奏習得過程の分析. 人工知能学会第 18 回全国大会予稿集, pp. 3D1–05, 2004.
- [植野 05] 植野研. 時系列データマイニングに基づく身体知の構築に関する研究. 博士論文, 慶応義塾大学大学院 政策・メディア研究科, 2005.
- [石川 06] 石川航平, 山本知幸, 藤波努. モーション・キャプチャ装置を用いたサンバ・リズム習得過程の分析. 人工知能学会第 20 回全国大会予稿集, pp. 2D1–02, 2006.
- [多賀 02] 多賀巖太郎. 脳と身体の動的デザイン. 金子書房, 2002.
- [沢田 05] 沢田康次, 石田文彦. リズムと感覚運動制御. 蔵本由紀 (編), 非線形・非平衡現象の数理 1 リズム現象の世界. 東京大学出版会, 2005.
- [峯村 99] 峯村吉泰. 数値シミュレーション入門. 森北出版, 1999.
- [和田 97] 和田孝雄. 生体のゆらぎとリズム. 講談社サイエンティフィク, 1997.

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に支援を頂きました。この場を借りて感謝の気持ちを表したいと思います。

まず、指導教官である藤波努助教授には、研究を行う上での心構えから、研究内容のご指導、助言を頂きました。ありがとうございました。

山本知幸助手には、実際の研究において数々の助言を頂いただけでなく、日頃にわたってコミュニケーションをとっていただきました。大変感謝しております。

研究に快く協力してくださった小松商業高校ブラスバンド部とサンバのインストラクターをつとめていただいた安野先生、方々の協力がなければ本研究は成立しませんでした。大変感謝いたします。

所属するスキルサイエンスラボラトリーの皆様、ラボに遊びに来てくれた友人には、私の日頃のイタズラなどにも笑って対応して頂き、懐の深さと大人の対応を教えていただきました。ありがとう。