

平成 30 年度修士論文

加速度センサーとジャイロ스코ープによる ヒトの運動状態解析

大阪府立大学 大学院工学研究科
電子・数物系専攻 数理工学分野
非線形動力学・複雑系研究グループ

学籍番号 2170103007

池本 祥太郎

2019 年 2 月

概要

本研究では、加速度センサーとジャイロ스코プにより得られた加速度時系列および角速度時系列データから、ヒトの運動、特に歩行と走行に関して、速度の増減に伴いどのように運動状態が変化するか、またその変化前後での質的な違いを明らかにすることを目的としている。今回我々は三軸の加速度センサーとジャイロ스코プからなる小型ロガーを腰に装着した被験者をトレッドミルの上で歩行・走行させるという実験を行った。得られた歩行・走行それぞれの加速度時系列から、周期性や周期、加速度上下成分の一周期における最大値が大きく異なっていることに着目し、トレッドミルにより外部から速度を与え強制的に運動状態を変化させた際、それらがどのように変化しているのかを解析した。その結果歩行・走行間において、周期が急激に変化する速度領域が存在し、それは増速時と減速時では必ずしも一致しないことが分かった。また、ヒトの周期的な運動状態を特徴づけるものの一つとして、最も動きの少ない点に着目した。この点は運動の「軸」とみなすこともできる。その結果、被験者が運動中体の前方に軸がある人と後方に軸がある人に分類できることがわかった。加えて歩行、走行それぞれにおける軸の位置の切替についても解析を行ったところ、さらに詳しく分類することができた。これらの違いは運動のパフォーマンスに関わるのではないかと考えられる。

目次

1.序論	1
1-1.背景と目的	1
1-2.先行研究.....	1
1-3.本研究の位置づけ	3
1-4.本論文の構成	4
2.実験方法	5
2-1.測定装置、装着方法.....	5
2-2.測定プロトコル	6
2-3.トレッドミルの速度	8
3.データ解析.....	10
3-1.運動面	10
3-2.周期.....	11
3-3.Least Motion Point(LMP)	12
3-3-1.LMP の定義と時系列からの導出.....	13
3-3-2.LMP の理論振り子への適用	17
3-3-3.実際の振り子への適用	19
4.結果	22
4-1.解析結果.....	22
4-1-1.プロトコル A.....	22
4-1-2.プロトコル B、C.....	27
4-2.ヒステリシス	28
4-3.LMP の位置の分布.....	33
4-4.測定回数（トライアル）の増加に伴うトレッドミルへの慣れ	36
4-5.トレッドミルの速度変化時間とヒステリシスの関係.....	37

5.結論	39
5-1.まとめ	39
5-2.今後の課題	40
謝辞	41
参考文献	42
付録 A	43
付録 B	62

1. 序論

1-1. 背景と目的

近年、ロガーなどの測定装置は、その小型化により人や動物に容易に取り付けることが可能になってきている。それらを用いて動物個体のさまざまな行動の様子についての解析が行われている。そこで本研究ではヒトに対して、三軸の加速度センサーと三軸のジャイロスコープからなる一体型デバイスを取り付け、運動状態の解析を行う。特に、ヒトの最も基本的な歩様形態である歩行と走行に着目し、複数の被験者に共通する特徴や個人によって異なる特徴を明らかにすることを目的としている。

1-2. 先行研究

ロガーを用いた先行研究としては例えば、Gerencsér らの「慣性センサーを用いた自由に動き回る犬の行動識別」[1]がある。これはある二種類の犬に対して、背中に取り付けた3軸の加速度計とジャイロスコープによる運動状態の測定と、その運動状態のビデオ撮影を並行して行うことにより、7つの行動（伏せ、お座り、歩く、トロット、ギャロップ、キャンター）を識別するというものである。測定結果は support vector machine(SVM)による分類によって評価される。結果として、同個体に対してトレーニングと検証を行った際には90%を超える正確な識別結果が得られ、複数の別個体から得られたトレーニングデータを用いた検証結果においても、80%を超える識別結果が得られている。

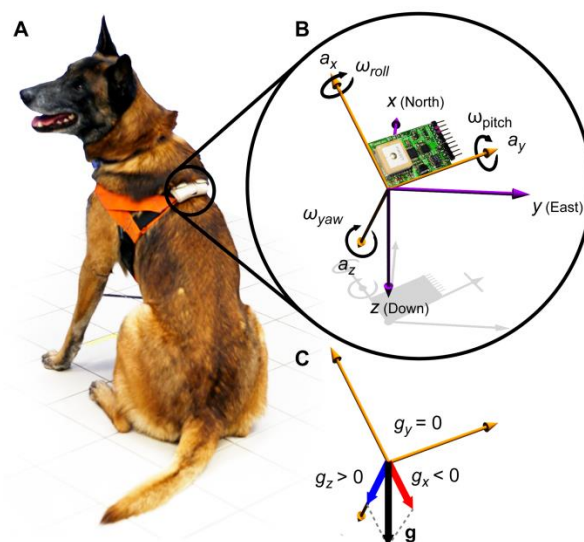


図 1-2.1 デバイスと犬への装着図。[1]を改変。

また、ヒトの運動、特に歩行と走行に着目したものとしてはDiedrich と Warren の「なぜ歩様は変化するのか？歩行走行間転移のダイナミクス」[2]が知られて

いる。この論文では歩行走行間転移は2つのアトラクター間の非平衡相転移のような振る舞いをする」と述べられている。また、その転移を起こす主な要因は運動の周期（リズム）ではなく、エネルギーコストの効率にあると結論づけられている。図 1-2.2 は横軸、縦軸にそれぞれ歩行と走行におけるストライド（二歩分）の周波数、ストライドの長さをとったグラフであり、同心円状の曲線群は歩行時におけるエネルギーコストの等値線、平行線は走行時におけるエネルギーコストを表している。また、点線で描かれている曲線は速度一定、対角線はエネルギーコストが最適なラインを表している。ゆえに、同心円の中心

（0.79cal/kg/m、1.3m/s）は最も自然で心地の良い、エネルギーコストが最適な歩行状態であり、点線の矢印はその速度における最適な歩行のストライドの周波数と長さを表している。対して走行においては最適といえる速度がなく、エネルギーコストは最小でおよそ 1.0 cal/kg/m となっている。これらの結果から歩行におけるエネルギーコストが 1.0 cal/kg/m を超える点（速度は 2.1 m/s）において、歩行から走行に運動の転移（ジャンプ）が起こる。これを表しているのが、矢印のある点線上の2つの黒点である。その後は、走行のエネルギーコスト 1.0 cal/kg/m の直線に沿うように、最適な走行のラインの点線が描かれている。

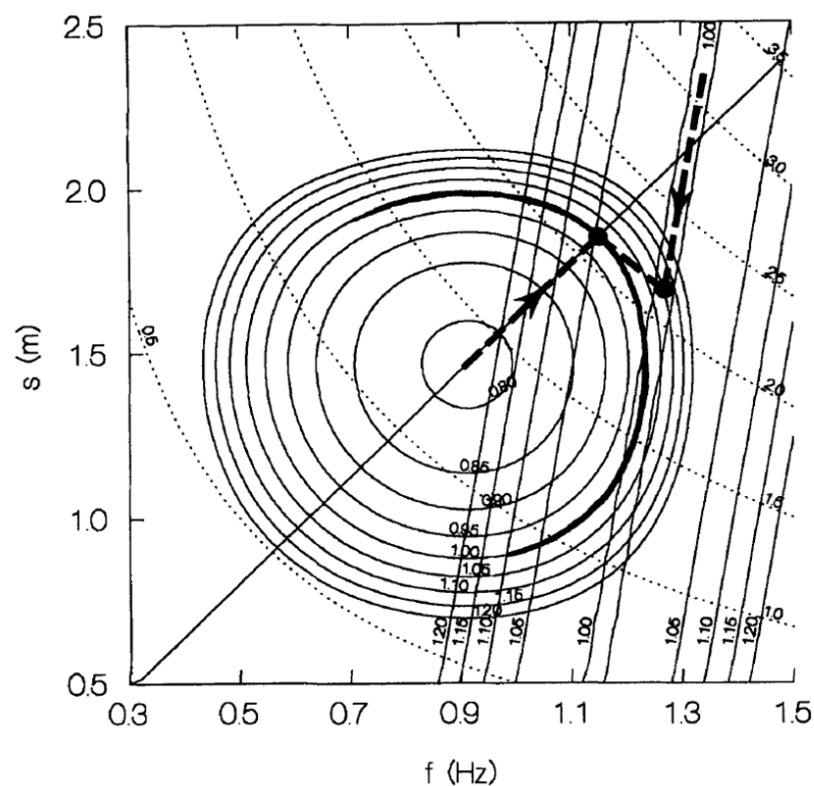


図 1-2.2 歩行と走行におけるストライドの周波数 f と歩幅 s およびエネルギー消費の関係。[2]を改編。

理論と比較するため、Diedrich と Warren は速度可変のトレッドミル上で被験者を運動させるという実験を行った。その結果、多少のずれはあるものの、対角線に沿ってストライド周期と長さが変化し、平均値として速度 2.07 m/s において歩行・走行間転移が起きているという結果が得られている。そしてこの結果はダイナミックセオリー通りといえると結論付けられている。

他にも、ヒトの歩行状態を解析したもの[3]や歩行の特徴を評価したもの[4]、単純化した二足モデルを用いて歩行と走行を差別化したもの[5]もある。図 1-2.3 は Srinivasan らの単純化した二足モデルを用いて歩行と走行を差別化したグラフである。横軸に無次元化された速度 V 、縦軸に同じく無次元化されたステップ長 D をとり、それらと歩行、走行およびそれらのハイブリッドな歩様との関係を表している。破線は歩行が機械的に実行不可能なラインであり、円で囲まれた領域は人間が歩行、走行間転移を行う領域であると述べられている。

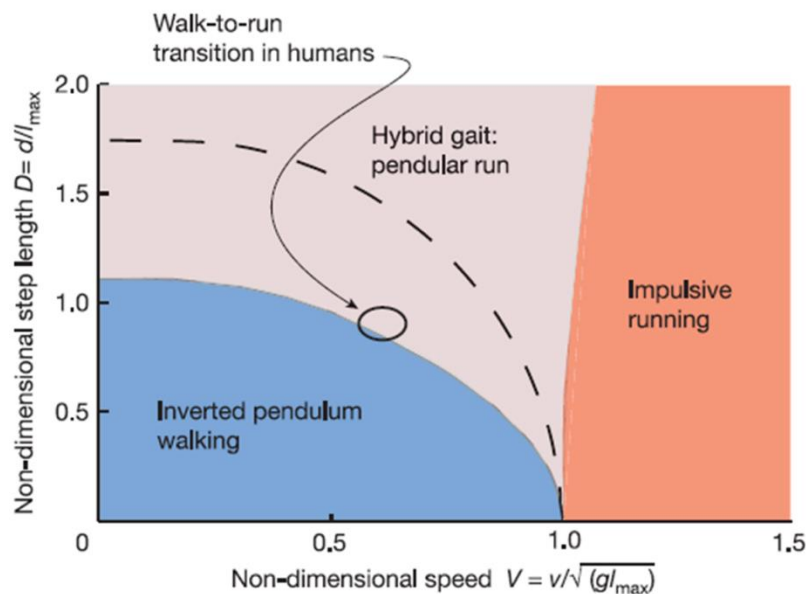


図 1-2.3 無次元速度 V および無次元ステップ長 D と歩行、走行の関係。[5]を改編。

1-3.本研究の位置づけ

先行研究を踏まえると、ヒトは犬や他の動物に比べ容易に測定装置を体に取り付けることが可能であり、かつ複雑なプロトコルにも従って運動できる点、また実験に協力してもらう被験者の確保しやすさ等において測定対象として優れていると考えられる。Diedrich と Warren らの研究[2]において、協力を得たサンプル数は合計 9 人であり、彼らは全員日頃から少なくとも 1 日 15 分以上の有

酸素運動を行っていた。これに対し、我々は解析結果にさらに一般性を加えるため、被験者の日々の運動や運動経歴に幅を持たせ、サンプル数を増やすことを意識した。また、我々はヒトの運動の特徴を抽出する新たな解析方法を提案した（詳しくは3-3節を参照）。この方法により抽出された各サンプルにおける特徴の共通点や相違点などを比較することにより、将来的にその人に合ったより効率のいい動き方や体に負担の少ない動きなどの提案が可能ではないかと考えられる。

1-4.本論文の構成

2章は本研究の実験方法やそれに用いた装置の紹介である。3章では実験により得られたデータの解析方法、4章では解析結果とその考察、5章ではまとめとその展望について述べている。付録として、本文で紹介しきれなかったすべての被験者における解析結果や、試験的に行った異なる実験方法により得られたデータの解析結果を紹介している。

2.実験方法

本章では、実験方法と被験者について説明する。2-1 節では測定装置及びその装着方法や装着図、トレッドミルの紹介、2-2 節ではプロトコルの説明とすべての被験者の情報、測定時の注意点など、2-3 節ではトレッドミルの速度の校正とその方法について説明する。

2-1.測定装置、装着方法

本研究では、Switch Science 社製マルチロガー「ちょっとすごいロガー」（以下 CSL）を使用している。CSL はある時刻 t [ms]における三軸加速度 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 、 $a_z(t)$ [G] ($=[\times 9.8\text{m/s}^2]$)、三軸角速度 $g_x(t)$ 、 $g_y(t)$ 、 $g_z(t)$ [deg/s]、温度[°C]、気圧[Pa]、磁場[uT]の測定が可能である。今回はそのうち三軸加速度と三軸角速度時系列だけを使用する。加速度の測定可能範囲は最小 -8 [G]、最大 $+8$ [G]であり、そのサンプリング周波数は 100Hz である。また、以下では加速度の単位として $[G]=[\times 9.8\text{m/s}^2]$ を使用する。

実験は次の要領で行う。CSL を被験者の腰の部分に取り付け（図 2-1.1 (b)）、次節で述べる測定プロトコルに従いトレッドミル上を運動してもらう（図 2-1.1 (a)）。運動後、CSL を取り外し、得られた加速度、角速度の時系列を計算機に保存し、解析する。また、測定の前後で計 2 回、CSL の取り付け場所と向きを確認するために写真をとる。CSL とそれを取り付けるためのケースおよびゴムひもを図 2-1.1 (c) ～ (e) に示す。CSL と電池およびケース（図 2-1.1 (d)）の合計重量は 164g である。なお、本実験に用いたトレッドミルは SPIRIT 社製の XT385 である。

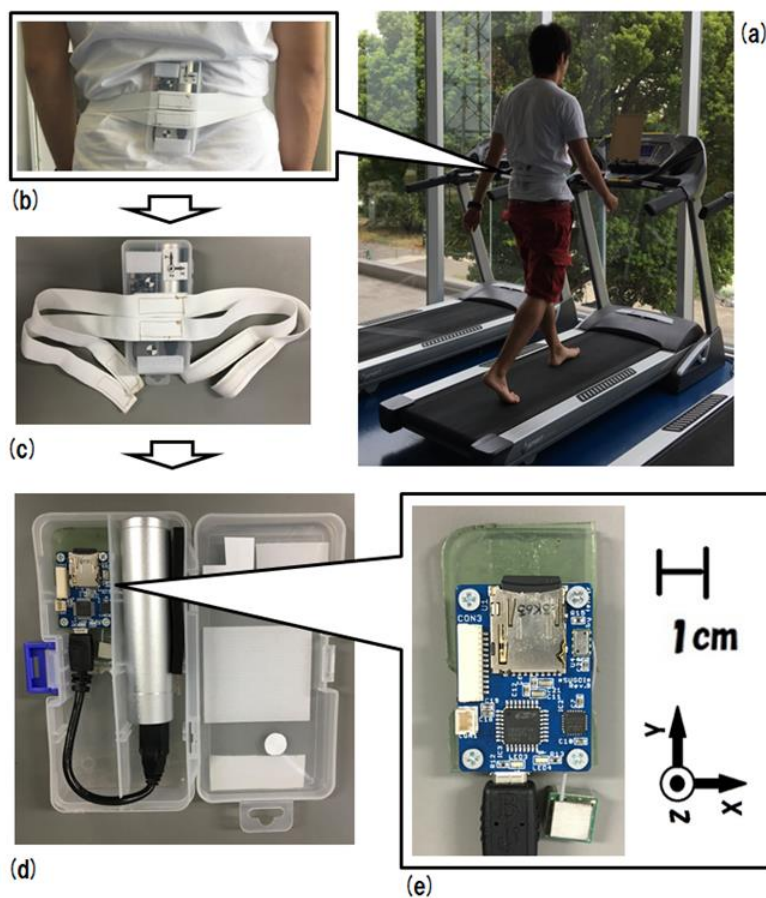


図 2-1.1 CSL の装着図 ((a), (b)) と CSL ((c)~(e))。

2-2.測定プロトコル

今回の実験に使用したトレッドミルの速度変化のプロトコルは以下の5種類である。最低速度と最高速度をそれぞれ $v_1=4.0\text{km/h}$ 、 $v_2=7.6\text{km/h}$ と選んでいるが、これらの速度はそれぞれ被験者が無理なく歩行、走行できることを基準として定めた。

A: v_1 から v_2 まで $+0.1\text{km/h/5s}$ 、 v_2 で折り返し v_1 まで -0.1km/h/5s

B: v_1 で 1min

C: v_2 で 1min

D: v_1 から v_2 まで $+0.1\text{km/h/8s}$ 、 v_2 で折り返し v_1 まで -0.1km/h/8s

E: v_1 から v_2 まで $+0.1\text{km/h/10s}$ 、 v_2 で折り返し v_1 まで -0.1km/h/10s

なお、本節で用いられているのはトレッドミルの表示速度であり、実際の速度は1割ほど異なる。詳しくは次節を参照。また、これらのプロトコルを複数回行う場合、2,3分間の休憩をはさみ測定を行った。

表 2-2.1 に各被験者のサンプル番号、性別、年齢、身長、体重、運動歴、実験内容と試行回数（例：A4,B1,C1 はプロトコル A,B,C をそれぞれ 4 回、1 回、1 回行ったことを表す）を示す。

表 2-2.1 各被験者のサンプル番号、性別、年齢、身長、体重、運動歴、実験内容と試行回数。

Sam ple No	性別	年齢	身長	体重	運動歴	実験内容、試行回数
S1	M	25	178	75	サッカー(小・中学)	A1,E1
S2	M	55	174	70	卓球(高校)	A1,E1
S3	M	25	185	61	陸上(中学)	A1,B1,C1,D1
S4	M	24	172	82	アメフト(大学)	A4,B1,C1,D1
S5	M	21	165	52	テニス(小学)、陸上(中学)	A4,B1,C1,E1
S6	M	23	171	81	野球(小学)、バドミントン(中学)	A1,E1
S7	F	24	156	50	テニス(高校)、バスケ(大学)	A1
S8	M	22	170	60	サッカー(小、中、高)	A3,B1,C1
S9	M	23	172	65	特になし	A3,B1,C1
S10	F	24	165	非公開	合気道(高)	A1,B1,C1
S11	M	19	189	72	ソフト(小)、バスケ(中、高、大)	A1
S12	M	18	180	65	サッカー(中)、バスケ(高、大)	A1
S13	M	19	170	58	バスケ(小、中、高、大)	A1
S14	M	21	182	67	バスケ(小、中、高、大)	A1
S15	M	22	171	68	バスケ(小、中、高、大)	A1
S16	F	19	157	非公開	バレー(中、高)	A1
S17	F	20	156	非公開	ダンス(小、高)、陸上(中)	A1
S18	M	21	169	72	バスケ(中、高、大)	A1
S19	M	23	170	68	野球(小、中、高)	A3,B1,C1
S20	F	23	157	46	ダンス(大)	A3,B1,C1
S21	M	22	177	67	陸上(中、高)、自転車(大)	A3,B1,C1

測定前の説明として、

「これからランニングマシンの上を運動してもらいますが、こちらから速度変化を与えていきますので自分が快適と思える運動、例えば走りたくなったら走り、歩きたくなったら歩いてください。」

という内容をすべての被験者に伝える。歩行・走行を切り替えるタイミングは被験者が意識的に調整することも可能であり、実験の趣旨をなるべく伝えないことで、極力普段通りの自然な運動データを得ることを意図している。また、トレッドミルの速度パネルにはカバーをかけ、速度表示を被験者に見せていない。

これらに加え、各プロトコルにおいて測定前と測定後に各 3 回ずつ CSL の上から手で軽く叩き、CSL にシグナルを残す。これは、解析時に測定の開始と終了をわかりやすくするためである。例として図 2-2.1 に測定開始時における 3 つのシグナルと測定開始の位置を示す。測定終了時はこの時とは反対に 1 つ目のシグナルが測定終了位置とする。

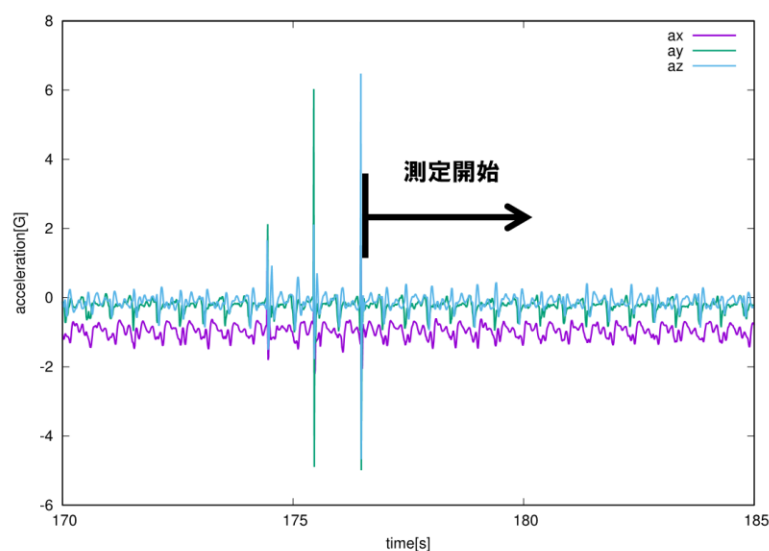


図 2-2.1 測定開始時のシグナルと測定開始位置。

2-3.トレッドミルの速度

トレッドミルの速度の表示・設定には誤差や機器依存性がある。パネルで 4.0[km/h]と設定しても、実際の速度はそれと異なる。我々はトレッドミルのベルトの長さを計測し、ベルトに取り付けた目印からベルトが 10 回転するまでの時間をストップウォッチで測定することで、ベルトの実際の速度を測定した。表 2-3.1 にその結果を示す。なお、トレッドミルのベルトの長さは 3.123m であった。

表 2-3.1 トレッドミルの表示速度と実測速度。

トレッドミルの表示速度 (km /h)	1回目実測速度 (km /h)	2回目実測速度 (km /h)	3回目実測速度 (km /h)
4	4.627	4.589	4.621
4.6	5.254	5.296	5.278
5.6	5.987	5.987	5.987
5.2	6.633	6.649	6.633
6.4	7.358	7.296	7.358
7	8.002	8.100	8.065
7.6	8.682	8.642	8.648

これらの結果から実際の速度 $V[\text{km/h}]$ に関して、表示速度 $v[\text{km/h}]$ にフィッティングを行うと、

$$V = (1.13 \pm 0.0013) v + (0.0766 \pm 0.00887) \quad (2-3.1)$$

という結果が得られた。この結果を用いると 2-2 節におけるトレッドミルの表示速度 $v_1=4.0\text{km/h}$ 、 $v_2=7.6\text{km/h}$ に対する実際の速度はそれぞれ $V_1=4.596\text{km/h}$ 、 $V_2=8.664\text{km/h}$ となる。プロトコル A～E の速度は実際の速度 V_1 、 V_2 を用いている。

3. データ解析

本章では、解析の条件や着目する物理量および新たに提案する解析方法を紹介する。3-1 節では着目する運動面や加速度および角速度の各成分における典型的な時系列、3-2 節では運動の周期を見積もる方法、3-3 節では新たに提案する解析方法とその精度について説明する。

3-1. 運動面

本研究ではサジタル面（矢状面）での運動に着目する。この際、 x, y 軸をそれぞれ上下成分（下向きを正）、前後成分（前向きを正）と定める（図 3-1.1）。

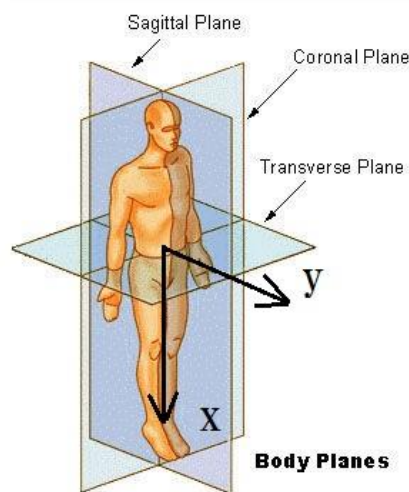


図 3-1.1 サジタル面と x 軸、 y 軸。

ここで、サジタル面における典型的な加速度 a_x 、 a_y と角速度 g_z の時系列を歩行と走行それぞれにおいて図 3-1.2 に示す。これらのグラフから a_x の平均値がおよそ -1 [G]であるのが見てとれる。これは重力加速度によるものであり、下向きを x 軸の正の方向としているため負の値となっている。対して a_y の平均値はおよそ 0 [G]である。また、歩行と走行では周期や振幅に違いがあることが見てとれる。

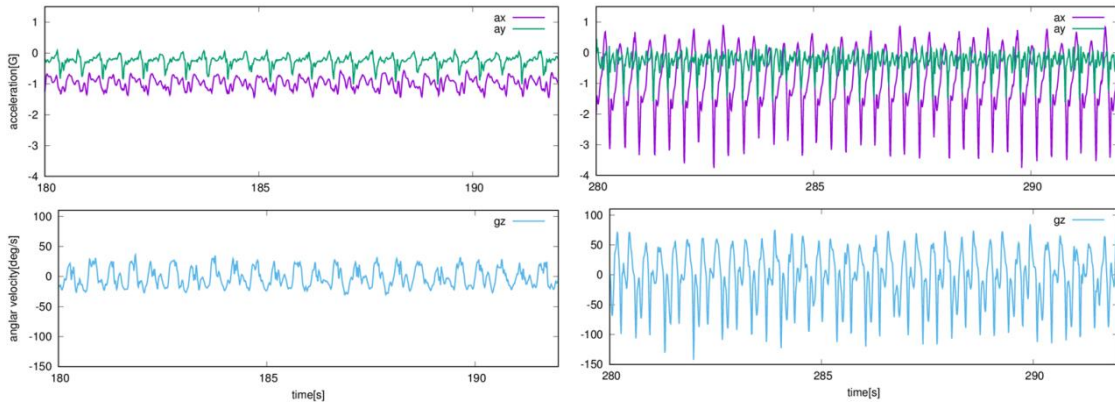


図 3-1.2 歩行（左）と走行（右）の典型的な加速度 a_x 、 a_y と角速度 g_z の時系列。

参考のため矢状面以外の運動に関する加速度 a_z と角速度 g_x 、 g_y の典型的な時系列も次の図 3-1.3 に示す。

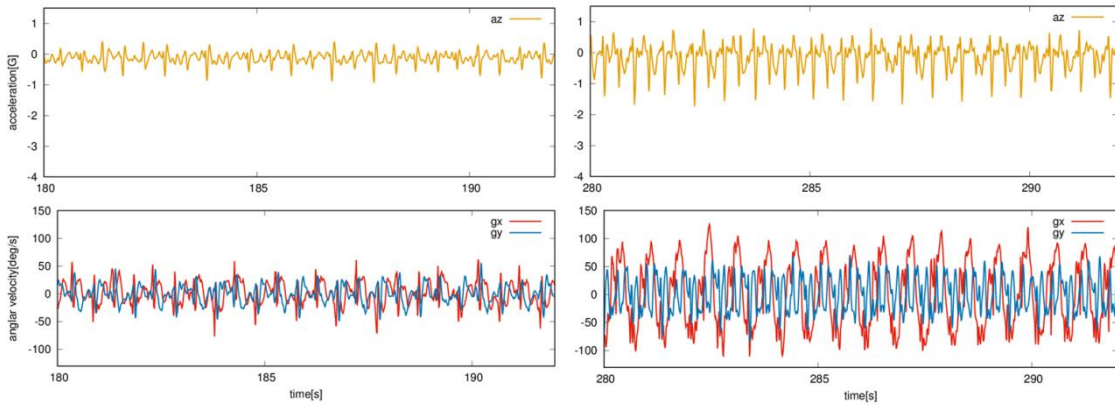


図 3-1.3 歩行（左）と走行（右）の典型的な加速度 a_z と角速度 g_x 、 g_y の時系列。

3-2. 周期

CSL から取得した各成分の加速度時系列を窓（5 s）ごとに分け、それぞれの窓に対して自己相関関数を計算し、第一ピークの位置から周期を見積もる。本研究において周期は 1 ステップ分を意味する。1 ステップとは、例えば右足が着地してから左足が次に着地するまでのいわゆる一歩分を意味する。ちなみに、1 ストライドとは右足が着地してから次に右足が着地するまでのいわゆる二歩分のことである。上下成分（x 成分）の自己相関関数 $C_x(\tau)$ は次式で表される。

$$C_x(\tau) = \langle (a_x(t) - \langle a_x \rangle)(a_x(t + \tau) - \langle a_x \rangle) \rangle / \delta^2 \quad (3-2.1)$$

ここで $\langle \rangle$ は各窓における時間平均を意味する。また、 δ^2 は分散 $\langle (a_x(t) - \langle a_x \rangle)^2 \rangle$ を示す。前後成分（y成分）も同様に計算し、これらの値のピークの位置から周期を求める。

図 3-2.1 に歩行の代表的な時系列データのグラフ（左）とそれから計算された自己相関関数のグラフ（右）を示す。自己相関関数のグラフ（右）に関して、横軸は時間差、縦軸は自己相関関数であり、その値が大きいほど周期性が高いことを意味する。ほとんどの被験者において上下成分（x成分）の方が高い周期性を持っていたので、上下成分（x成分）の第一ピーク（A）の位置から周期を決定している。また、この方法により周期を決定する際、横軸の時間差、縦軸の自己相関関数それぞれに閾値 0.6s、0.6 を設定し、それぞれの値が閾値を共に上回った場合のみ、その窓における周期とする。そうでない場合は、その窓における運動の周期性が低いと判断し、周期を決定しない。また、次節以降の解析に使用するため、各窓における加速度・角速度のそれぞれの成分について、得られた周期を用いて平均化を行う。

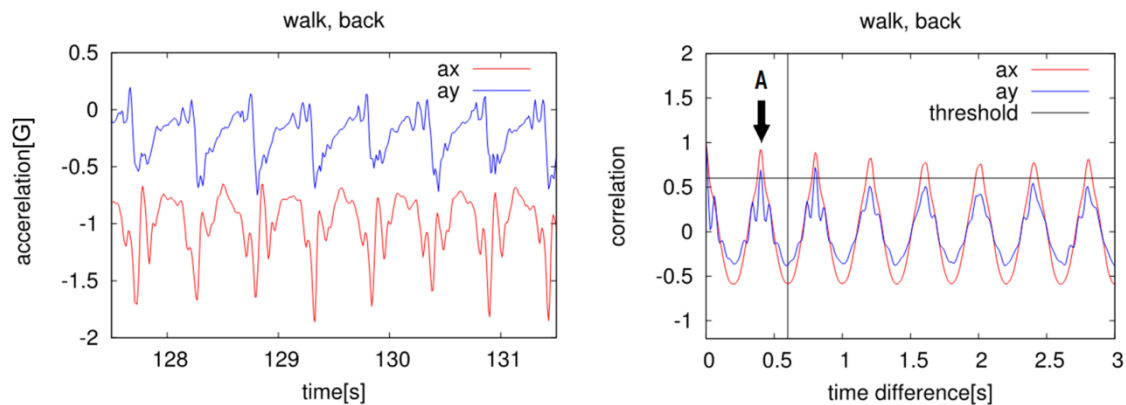


図 3-2.1 歩行の代表的な時系列データ（左）と相関関数（右）。

3-3.Least Motion Point(LMP)

ヒトの運動を特徴づけるものの一つとして Least Motion Point(LMP)を提案する。これは、運動における体の「軸」となっている最も動きの少ない点、すなわち矢状面において加速度のゆらぎが最も小さくなる点を意味する。CSL から得られる加速度および角速度の時系列が周期的な場合、LMP の座標を時系列から求めることができる。本節では、時系列から LMP の座標を求める方法を説明した後、仮想的な振り子と実際の振り子に適用し、その精度のチェックを行う。

3-3-1.LMP の定義と時系列からの導出

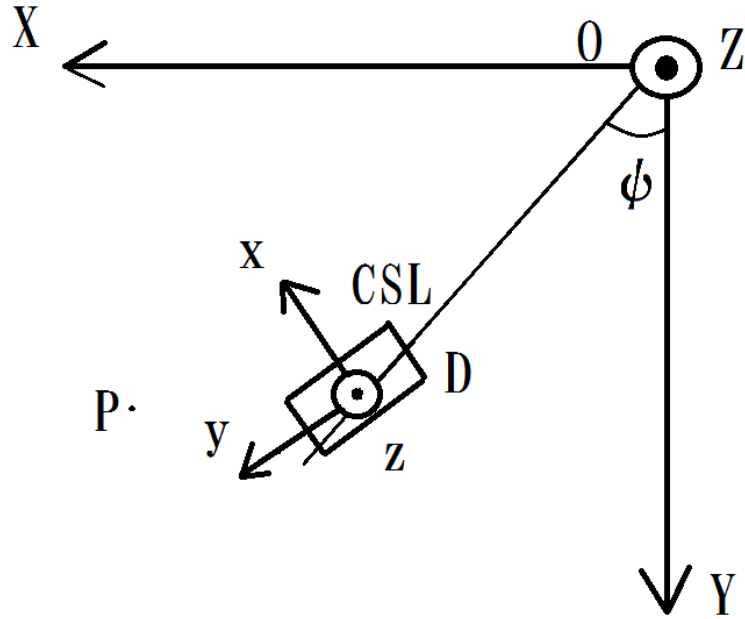


図 3-3-1.1 実験室系 (X, Y, Z) と CSL 系 (x, y, z) の関係。

以下、 ${}^t(x, y, z)$ や ${}^t(x, y)$ の t は転置を表す。したがって、 ${}^t(x, y, z)$ は列ベクトルを表す。図 3-3-1.1 のように実験室系(X,Y,Z)の原点を O、CSL の位置を D、D に対して静止している点を P とする。ただし、O、D、P は同一平面上 (Z=0) にあり、実験室系の Z 軸と CSL に固定された座標系 (CSL 系) の z 軸は常に一致しているものとする。実験室系での点 D および点 P の座標をそれぞれ ${}^t(X_D, Y_D)$ 、 ${}^t(X, Y)$ とする。点 P の CSL 系での座標を ${}^t(x, y)$ とすると、

$$\vec{OP} = \vec{OD} + \vec{DP} \quad (3-3-1.1)$$

が成り立ち、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \end{pmatrix} + R(-\psi) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.2)$$

と表される。 $R(\psi)$ は二次元回転行列

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (3-3-1.3)$$

であるので、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_D \\ Y_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.4)$$

が成り立つ。両辺を時間で微分すると、

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{X}_D \\ \dot{Y}_D \end{pmatrix} + \dot{\psi} \begin{pmatrix} -\sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & -\sin \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.5)$$

さらに微分すると、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \ddot{X}_D \\ \ddot{Y}_D \end{pmatrix} + \ddot{\psi} \begin{pmatrix} -\sin \psi & \cos \psi \\ -\cos \psi & -\sin \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \dot{\psi}^2 \begin{pmatrix} -\cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & -\cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \ddot{X}_D \\ \ddot{Y}_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\ddot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi}^2 \cos \psi & \ddot{\psi} \cos \psi - \dot{\psi}^2 \sin \psi \\ -\ddot{\psi} \cos \psi + \dot{\psi}^2 \sin \psi & -\ddot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi}^2 \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.6) \end{aligned}$$

が得られる。ここで、

$$\Psi_{11} = \Psi_{22} = -\ddot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi}^2 \cos \psi, \Psi_{12} = -\Psi_{21} = \ddot{\psi} \cos \psi - \dot{\psi}^2 \sin \psi$$

とおくと、

$$\begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ddot{X}_D \\ \ddot{Y}_D \end{pmatrix} + \Psi \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.7)$$

と表される。ここで、

$$\Psi = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} \end{pmatrix} \quad (3-3-1.8)$$

である。

また、CSL による加速度の測定値を (a_x, a_y) とすると、 g を重力加速度として、

$$\begin{pmatrix} \ddot{X}_D \\ \ddot{Y}_D \end{pmatrix} = R(-\psi) \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ g \end{pmatrix} \quad (3-3-1.9)$$

と表されるので、

(3-3-1.7)式は、

$$\begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} = R(-\psi) \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ g \end{pmatrix} + \Psi \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (3-3-1.10)$$

となる。

ここで、 a_x, a_y, g_z (それぞれ CSL による加速度と角速度の測定値) はすべて周期 τ とし、

$$\dot{\psi}(t) = g_z(t) \quad (3-3-1.11)$$

$$\psi(t) = \int_{t_0}^t g_z(u) du + \psi_0 \quad (3-3-1.12)$$

$$\ddot{\psi}(t) = \frac{1}{\Delta t} \{g_z(t + \Delta t) - g_z(t)\} \quad (3-3-1.13)$$

とする。 ψ_0 は CSL の点 O に対する初期角度、 Δt は微小時間である。

ここで、LMP の座標を周期時系列から求めるために加速度のゆらぎ $b(x, y)$ を計算する。これを最小にする点が LMP である。

$$\begin{aligned} b(x, y) &= \langle (\ddot{X} - \langle \ddot{X} \rangle)^2 \rangle + \langle (\ddot{Y} - \langle \ddot{Y} \rangle)^2 \rangle \\ &= \langle \ddot{X}^2 \rangle - \langle \ddot{X} \rangle^2 + \langle \ddot{Y}^2 \rangle - \langle \ddot{Y} \rangle^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.14)$$

$\langle \rangle$ は τ にわたる平均を表す。

(3-3-1.7) 式より、

$$\langle \ddot{X}^2 \rangle = \langle \ddot{X}_D^2 + \Psi_{11}^2 x^2 + \Psi_{12}^2 y^2 + 2\Psi_{11}\ddot{X}_D x + 2\Psi_{12}\ddot{X}_D y + 2\Psi_{11}\Psi_{12}xy \rangle \quad (3-3-1.15)$$

$$\langle \ddot{Y}^2 \rangle = \langle \ddot{Y}_D^2 + \Psi_{21}^2 x^2 + \Psi_{22}^2 y^2 + 2\Psi_{21}\ddot{Y}_D x + 2\Psi_{22}\ddot{Y}_D y + 2\Psi_{21}\Psi_{22}xy \rangle \quad (3-3-1.16)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} \langle \ddot{X}^2 \rangle + \langle \ddot{Y}^2 \rangle &= \langle \Psi_{11}^2 + \Psi_{21}^2 \rangle x^2 + \langle \Psi_{12}^2 + \Psi_{22}^2 \rangle y^2 + 2\langle \Psi_{11}\ddot{X}_D + \Psi_{21}\ddot{Y}_D \rangle x \\ &\quad + 2\langle \Psi_{12}\ddot{X}_D + \Psi_{22}\ddot{Y}_D \rangle y + \langle \ddot{X}_D^2 \rangle + \langle \ddot{Y}_D^2 \rangle \end{aligned} \quad (3-3-1.17)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{11}^2 + \Psi_{21}^2 \rangle &= \langle \ddot{\psi}^2 \sin^2 \psi + \dot{\psi}^4 \cos^2 \psi + 2\ddot{\psi}\dot{\psi}^2 \sin \psi \cos \psi + \ddot{\psi}^2 \cos^2 \psi \\ &\quad + \dot{\psi}^4 \sin^2 \psi - 2\ddot{\psi}\dot{\psi}^2 \sin \psi \cos \psi \rangle \\ &= \langle \ddot{\psi}^2 \rangle + \langle \dot{\psi}^4 \rangle \end{aligned} \quad (3-3-1.18)$$

$$= \langle \Psi_{12}^2 + \Psi_{22}^2 \rangle \quad (3-3-1.19)$$

また、

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{11}\ddot{X}_D + \Psi_{21}\ddot{Y}_D \rangle &= \langle (-\ddot{\psi} \sin \psi - \dot{\psi}^2 \cos \psi)(a_x \cos \psi + a_y \sin \psi) + (-\ddot{\psi} \cos \psi \\ &\quad + \dot{\psi}^2 \sin \psi)(-a_x \sin \psi + a_y \cos \psi + g) \rangle \\ &= \langle -a_x \dot{\psi}^2 - a_y \ddot{\psi} + g\Psi_{21} \rangle \\ &= -\langle a_x \dot{\psi}^2 \rangle - \langle a_y \ddot{\psi} \rangle + g\langle \Psi_{21} \rangle \end{aligned} \quad (3-3-1.20)$$

同様に、

$$\langle \Psi_{12}\ddot{X}_D + \Psi_{22}\ddot{Y}_D \rangle = \langle a_x \ddot{\psi} \rangle - \langle a_y \dot{\psi}^2 \rangle + g\langle \Psi_{22} \rangle \quad (3-3-1.21)$$

次に、

$$\begin{aligned} \langle \ddot{X}_D^2 \rangle + \langle \ddot{Y}_D^2 \rangle &= \langle (a_x \cos \psi + a_y \sin \psi)^2 \rangle \\ &\quad + \langle (-a_x \sin \psi + a_y \cos \psi + g)^2 \rangle \\ &= \langle a_x^2 \rangle + \langle a_y^2 \rangle - 2g(\langle a_x \sin \psi \rangle + \langle a_y \cos \psi \rangle) + g^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.22)$$

よって、(3-3-1.17) 式は、

$$\begin{aligned} \langle \ddot{X}^2 \rangle + \langle \ddot{Y}^2 \rangle &= (\langle \ddot{\psi}^2 \rangle + \langle \dot{\psi}^4 \rangle)(x^2 + y^2) + 2(-\langle a_x \dot{\psi}^2 \rangle - \langle a_y \ddot{\psi} \rangle + g\langle \Psi_{21} \rangle) \\ &\quad + 2(\langle a_x \ddot{\psi} \rangle - \langle a_y \dot{\psi}^2 \rangle + g\langle \Psi_{22} \rangle)y + \langle a_x^2 \rangle + \langle a_y^2 \rangle \end{aligned}$$

$$-2g(\langle a_x \sin \psi \rangle + \langle a_y \cos \psi \rangle) + g^2 \quad (3-3-1.23)$$

となる。

また、

$$\begin{aligned} \langle \ddot{X} \rangle^2 &= \langle \Psi_{11} \rangle^2 x^2 + \langle \Psi_{12} \rangle^2 y^2 + 2\langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{11} \rangle x + 2\langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{12} \rangle y \\ &\quad + 2\langle \Psi_{11} \rangle \langle \Psi_{12} \rangle xy + \langle \ddot{X}_D \rangle^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.24)$$

$$\begin{aligned} \langle \ddot{Y} \rangle^2 &= \langle \Psi_{21} \rangle^2 x^2 + \langle \Psi_{22} \rangle^2 y^2 + 2\langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{21} \rangle x + 2\langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{22} \rangle y \\ &\quad + 2\langle \Psi_{21} \rangle \langle \Psi_{22} \rangle xy + \langle \ddot{Y}_D \rangle^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.25)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{11} \rangle^2 + \langle \Psi_{21} \rangle^2 &= \langle \ddot{\psi} \sin \psi \rangle^2 + \langle \dot{\psi}^2 \cos \psi \rangle^2 + 2\langle \ddot{\psi} \sin \psi \rangle \langle \dot{\psi}^2 \cos \psi \rangle \\ &\quad + \langle \ddot{\psi} \cos \psi \rangle^2 + \langle \dot{\psi}^2 \sin \psi \rangle^2 - 2\langle \ddot{\psi} \cos \psi \rangle \langle \dot{\psi}^2 \sin \psi \rangle \\ &= \langle \Psi_{12} \rangle^2 + \langle \Psi_{22} \rangle^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.26)$$

より、

$$\begin{aligned} \langle \ddot{X} \rangle^2 + \langle \ddot{Y} \rangle^2 &= (\langle \Psi_{11} \rangle^2 + \langle \Psi_{21} \rangle^2)(x^2 + y^2) + 2(\langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{11} \rangle + \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{21} \rangle) \\ &\quad + 2(\langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{12} \rangle + \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{22} \rangle)y + 2(\langle \Psi_{11} \rangle \langle \Psi_{12} \rangle + \langle \Psi_{21} \rangle \langle \Psi_{22} \rangle)xy \\ &\quad + \langle \ddot{X}_D \rangle^2 + \langle \ddot{Y}_D \rangle^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.27)$$

ゆえに、(3-3-1.14)式は

$$\begin{aligned} b(x, y) &= (\langle \dot{\psi}^2 \rangle + \langle \dot{\psi}^4 \rangle - \langle \Psi_{11} \rangle^2 - \langle \Psi_{21} \rangle^2)(x^2 + y^2) \\ &\quad + 2(-\langle a_x \dot{\psi}^2 \rangle - \langle a_y \ddot{\psi} \rangle + g\langle \Psi_{21} \rangle - \langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{11} \rangle - \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{21} \rangle)x \\ &\quad + 2(\langle a_x \ddot{\psi} \rangle - \langle a_y \dot{\psi}^2 \rangle + g\langle \Psi_{22} \rangle - \langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{12} \rangle - \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{22} \rangle)y + \langle a_x^2 \rangle \\ &\quad + \langle a_y^2 \rangle + \langle \ddot{X}_D \rangle^2 + \langle \ddot{Y}_D \rangle^2 - 2g(\langle a_x \sin \psi \rangle + \langle a_y \cos \psi \rangle) + g^2 \end{aligned} \quad (3-3-1.28)$$

となり、

$$B_2 = \langle \dot{\psi}^2 \rangle + \langle \dot{\psi}^4 \rangle - \langle \Psi_{11} \rangle^2 - \langle \Psi_{21} \rangle^2 \quad (3-3-1.29)$$

$$B_{1x} = -\langle a_x \dot{\psi}^2 \rangle - \langle a_y \ddot{\psi} \rangle + g\langle \Psi_{21} \rangle - \langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{11} \rangle - \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{21} \rangle \quad (3-3-1.30)$$

$$B_{1y} = \langle a_x \ddot{\psi} \rangle - \langle a_y \dot{\psi}^2 \rangle + g\langle \Psi_{22} \rangle - \langle \ddot{X}_D \rangle \langle \Psi_{12} \rangle - \langle \ddot{Y}_D \rangle \langle \Psi_{22} \rangle \quad (3-3-1.31)$$

$$B_0 = \langle a_x^2 \rangle + \langle a_y^2 \rangle + \langle \ddot{X}_D \rangle^2 + \langle \ddot{Y}_D \rangle^2 - 2g(\langle a_x \sin \psi \rangle + \langle a_y \cos \psi \rangle) + g^2 \quad (3-3-1.32)$$

とおくと、

$$\begin{aligned} b(x, y) &= B_2(x^2 + y^2) + 2B_{1x}x + 2B_{1y}y + B_0 \\ &= B_2 \left\{ \left(x + \frac{B_{1x}}{B_2} \right)^2 + \left(y + \frac{B_{1y}}{B_2} \right)^2 \right\} + B_0 - \frac{B_{1x}^2}{B_2} - \frac{B_{1y}^2}{B_2} \end{aligned} \quad (3-3-1.33)$$

LMP はこれを最小にする点であるので、その点の座標 (x^*, y^*) は、

$$(x^*, y^*) = \left(-\frac{B_{1x}}{B_2}, -\frac{B_{1y}}{B_2} \right) \quad (3-3-1.34)$$

と求まる。また、LMP での加速度のゆらぎは、

$$\sqrt{b(x^*, y^*)} = \sqrt{B_0 - \frac{B_{1x}^2}{B_2} - \frac{B_{1y}^2}{B_2}} \quad (3-3-1.35)$$

となる。

3-3-2.LMP の理論振り子への適用

3-3-1 で導き出した LMP の理論式をもとにプログラムを組みその動作を確認し、精度を求める。まずは振り子に CSL が取り付けられた場合を想定する。LMP は動きの最も少ない点であるので、CSL が振り子に取りつけられた場合はその支点に対応する。言い換えると、振り子に取り付けられた CSL の時系列だけから CSL が振り子のどこに取り付けられたかを求めることを意味する。まず、最も単純な振り子のモデルとして実体振り子を考える。

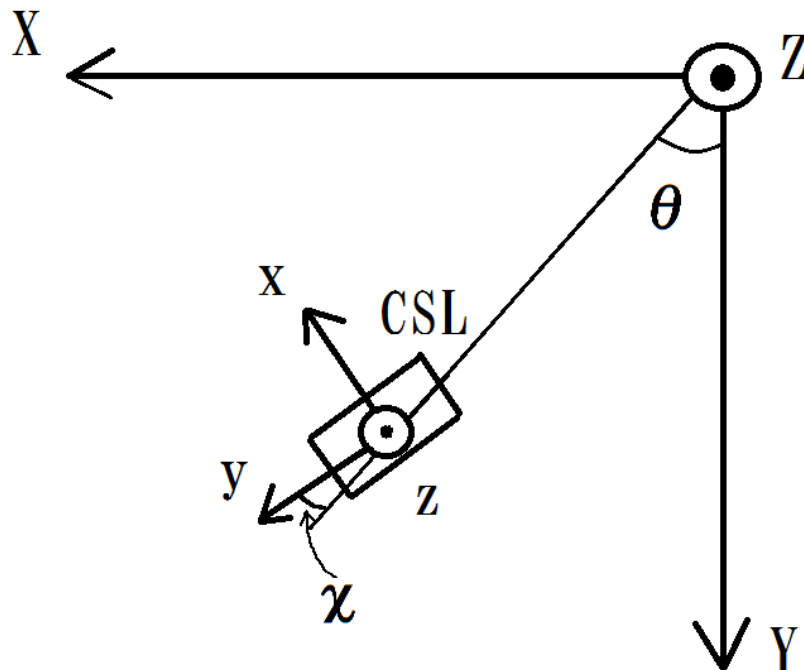


図 3-3-2.1 実験室系 (X, Y, Z) と CSL 系 (x, y, z) および角度 θ と取り付け角 χ の関係。

実験室系の座標軸 X, Y, Z と CSL に固定した座標軸 x, y, z をそれぞれ図 3-3-2.1 のように設定する。また、角度 θ は鉛直下向きを 0 とし、図 3-3-2.1 で z

軸の周りを反時計回りに回る方向を正にとる。このとき、CSL が出力する z 軸周りの角速度 g_z は

$$g_z = \dot{\theta} \quad (3-3-2.1)$$

に対応する。図 3-3-2.1 で θ は $-\frac{\pi}{2} < \theta < 0$ であることに注意。

実体振り子の運動方程式は、

$$\ddot{\theta} = -\frac{Mgl}{I} \sin \theta \quad (3-3-2.2)$$

で与えられる。

ただし、M: 質量[kg], $g = 9.8[m/s^2]$: 重力加速度,

l : 物体の重心と回転軸との距離[m], I : 慣性モーメント $[kg \cdot m^2]$ である。

ここで、振幅が十分小さい時を考えると、

$$|\theta| \ll 1$$

より、

$$\ddot{\theta} \approx -\frac{Mgl}{I} \theta \quad (3-3-2.3)$$

と近似できる。

$t = 0$ のとき、 $\dot{\theta} = 0$ とすると、

$$\theta = \theta_0 \cos \omega t$$

$$\dot{\theta} = -\omega \theta_0 \sin \omega t$$

$$\ddot{\theta} = -\omega^2 \theta_0 \cos \omega t$$

$$\omega = \sqrt{\frac{Mgl}{I}}, \quad \theta_0: \text{初期角度} \quad \text{である。}$$

ここで、CSL の取り付け位置を実験室系の原点から $h[m]$ 、取り付け角を χ とすると、CSL の実験室系での座標は、

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -h \sin \theta \\ h \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3-3-2.4)$$

より、二回微分すると、

$$\begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h\dot{\theta}^2 \sin \theta - h\ddot{\theta} \cos \theta \\ -h\dot{\theta}^2 \cos \theta - h\ddot{\theta} \sin \theta \end{pmatrix} \quad (3-3-2.5)$$

より、CSL が観測するであろう加速度 a_x 、 a_y は、

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta + \chi) & \sin(\theta + \chi) \\ -\sin(\theta + \chi) & \cos(\theta + \chi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{pmatrix} \\
&\quad + \begin{pmatrix} \cos(\theta + \chi) & \sin(\theta + \chi) \\ -\sin(\theta + \chi) & \cos(\theta + \chi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \ddot{X} \cos(\theta + \chi) + \ddot{Y} \sin(\theta + \chi) - g \sin(\theta + \chi) \\ -\ddot{X} \sin(\theta + \chi) + \ddot{Y} \cos(\theta + \chi) - g \cos(\theta + \chi) \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} -h\dot{\theta}^2 \sin \chi - h\ddot{\theta} \cos \chi - g \sin(\theta + \chi) \\ -h\dot{\theta}^2 \cos \chi + h\ddot{\theta} \sin \chi - g \cos(\theta + \chi) \end{pmatrix} \quad (3-3-2.6)
\end{aligned}$$

ゆえに、CSL が観測する時系列は

$$a_x = 1/9.8(-h\dot{\theta}^2 \sin \chi - h\ddot{\theta} \cos \chi - g \sin(\theta + \chi))[G] \quad (3-3-2.7)$$

$$a_y = 1/9.8(-h\dot{\theta}^2 \cos \chi + h\ddot{\theta} \sin \chi - g \cos(\theta + \chi))[G] \quad (3-3-2.8)$$

$$g_z = 180\dot{\theta}/\pi[deg/s] \quad (3-3-2.9)$$

である。

これら(3-3-2.7), (3-3-2.8), (3-3-2.9)式のパラメータにそれぞれ具体的な値を入れた a_x 、 a_y 、 g_z を用いて LMP を求めた結果、CSL 系での支点の座標 $(h \sin \chi, -h \cos \chi)$ を求めることができる。

3-3-3.実際の振り子への適用

CSL を実際の振り子に取り付け、得られた時系列に LMP を求めるプログラムを適用することで支点の位置を精度よく推定できることを示す。本実験では、chaotic pendulum 社製の二重振り子で二番目の回転軸を固定したものを使用した。図 3-3-3.1 に CSL を振り子に取り付けた時の様子と測定により得られた加速度時系列および角速度時系列の一部データを示す。LMP から求める支点の位置の精度をチェックするために、画像だけから支点の位置を求める。具体的な方法は以下の通りである。支点の位置 (x_f, y_f) は、振り子の傾け具合の異なる 3 枚の写真を ImageJ を用いて画像解析することにより CSL 上のマーカー A の座標 (x_A, y_A) を特定し、3 点の外心から 2 点間の垂直二等分線をそれぞれ求め、その交点の座標から求める。また、CSL から支点までの距離 l' と角度 ϕ' は支点とマーカー A の座標からそれぞれ求める (式 3-3-3.1、3-3-3.2)。角度 ϕ' は支点とマーカー A、もう一つのマーカー B (x_B, y_B) から画像解析により再度求め、間違いがないかを確認した。ここで、マーカー A、B はそれぞれ CSL の加速度、角速度の時系列を測定している部分と、そこから CSL の側面と平行になるような直線の延長線上にとった。

$$l' = \sqrt{(x_f - x_A)^2 + (y_f - y_B)^2} \quad (3-3-3.1)$$

$$\phi' = \tan^{-1}(y_f - y_A / x_f - x_A) \quad (3-3-3.2)$$

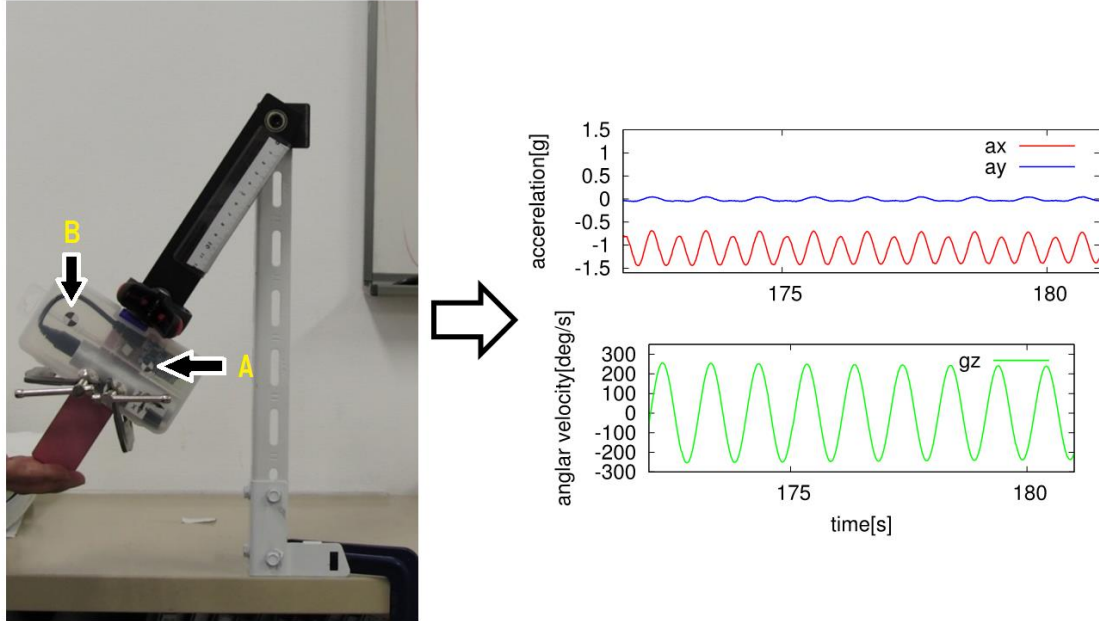


図 3-3-3.1 CSL の振り子への装着図およびマーカーA、B（左）と取得した加速度時系列および角速度時系列（右）。

また、測定は CSL を図 3-3-3.1 のように取り付けた場合と約 45° 傾けて取り付けた場合の 2 つの状態において、それぞれ振幅を小（約 5° ）、中（約 45° ）、大（約 90° ）の 3 パターンに分けて振り子を振り、計 6 パターン行った。

その結果を図 3-3-3.2 に示す。左のグラフにおいて、横軸は写真の画像解析から得られた CSL から LMP までの距離 l' 、縦軸は LMP 解析により得られた CSL から LMP までの距離 $l^* = \sqrt{x^{*2} + y^{*2}}$ を表す。右のグラフにおいて、横軸は写真の画像解析から得られた CSL から見た LMP の角度 ϕ' 、縦軸は LMP 解析により得られた CSL から見た LMP の角度 $\phi^* = \text{atan}(y^*/x^*)$ を表す。図より、時系列から求めた LMP と画像から求めた支点は角度や距離によらず、精度よく求められていることがわかる。具体的な誤差として、CSL から LMP までの距離の誤差 Δl 、角度の誤差 $\Delta \phi$ はそれぞれ $|\Delta l| < 5\text{mm}$ 、 $|\Delta \phi| < 2\text{deg}$ となった。

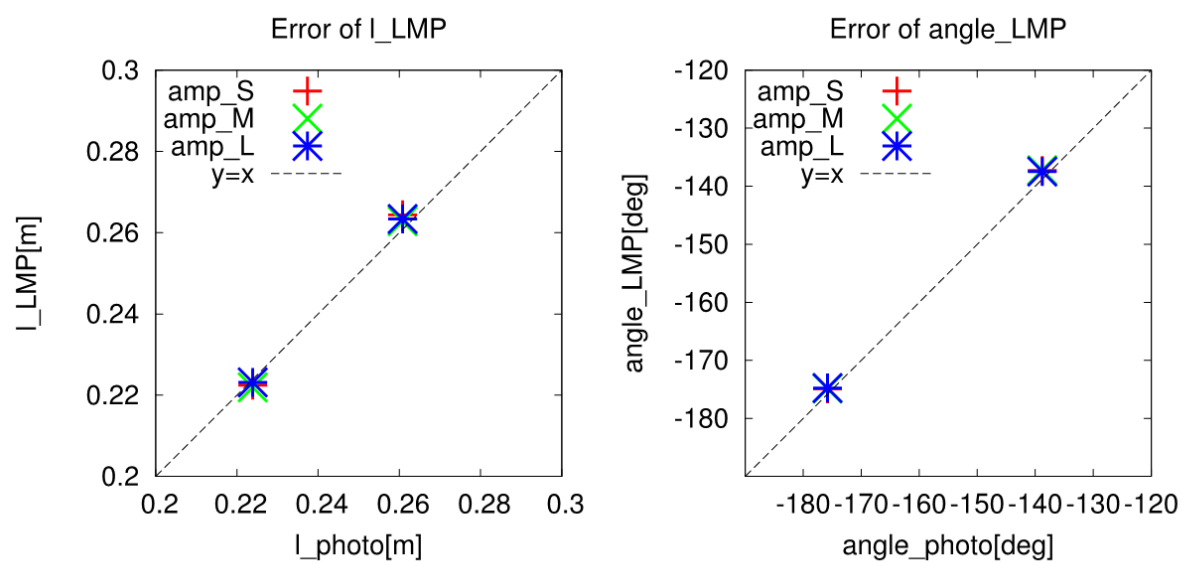


図 3-3-3.2 LMP と画像から求めた支点までの長さ（左）、角度（右）との誤差。

4.結果

本章では解析結果を紹介する。4-1 節ではプロトコル A、B および C を用いた測定の解析結果、4-2 節では歩行・走行転移におけるヒステリシス、4-3 節では歩行時・走行時それぞれにおける LMP の位置の分布、4-4 節では測定回数とトレッドミルに対する慣れの関係性、4-5 節ではトレッドミルの速度変化時間とヒステリシスの関係性についてまとめている。

4-1.解析結果

4-1-1.プロトコル A

以下の図 4-1-1.1 に示すようなトレッドミルの表示速度 v の速度変化を与えるプロトコル A に従い測定した、典型的な被験者の解析結果を図 4-1-1.2 に示す(すべての被験者の解析結果は付録を参照)。横軸はすべて共通でトレッドミルの実際の速度 V を表し、縦軸は上から順に、各窓における周期[s] (a)、加速度の上下成分 (x 成分) の最大値[G] (b)、CSL から見た LMP の角度[deg] (c)、距離[m] (d) を表す。また、グラフ内右上の記号はサンプル番号とトライアル番号を表す。例えば、S4-3 はサンプル番号 4 番の 3 回目のトライアルを表す。ところどころデータが飛んでいるのは相関関数のピークの値が設けた周期性の閾値 (0.6) を下回ったためであり、周期性が乱れる歩行・走行間の転移前後に多く見られる。

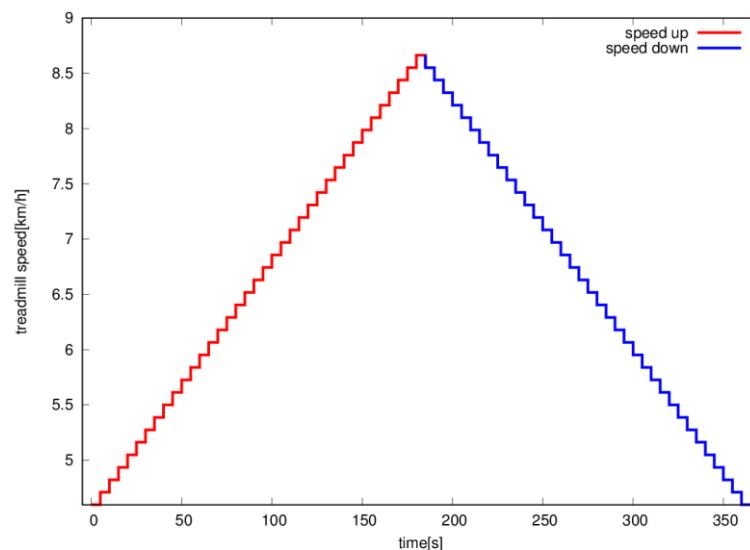
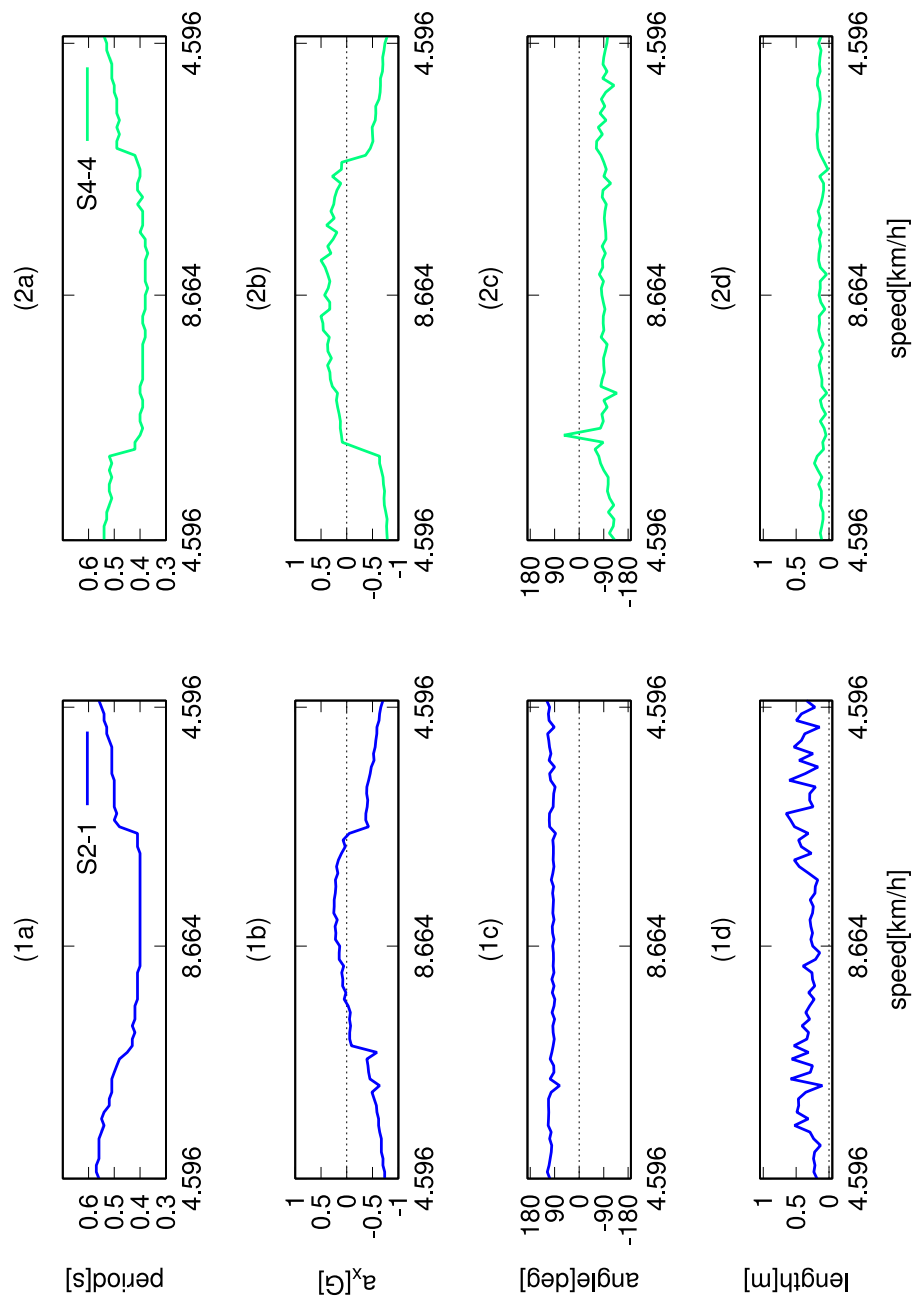


図 4-1-1.1 プロトコル A におけるトレッドミルの実際の速度の変化。



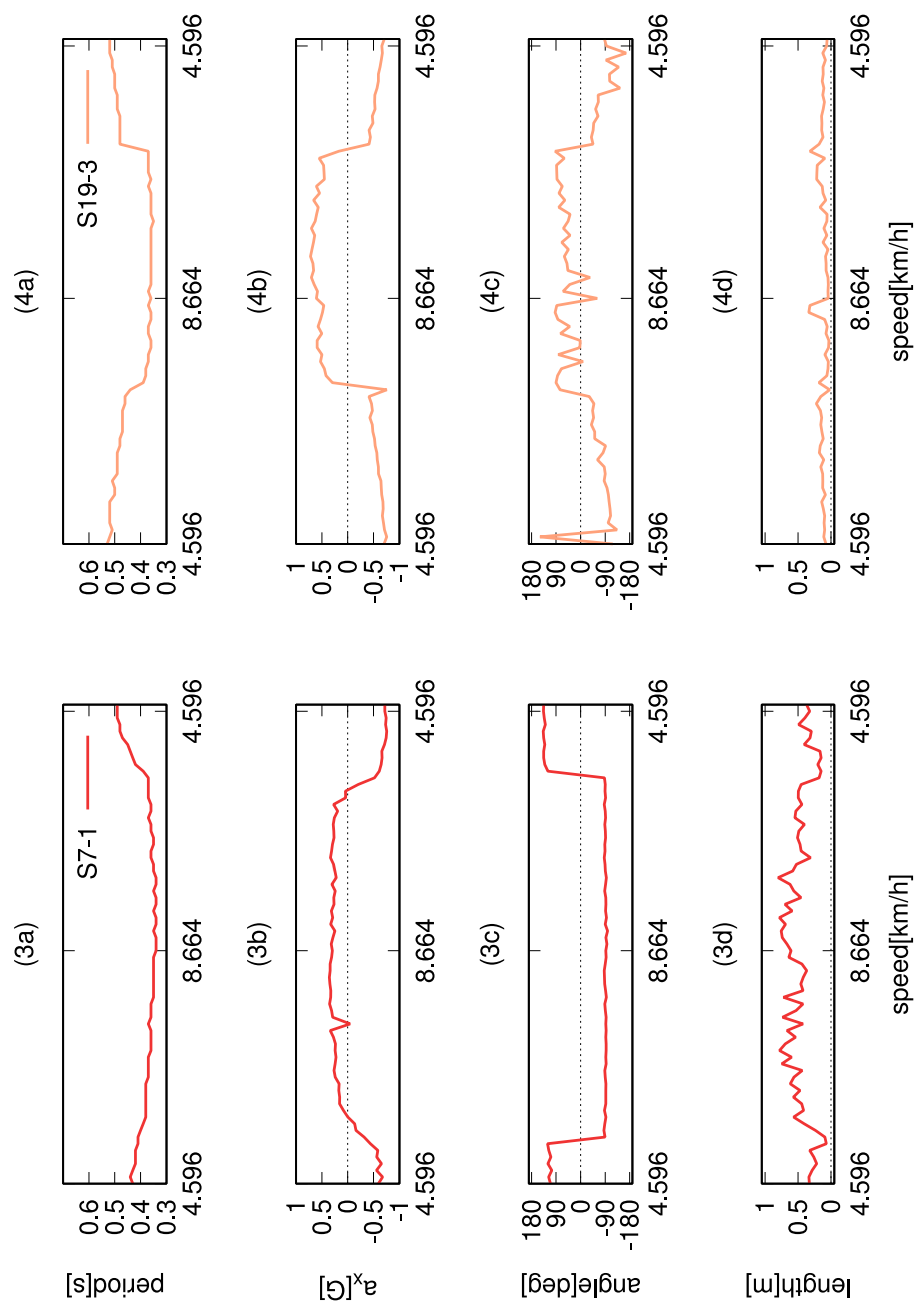


図 4-1-1.2 プロトコル A の代表的なサンプル 4 つの各窓における周期 (a)、加速度上下成分の最大値 (b)、LMP までの角度 (c)、距離 (d) とトレッドミルの速度との関係

CSL 座標系での LMP の角度 ϕ は右の図 4-1-1.3 に図示したように取られている。すなわち、 $0^\circ < \phi < 180^\circ$ であれば LMP は被験者の前方にあり、対して $-180^\circ < \phi < 0^\circ$ であれば LMP は被験者の後方にあるということを意味する。

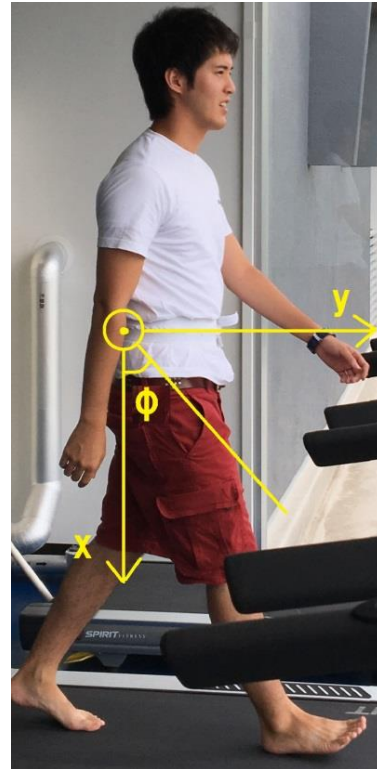


図 4-1-1.3 CSL から見た LMP の角度 ϕ の対応図。

これらの結果から、周期および加速度の上下成分の最大値が個人差こそあれほぼすべてのサンプルにおいて、急激に変化している速度領域が存在していることが見て取れる。その速度領域において、それぞれ歩行から走行への転移（以下 W-R 転移）、走行から歩行への転移（以下 R-W 転移）が起きていると考えられる。ただし、S12-1 のように、他のデータに比べ歩行から走行への転移が緩やかに見える（付録 A (22a)、(22b) 参照）ものもある。これは、S11～S18 の測定において時間の関係上、測定前のトレッドミル上での運動に慣れてもらう時間が十分に取れなかったことが原因ではないかと考えられる。そのため S12 は測定の開始直後から走行のような運動をしているように見て取れた。

また、CSL から見た LMP の角度について、その特徴を大きく 4 つのグループに分類することができる。次の図 4-1-1.4 に縦軸、横軸をそれぞれ走行時、歩行時における CSL から見た LMP の角度とし、走行時と歩行時のそれぞれに対して各サンプルの CSL から見た LMP の角度の平均をプロットしたものを示す。このグラフからそれぞれ第一象限、第二象限、第三象限、第四象限が次のグループ 1～4 に対応する。また、すべての被験者に適用したグラフも図 4-1-1.5 に示す。
グループ 1：歩行中、走行中ともに LMP が被験者の前方にある（S2,S3,S12）。
グループ 2：歩行中 LMP は後方にあるが、走行中は前方にある（S19）。

グループ3: 歩行中、走行中ともにLMPが被験者の後方にある(S4,S10,S14,S16)。
 グループ4: 歩行中LMPは前方にあるが、走行中は後方にある(S1,S5,S6,S7,S8,S9, S11,S13,S15,S17,S18,S20,S21)。

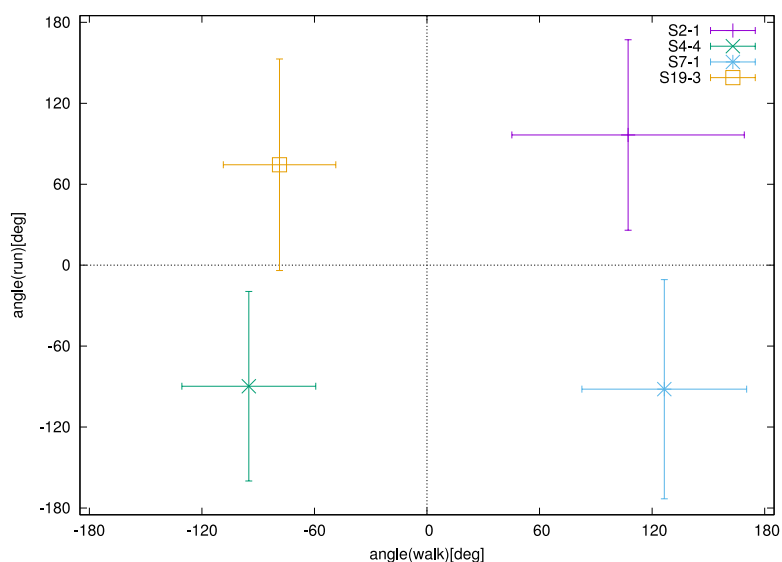


図 4-1-1.4 代表的なサンプルにおける歩行時と走行時の CSL から見た LMP の角度の平均値

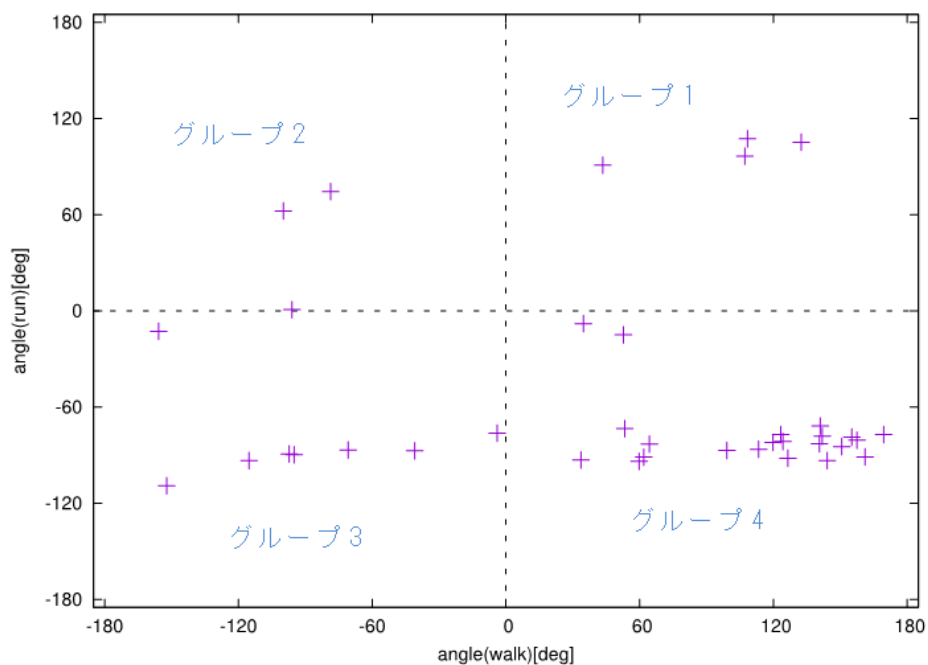


図 4-1-1.5 すべてのサンプルにおける歩行時と走行時の CSL から見た LMP の角度の平均値

このように多くのサンプルはグループ 4 に属しているのに対し、グループ 2 に属するのは 21 人中 1 人のみであった。また、各被験者の運動経歴などの情報から、グループ 1 に属する人は長距離運動を得意とする傾向あることがわかった。

また、走行中の方が歩行中に比べ安定した値をとっていることがわかる。これは加速度のゆらぎが歩行よりも走行の方が大きい（図 4-1-1.5 参照）という結果とは逆であり、何か関係しているものがあるのかもしれない。ただし、どのような運動状態の違いがこのような LMP の位置の結果を招くのかはまだ明らかにできていない。

4-1-2. プロトコル B、C

測定に協力してくれた被験者のうち、トレッドミルを初めて使うという被験者が多く見られた。そのため、プロトコル B および C は被験者にトレッドミル上での運動に慣れてもらうために設けた。測定方針の変更や時間の都合上、プロトコル B と C での測定を実施できなかった被験者もいるが、実施できた被験者に関しては、ウォーミングアップを兼ねて他のプロトコルよりも先にプロトコル B、C の順に測定を行った。また、プロトコル B および C はそれぞれ一定のトレッドミル速度における歩行、走行の時系列を取得するものであり、その速度はプロトコル A におけるトレッドミル速度の最小値と最大値に対応している。ゆえに、プロトコル A と比較をすることにより、一定速度における運動と増速または減速に伴う運動の共通点や相違点を明らかにするという目的もある。図の 4-1-2.1 にプロトコル B と C における各窓の周期、加速度上下成分の最大値、CSL から見た LMP までの角度および距離の典型的なグラフを示す。これらのグラフから、歩行時・走行時ともに各値がほぼ一定の値をとっていることがわかる。

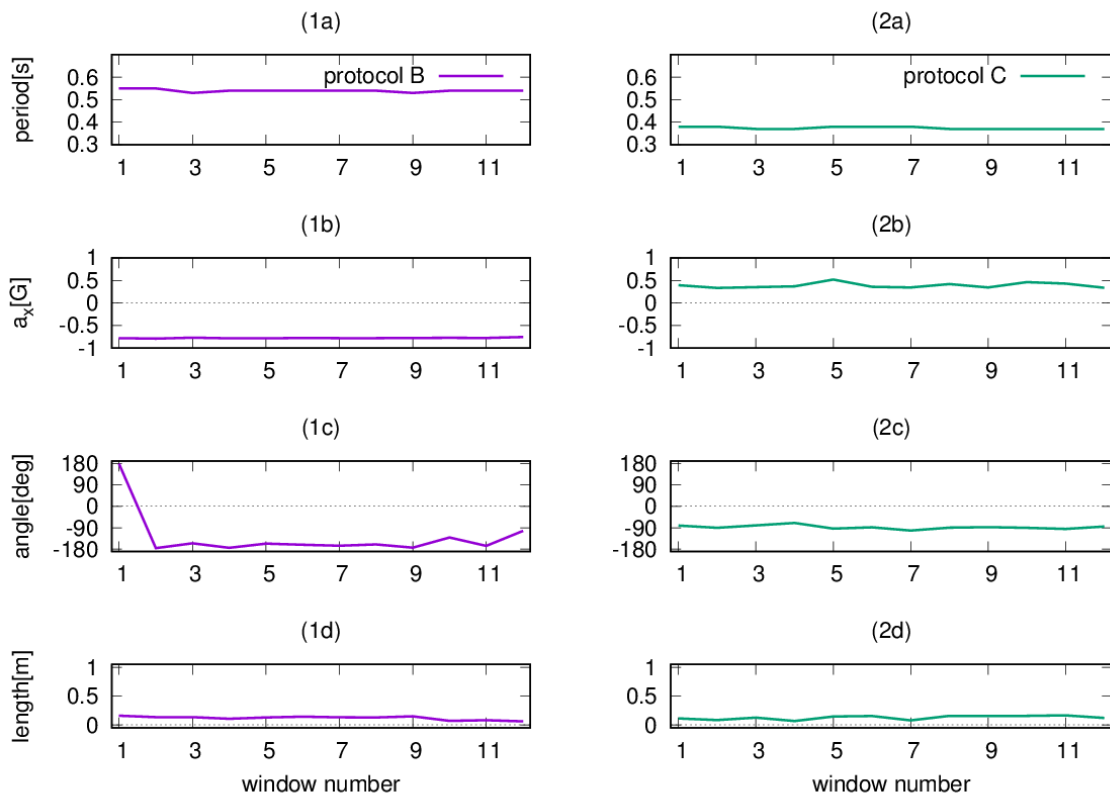


図 4-1-2.1 プロトコル B (左) と C (右) における各窓の周期 (a)、加速度上下成分の最大値 (b)、LMP までの角度 (c)、距離 (d)。

4-2. ヒステリシス

プロトコル A において、W-R 転移した直後の点における速度 V_{W-R} と、R-W 転移した直後の点における速度 V_{R-W} との差 (ヒステリシス) を ΔV とする。

$$\Delta V = V_{W-R} - V_{R-W} \quad (4-2.1)$$

例として S1 の周期のグラフ (図 4-1-1.2, 1a) をトレッドミルの速度の最大値で折り返したグラフを図 4-2.1 に示す。

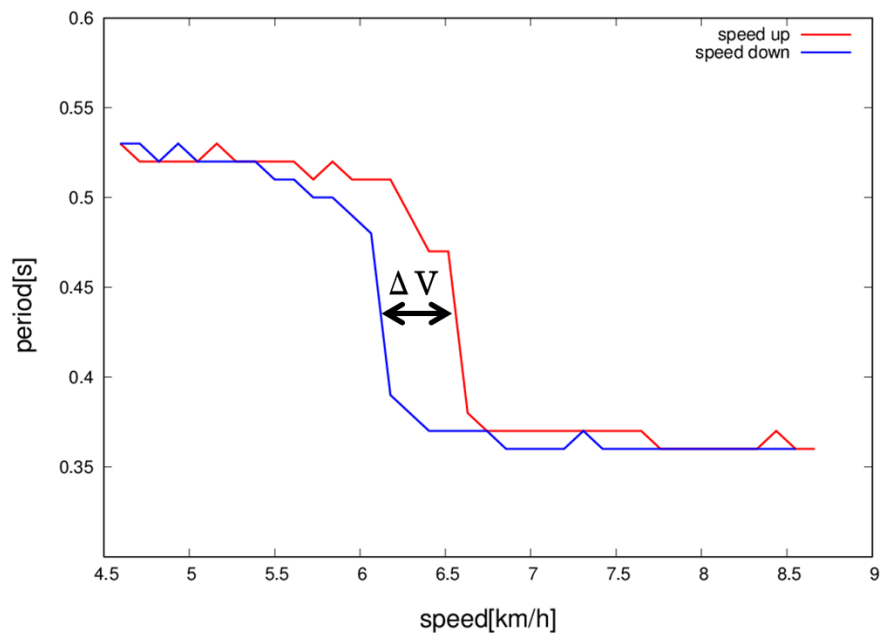


図 4-2.1 プロトコル A における S1 の周期のグラフにおけるヒステリシス。

ここで、W-R、R-W 転移それぞれにおいて、歩行と走行を分けるため、

I : 各窓における周期のプロトコル A での最大値と最小値の平均値 T_c

II : 各窓における加速度の上下成分 (x 成分) の平均時系列のプロトコル A での最大値と最小値の平均値 a_{xc}

という値を用いた 2 種類の判断基準を設けた。判断基準 I は閾値 T_c よりも大きい周期の値をとる領域を歩行、小さい値を取る領域を走行とし、判断基準 II は閾値 a_{xc} よりも大きい加速度上下成分の最大値をとる領域を走行、小さい値を取る領域を歩行とした。二種類設けた理由は、歩行と走行を分ける要因が自明でないためである。次節以降で歩行・走行状態での違いを述べる場合に判断基準 I・II を用いるが、結果は判断基準にそれほど依存しない。例として、被験者 S1 の場合を以下の図 4-2.2、4-2.3 に示す。W-R と R-W の速度差は、判断基準 I の場合 $\Delta V = 0.5 \text{ km/h}$ 、判断基準 II の場合も $\Delta V = 0.5 \text{ km/h}$ となる。

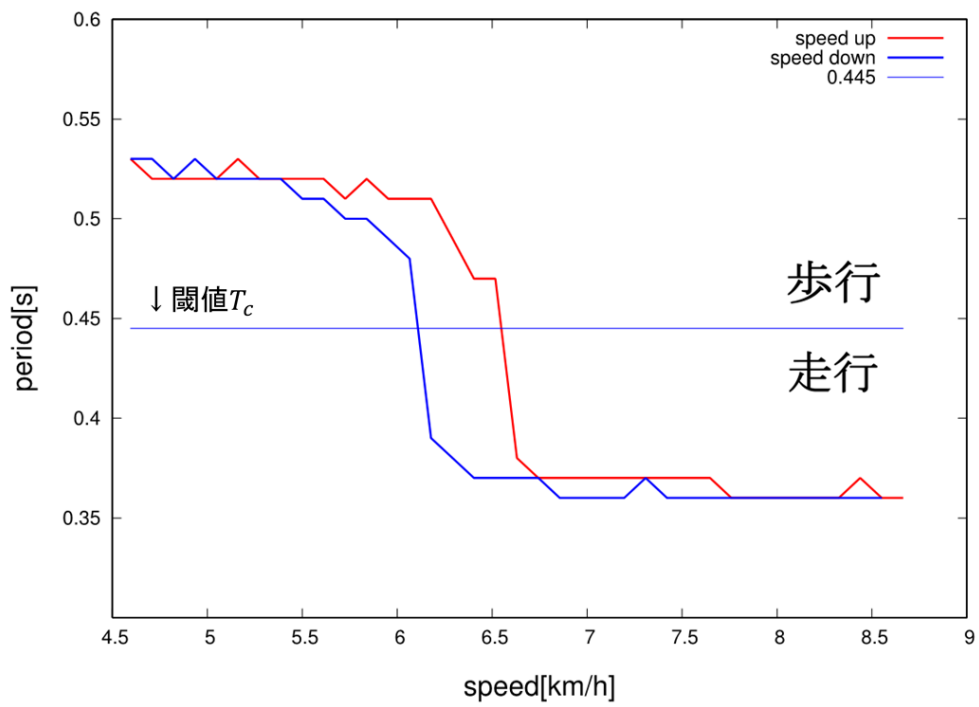


図 4-2.2 閾値 T_c により歩行と走行に分けた周期とトレッドミル速度のグラフ。

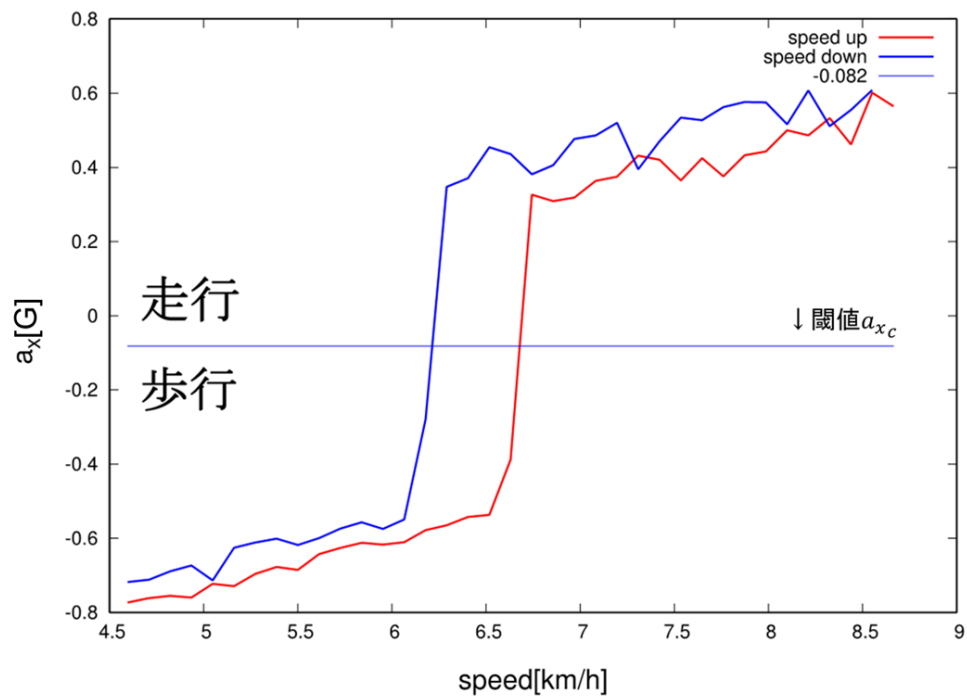


図 4-2.3 閾値 a_{xc} により歩行と走行に分けた加速度上下成分の最大値とトレッドミル速度のグラフ。

また、これらの判断基準 I、II を全てのサンプルに適用し、歩行と走行を分け、ヒステリシスの大きさを分布図にしたものを次の図 4-2.4 に示す。凡例における axmax は閾値 a_{xc} 、period は閾値 T_c を使用したことを表す。ヒステリシスの大きさの平均値と標準偏差はそれぞれ、閾値 T_c を用いた場合 $\Delta V = 0.4514 \pm 0.4968 \text{ km/h}$ 、閾値 a_{xc} を用いた場合 $\Delta V = 0.5054 \pm 0.6212 \text{ km/h}$ となった。これらのことから、どちらも 0 を標準偏差内に含むものの、正の値を取るサンプルが多いことがわかる。これは、W-R 転移よりも R-W 転移の方が小さい速度領域で起こる、すなわち走りたくなる速度よりも歩きたくなる速度の方が小さいということを意味する。

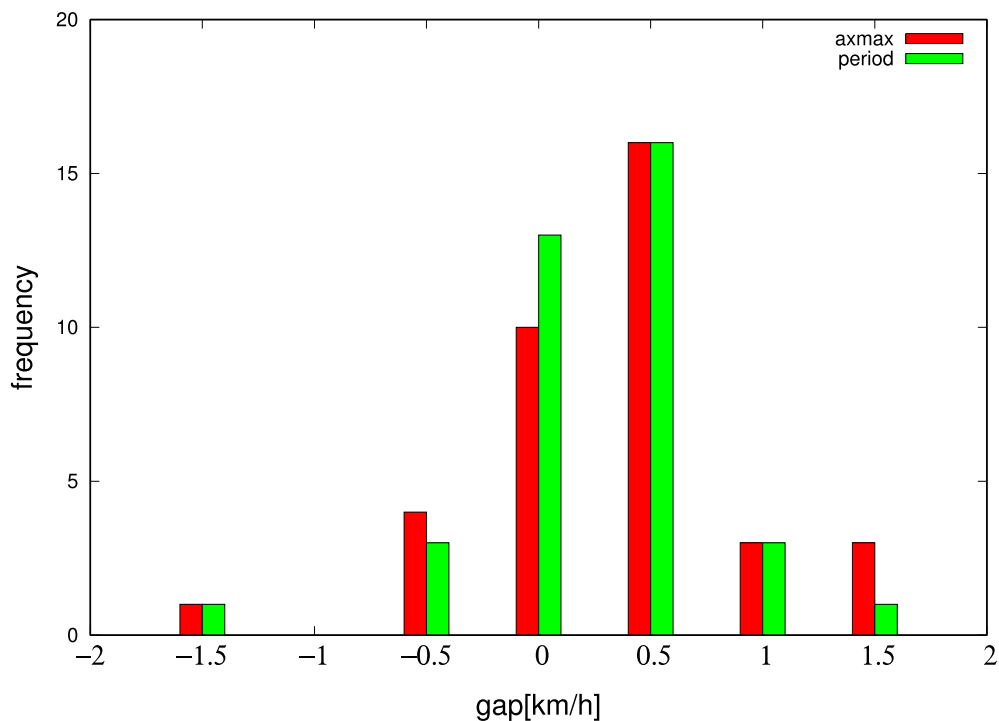


図 4-2.4 閾値 T_c 、 a_{xc} を用いたヒステリシスの大きさの分布図。

また、W-R 転移、R-W 転移がそれぞれ起こる速度を V_{W-R} 、 V_{R-W} とする。図 4-2.5、4-2.6 にそれぞれ閾値 T_c 、 a_{xc} を用いた場合の V_{W-R} 、 V_{R-W} の分布図を示す。

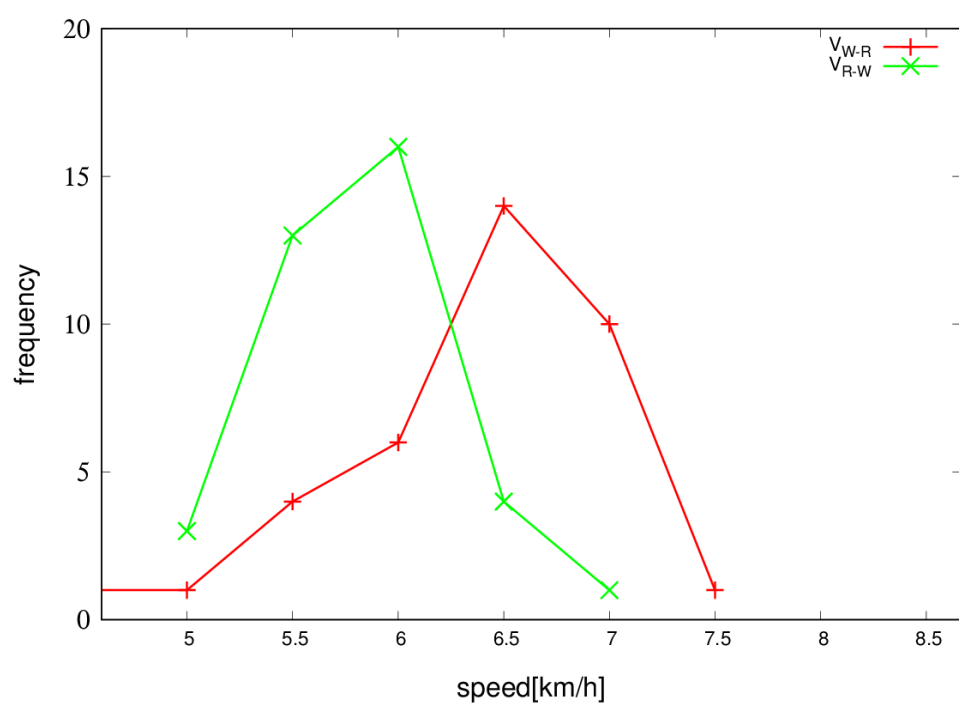


図 4-2.5 閾値 T_c を用いた V_{W-R} 、 V_{R-W} の分布図。

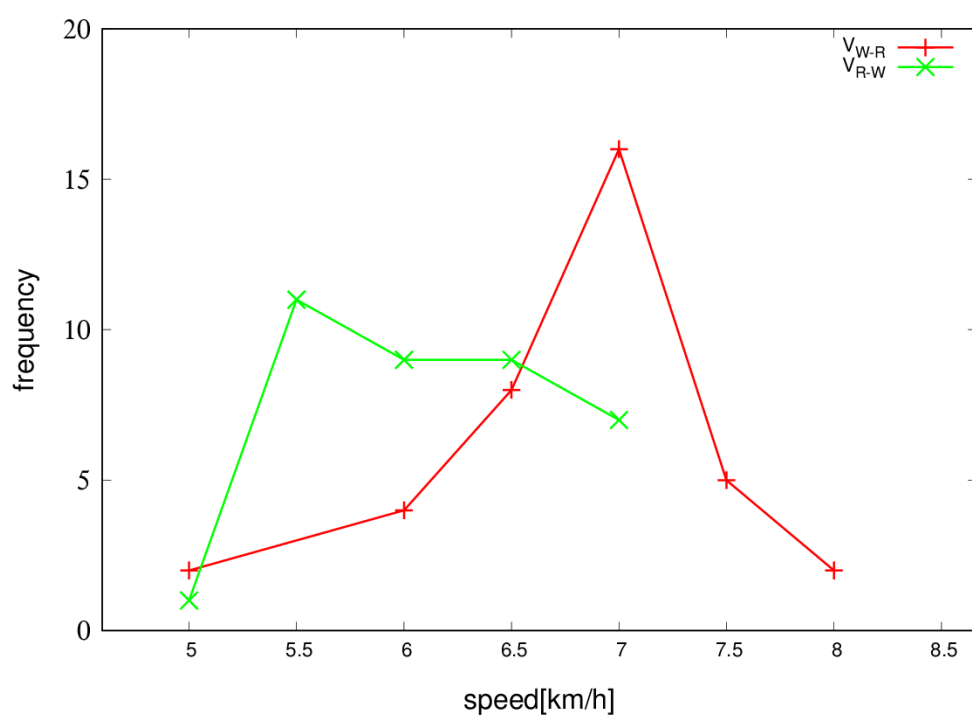


図 4-2.6 閾値 a_{x_c} を用いた V_{W-R} 、 V_{R-W} の分布図。

閾値 T_c を用いた場合の転移速度は $V_{W-R} = 6.60 \pm 0.607$ km/h、 $V_{R-W} = 6.12 \pm 0.448$ km/h となった。また、閾値 a_{xc} を用いた場合の転移速度は $V_{W-R} = 7.02 \pm 0.642$ km/h、 $V_{R-W} = 6.44 \pm 0.544$ km/h であった。これら V_{W-R} の値は Diedrich と Warren の先行研究[2]の結果である 2.07m/s (=7.452km/h)に比べると小さい。

4-3.LMP の位置の分布

CSL から見た LMP の角度に関して、4-2 節の閾値 T_c 、 a_{xc} それぞれを用いた場合の分布図を図 4-3.1、4-3.2 に示す。どちらのグラフも緑の線が歩行、赤の線が走行を表す。これらのどちらのグラフからも、走行において -90° 付近に大きなピーク、 90° 付近に小さなピークが見られ、歩行においては -90° と 90° 付近に小さなピークが見られる。このことから LMP の位置がそれぞれ CSL の後方、前方に偏っていることがわかる。

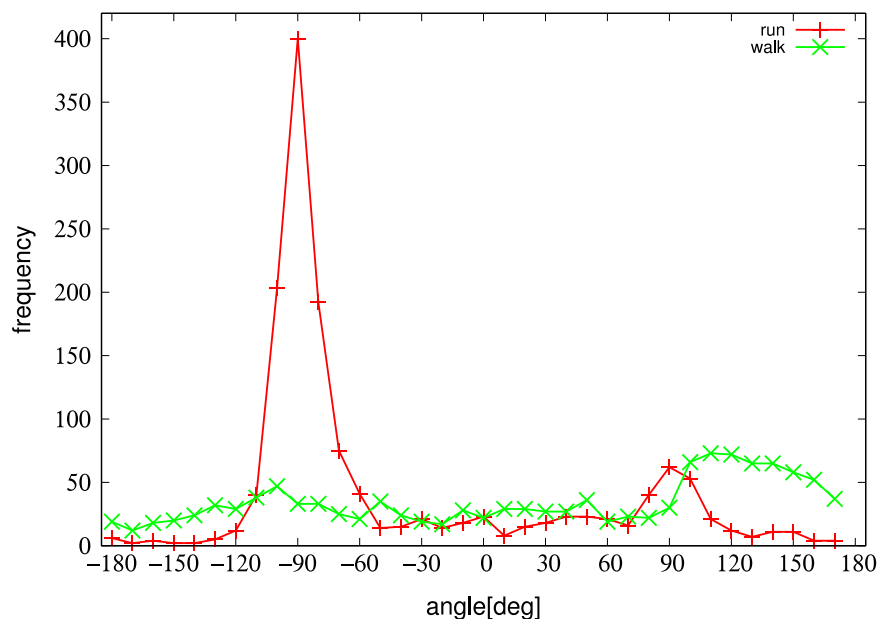


図 4-3.1 閾値 T_c を用いた CSL から見た LMP の角度の分布図。

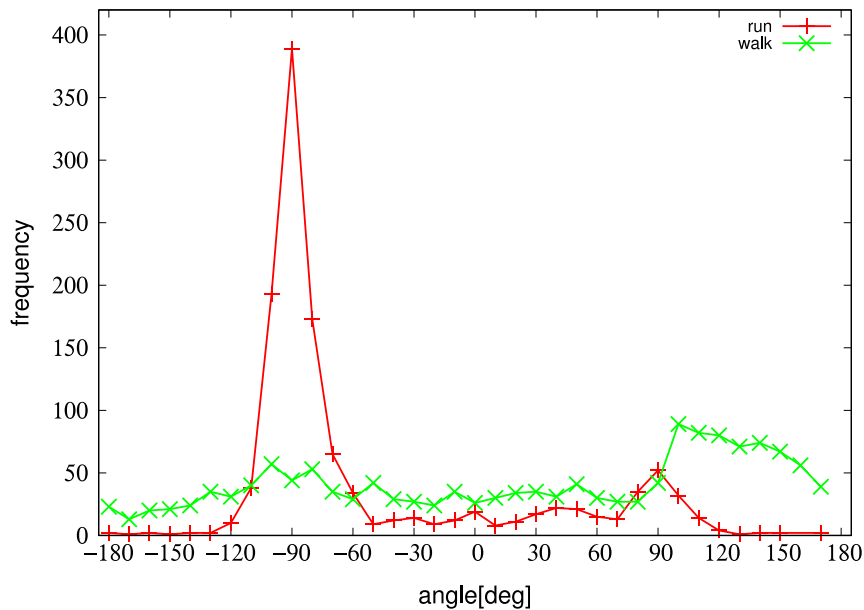


図 4-3.2 閾値 a_{x_c} を用いた CSL から見た LMP の角度の分布図。

次に、CSL から LMP までの距離を同様に閾値 T_c 、 a_{x_c} それぞれを用いた場合の分布図を次の図 4-3.3、4-3.4 に示す。どちらのグラフにおいても CSL から LMP までの距離は歩行よりも走行の方が大きいことが見て取れる。この事から走行中における LMP の位置は歩行中に比べ被験者の体から遠い場所にあると考えられる。

また、これらの結果と 4-2 節の結果から、閾値 T_c 、 a_{x_c} どちらを用いた結果も大きくは変わらないことから、歩行と走行を分ける閾値を T_c 、 a_{x_c} どちらにしても結果には大きく影響しないことが分かった。したがって、以後は閾値 T_c を使用することにする。

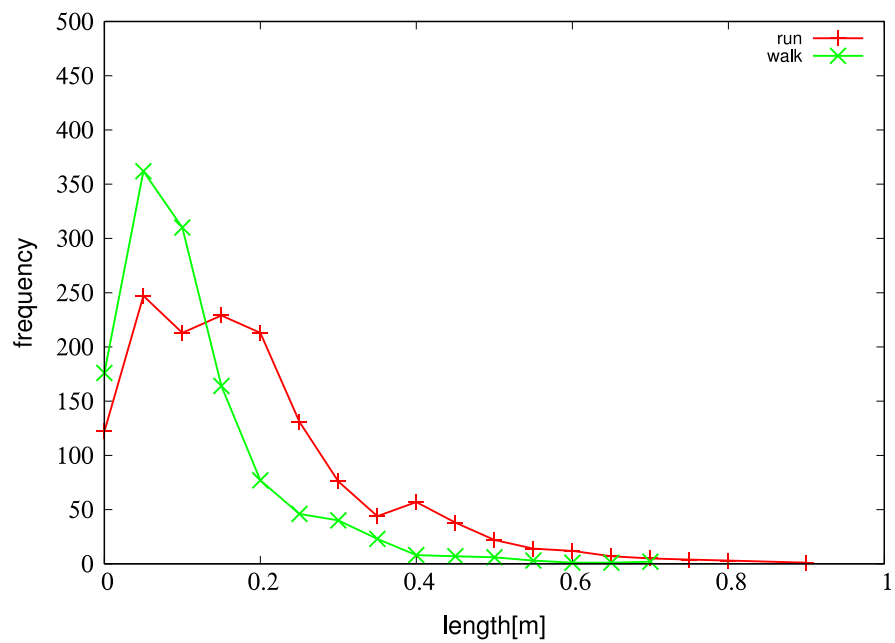


図 4-3.3 閾値 T_c を用いた CSL から LMP までの距離の分布図。

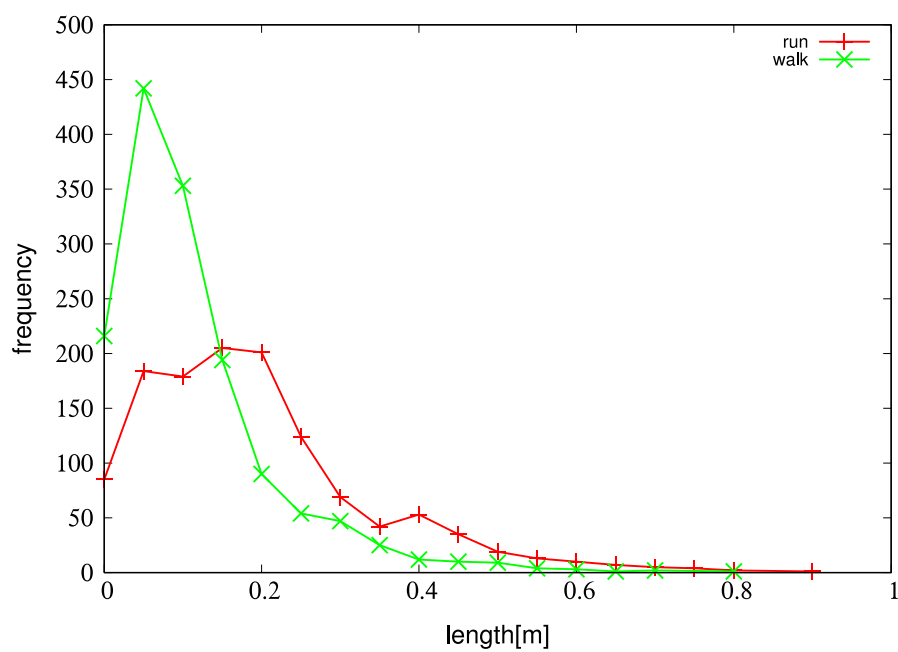


図 4-3.4 閾値 a_{x_c} を用いた CSL から LMP までの距離の分布図。

図 4-3.5 に(3-3-1.35)式で表される加速度のゆらぎの分布図を示す。このグラフから加速度のゆらぎは歩行中よりも走行中の方が圧倒的に大きいのが見て取れる。これは歩行、走行の運動状態の激しさの違いから見ても容易に推測できる結果のように思える。しかし 4-2 節で述べたように CSL から見た LMP の角度は、走行中の方が歩行中に比べ安定した値をとっている。この理由を明らかにする事が今後の課題の一つである。

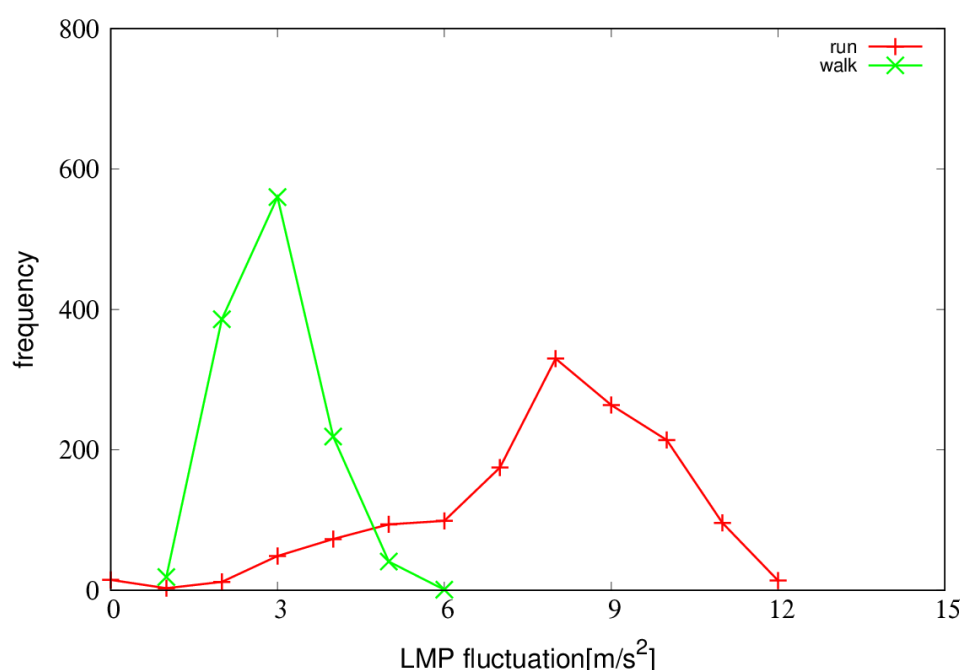


図 4-3.5 閾値 T_c を用いた加速度のゆらぎの分布図。

4-4.測定回数（トライアル）の増加に伴うトレッドミルへの慣れ

プロトコル A での測定を複数回行ったサンプルがいくつかあり、それらのデータを用い測定回数とヒステリシスの大きさの関係を調べた。以下に横軸を測定回数（トライアル回数）、縦軸にヒステリシスの大きさをとったグラフ（図 4-4.1）を示す。黒色の太丸平均値、太線は標準偏差の範囲を表す。また閾値は閾値 T_c を使用している。

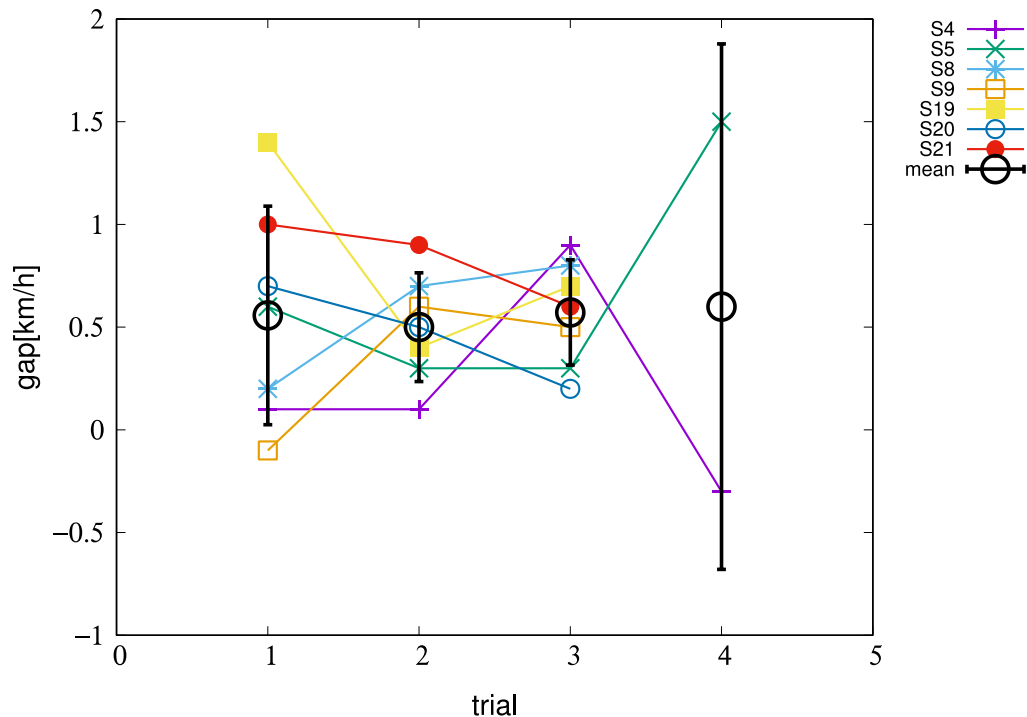


図 4-4.1 トライアル回数とヒステリシスの大きさの関係。

結果としてトライアル回数はヒステリシスの大きさにそれほど影響しないという事がわかった。同時に、トレッドミルに対する慣れとヒステリシスにもそれほど関係がないのではないかと考えられる。

4-5.トレッドミルの速度変化時間とヒステリシスの関係

トレッドミルに速度変化を与える時間間隔とヒステリシスの大きさを調べるため、プロトコル A での測定に加えプロトコル D、E の測定を行なったサンプルについて、横軸に時間間隔、縦軸にヒステリシスの大きさをとったグラフ（図 4-5.1）を示す。黒色の太丸は平均値、太線は標準偏差の範囲を表す。また閾値は閾値 T_c を使用し、S4 と S5 に関しては時間間隔 5 s（プロトコル A）におけるヒステリシスの大きさとして 4 回分のトライアルの平均値を使用している。

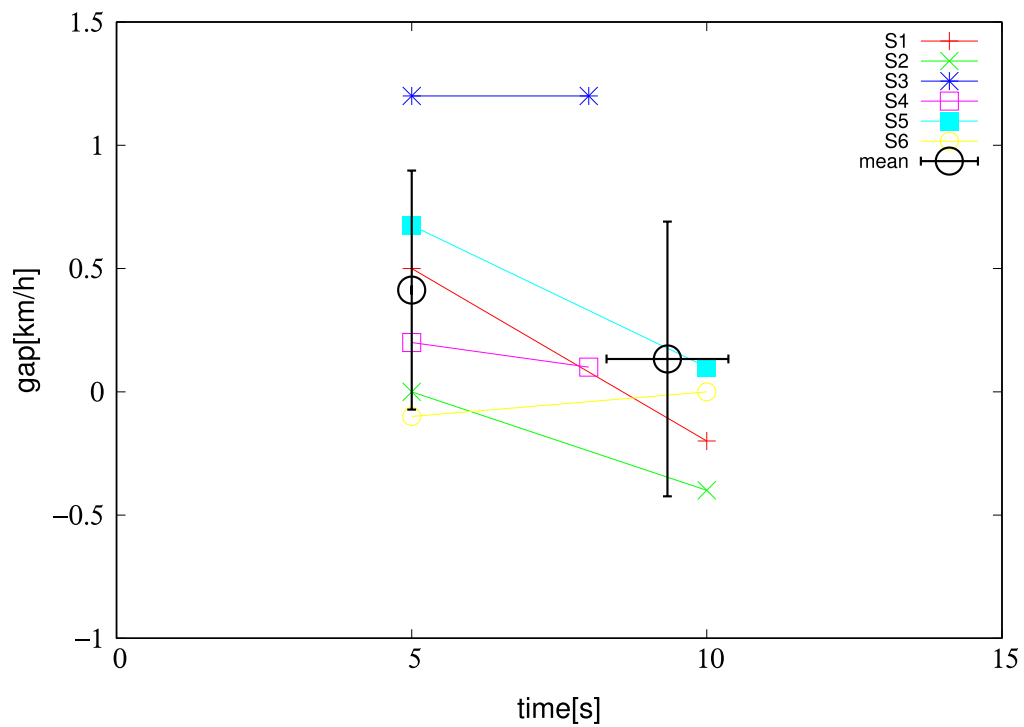


図 4-5.1 トレッドミルに速度変化を与える時間感間隔とヒステリシスの大きさの関係。

このグラフから、トレッドミルに速度変化を与える時間間隔の増加に伴いヒステリシスの大きさは減少する傾向にある事がわかる。ゆえに速度を急激に変えるよりも緩やかに変化させた方がヒステリシスは小さくなることが示唆される。

5. 結論

5-1. まとめ

ヒトの運動、特に歩行と走行に関して 2 つの運動状態における質的な違いを明らかにするため、21 人の被験者に対して、トレッドミル上での運動を CSL を用いて測定した。それにより得られた加速度および角速度時系列を解析し、それぞれの運動状態における周期、加速度の上下成分の最大値、LMP 等を比較することにより次のことがわかった。

- i) トレッドミルの増速過程、減速過程それぞれにおいて、周期および加速度の上下成分の最大値が急激に変化している速度領域が存在していること (W-R 転移および R-W 転移)
- ii) W-R 転移と R-W 転移を示す速度が必ずしも一致しないということ (ヒステリシス)
- iii) LMP の位置が歩行中と走行中で前方から後方または後方から前方に変化する人、前方または後方にあるままの人に分類できること
- iv) 測定回数とヒステリシスの大きさにはそれほど相関がないこと
- v) 速度変化を与える時間間隔の増加に伴いヒステリシスの大きさは小さくなること

また、周期の時間経過に伴う変化に関して、W-R 転移は R-W 転移より緩やかに変化しているサンプルがいくつかみられる。このことについて考えられる理由として、増速時には歩行と走行の間の歩様と考えられる、いわゆる‘競歩’の状態をとる人も少なくない。対して減速時には走行→競歩→歩行と変化させる人はまずいない。むしろ少し早めに歩けると判断し、歩行に切り替えたがやはりまだ歩行に切り替えるには早かったとして再び走行に戻る人も数人いた。そのため R-W 転移の少し前に時系列の乱れが生じているサンプルがいくつかある。これらのことは少なからず外部から強制的に速度を与えられることになっていないため、歩行と走行の間の速度においてどちらの歩様を選択するかためらってしまうことにより生じるものではないかと考えられる。実際複数回測定を行ったサンプルに関してはそのようなことが生じにくいように感じた。ゆえに、測定回数とヒステリシスの大きさにはさほど関係がないという結論に変わりはないが、測定回数の増加に伴い少なからずトレッドミルに対する慣れは増すと考えられる。

CSL を腰以外の部位に装着した測定も試験的にを行った。踝（くるぶし）と腿（ふともも）に装着した場合の測定例を付録 B に示す。腰に装着した場合と異なり、基本的な周期は 1 ステップから 1 ストライドになり、周期の値もおおよそ 2 倍になっている。さらに、加速度の値が $(a_x, a_y) \approx (-1.0, 0)$ をとる時間領域が

見られるが、これは装着した方の足が接地している状態に対応すると考えられる。このように装着する部位によって異なる情報が得られる。なお、踝や腿は振動が激しく、長時間の測定をするには装置を固定する方法には改良が必要だろう。

5-2. 今後の課題

5-1 節の iii) に関して、LMP の位置が直接的にどのような運動の特徴と関係があるのかについてはまだ明らかにできていない。その理由やそれに伴う運動能力の良し悪しや運動効率などの違いについて、今後の課題として取り組んでいきたいと考えている。また、測定時の各被験者におけるトレッドミルに対する慣れについて、今回の研究では複数の被験者に対して時間の都合上、トレッドミルに慣れてもらうための時間を十分に確保できなかった場面があった。それに伴い数人の被験者において、普段の運動とは異なる、少しぎこちない運動をしてしまったり、歩行・走行間の転移の際迷いを生じてしまうことによる時系列の乱れなどが生じてしまった。このようなケースや個人のトレッドミルに対する慣れの差を避けるため、今後は測定を行う際十分な時間を確保し、トレッドミル上でウォーミングアップをしてもらう時間を多めにとるよう心掛ける必要がある。

これらに加え、今後取り組んでいきたい研究として、

- ・地上での運動の解析、およびトレッドミル上での運動との比較
- ・背中だけでなく、腿や脛等に CSL を取り付けた場合の運動状態の解析、および背中との比較
- ・サンプル数、試行回数の増加

などが挙げられる。

謝辞

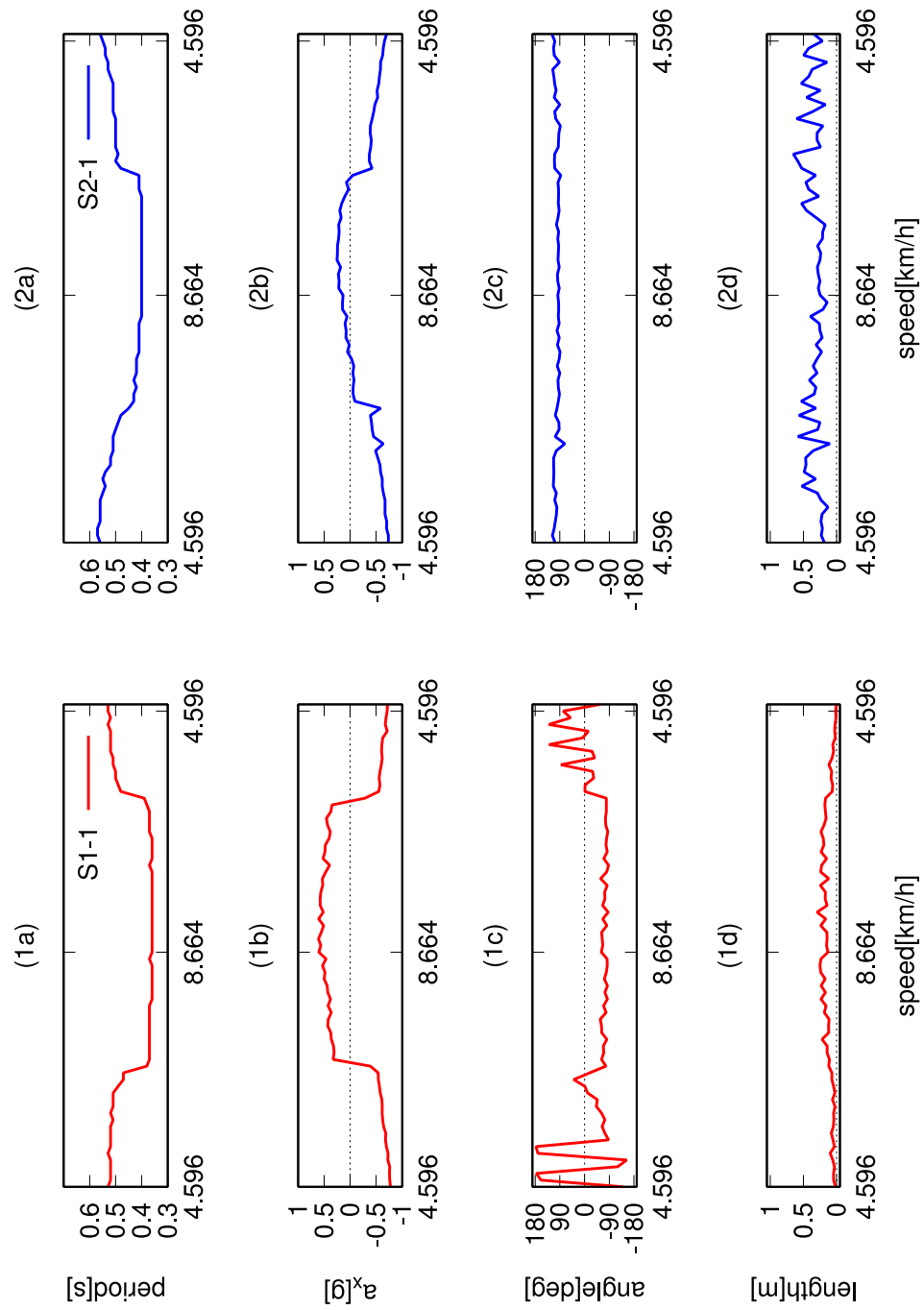
指導教官である水口毅先生には研究で行き詰った際には指針を示していただき、解析手法や研究発表等についても多く助言をいただきました。熱心に指導してくださった水口毅先生には心より厚く御礼申し上げます。大同寛明先生、堀田武彦先生、及川典子先生には研究に関して貴重なご意見を賜りました。非常に感謝しております。また研究室の先輩方や同回生、後輩の皆様からは多くのアドバイスや励ましの言葉をいただきました。皆様への感謝の念を忘れずに、これからも励んでいきたいと思えます。

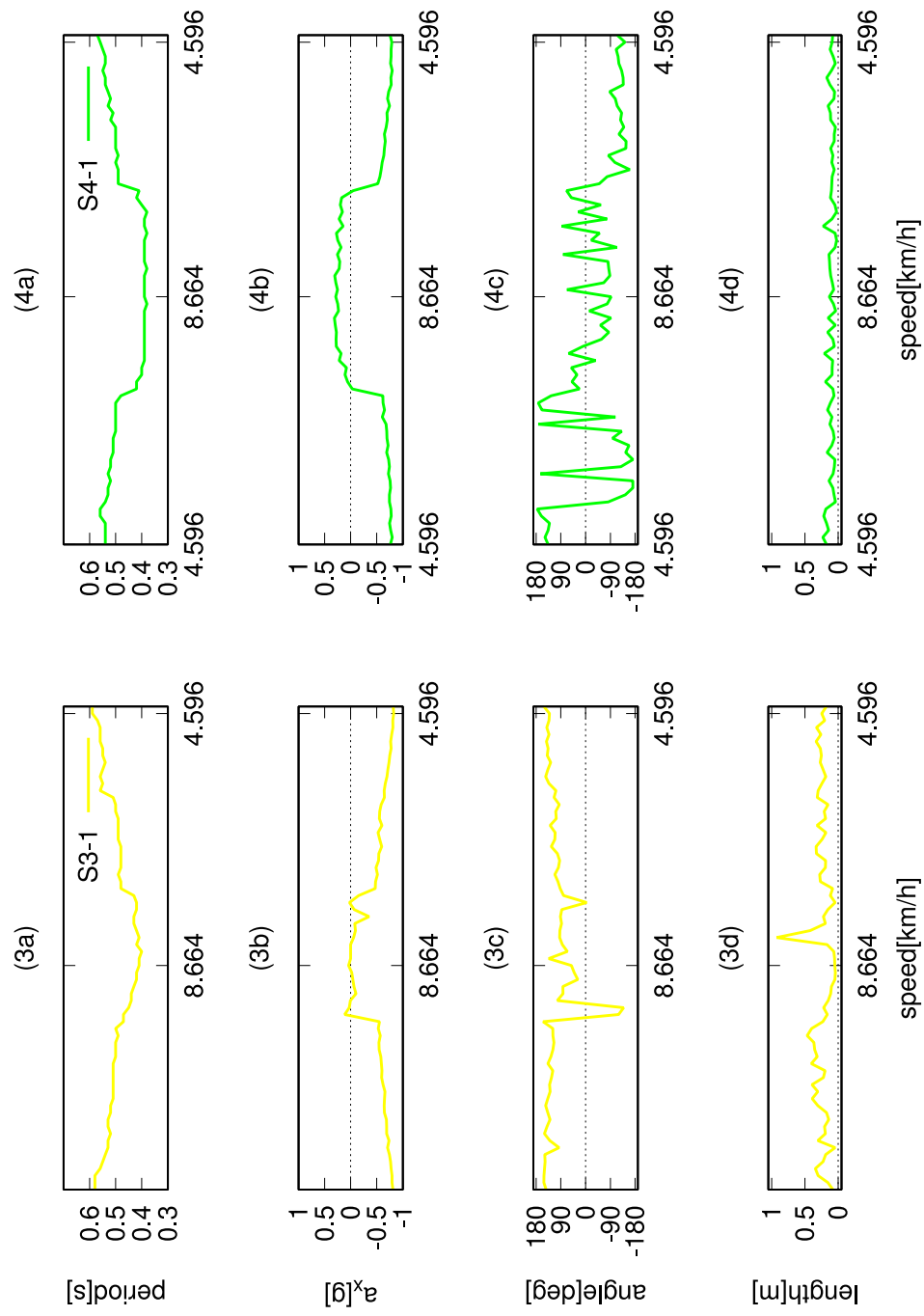
参考文献

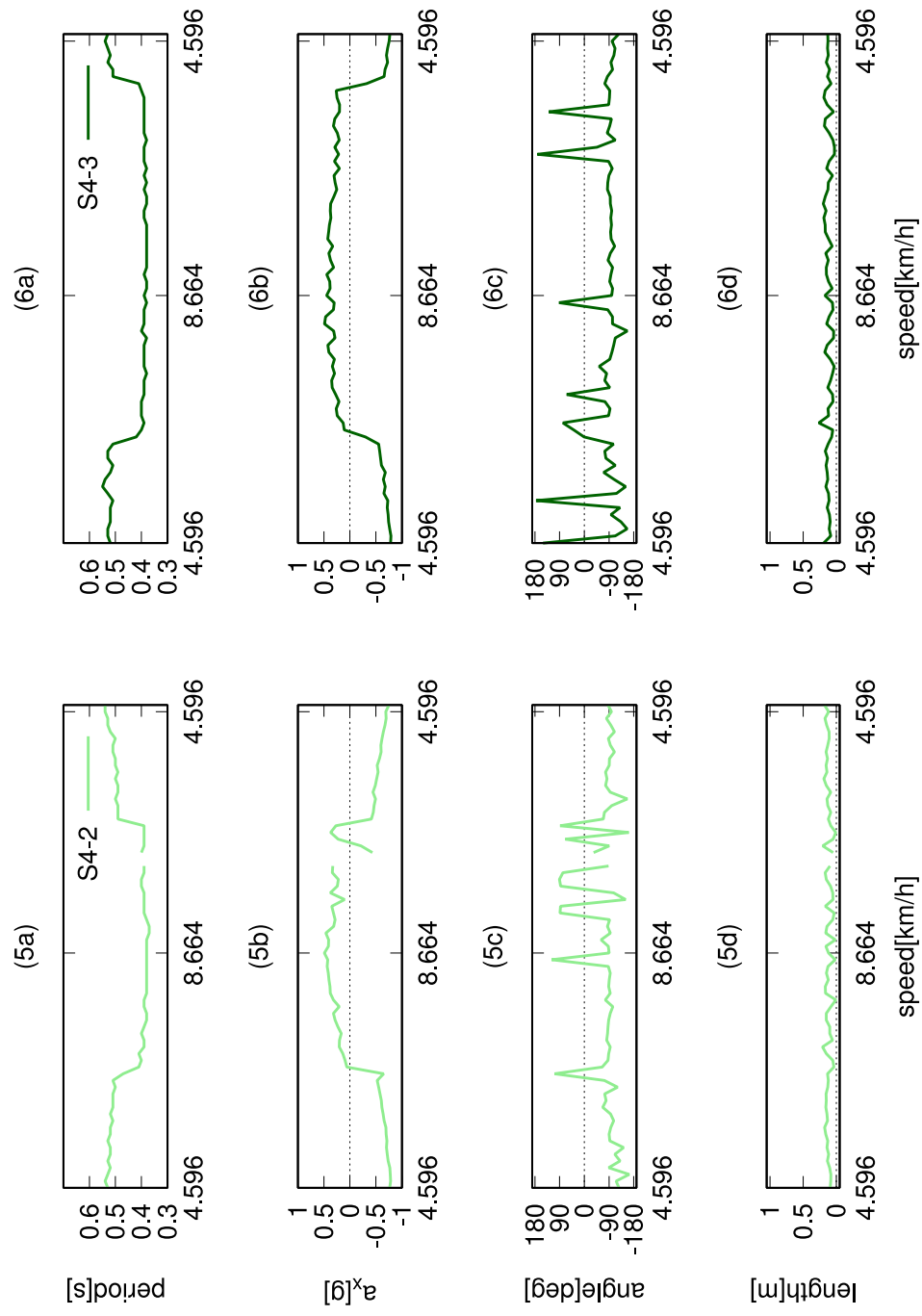
- [1] “Identification of Behaviour in Freely Moving dogs (*Canis familiaris*) Using Inertial Sensors”, Linda Gerencsér et al., *PLOS ONE*, Vol. 8, Issue. 10, e77814, (2013).
- [2] “Why Change Gait? Dynamics of the Walk-Run Transition”, Frederick J. Diedrich and William H. Warren, Jr., *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 21, No. 1, 183-202, (1995).
- [3] “A Method for Gait Analysis in Daily Living Environment by Body-Mounted Instruments”, Yasuaki Ohtaki, Koichi Sagawa and Hikaru Inooka, *JSME International Journal*, Series C, Vol. 44, No.4, 1125-1132, (2001).
- [4] “Assessment of Walking Features From Foot Inertial Sensing”, Angelo M. Sabatini et al., *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, Vol. 52, No. 3, 486-494, (2005).
- [5] “Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running”, Manoj Srinivasan and Andy Ruina, *Nature*, Vol. 439, 72-75, (2006).

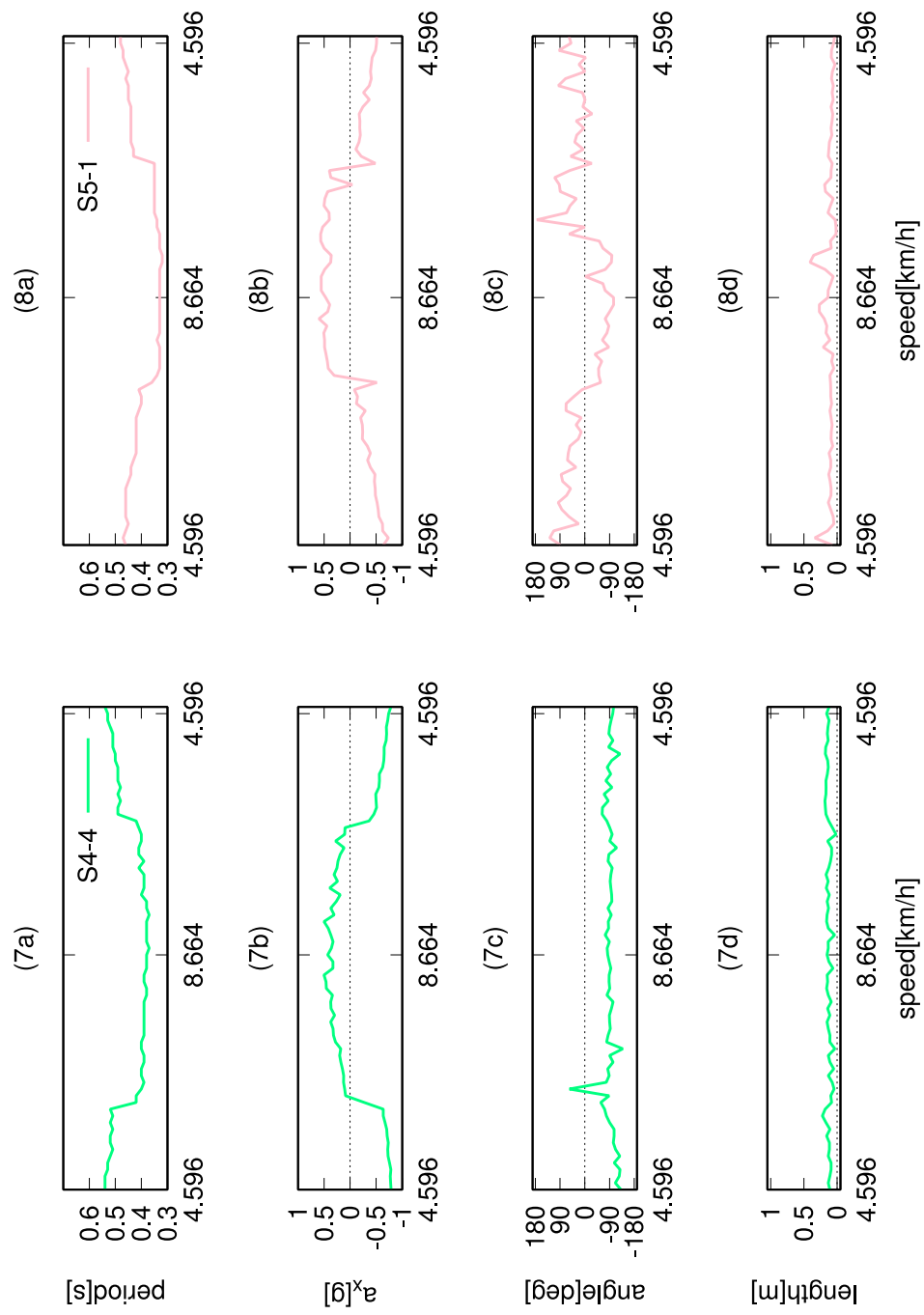
付録 A

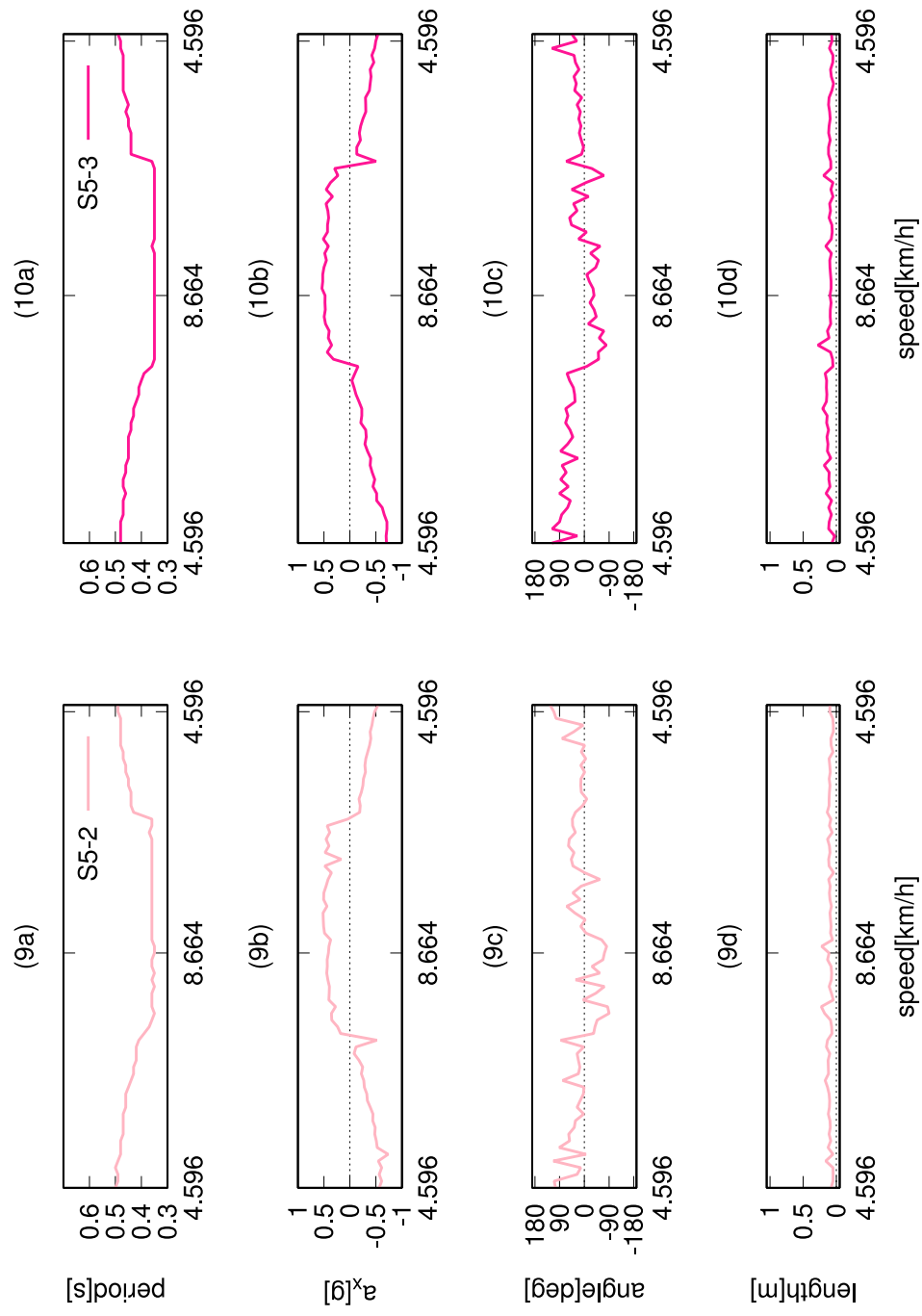
すべての被験者におけるプロトコル A の解析結果

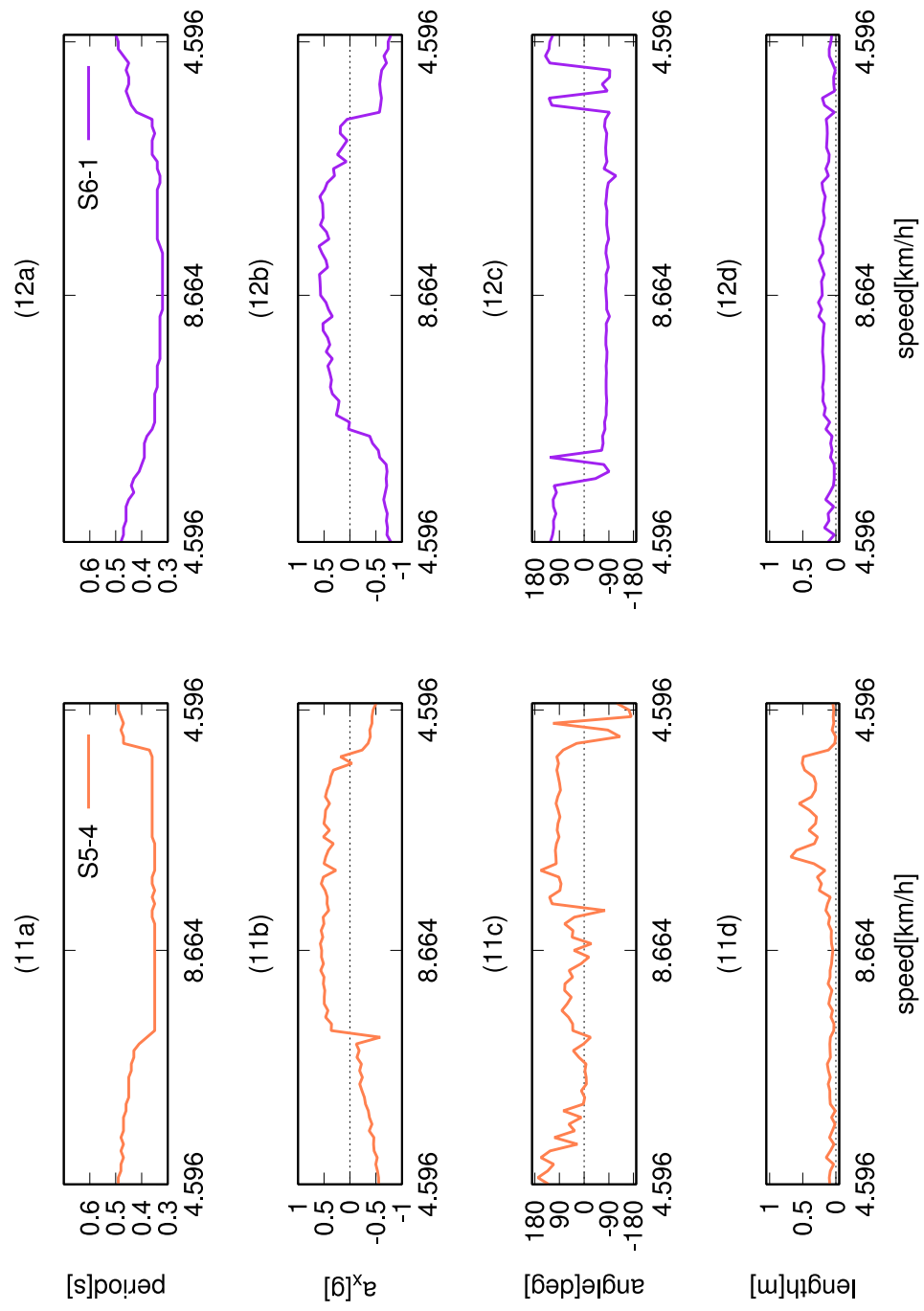


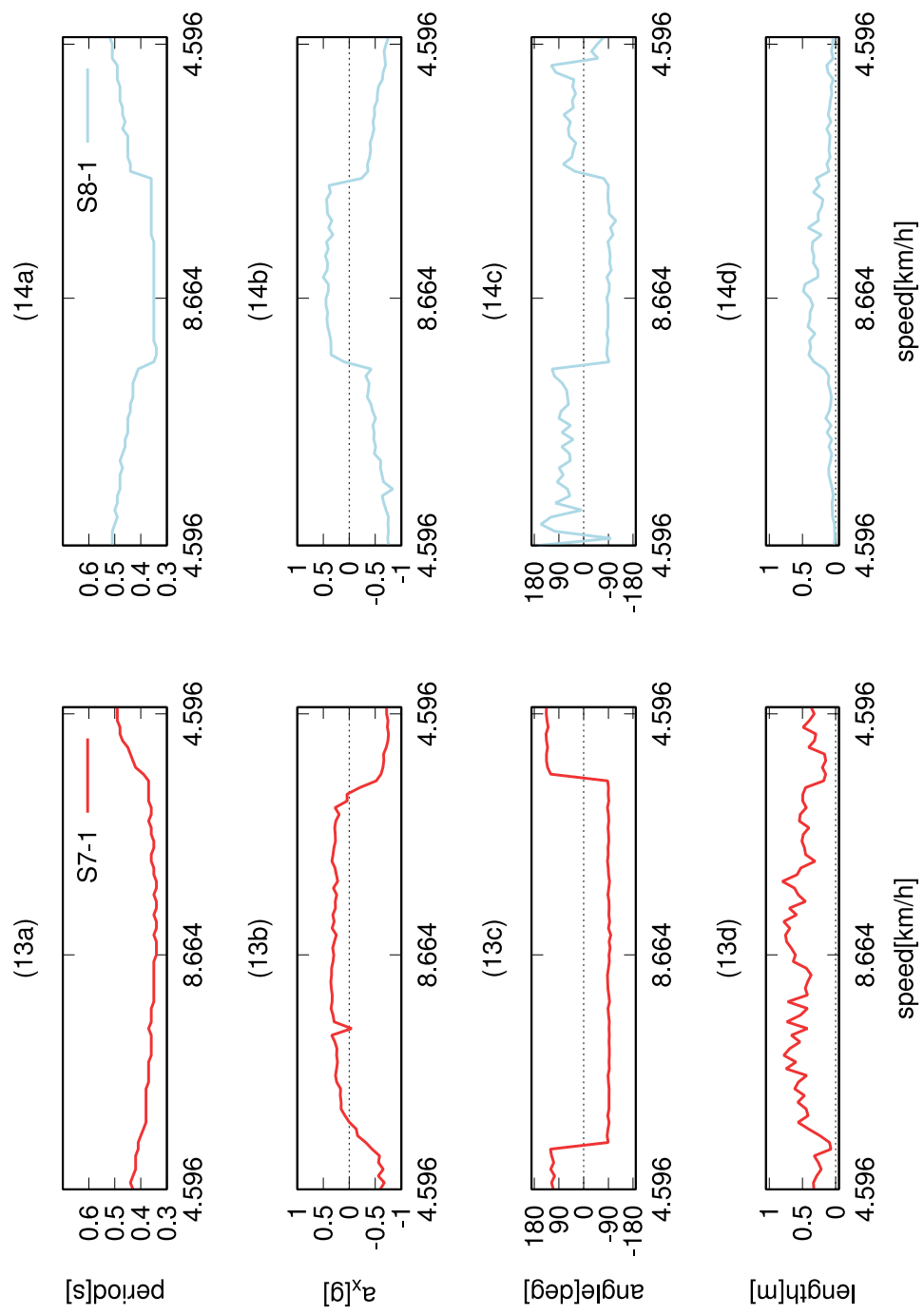


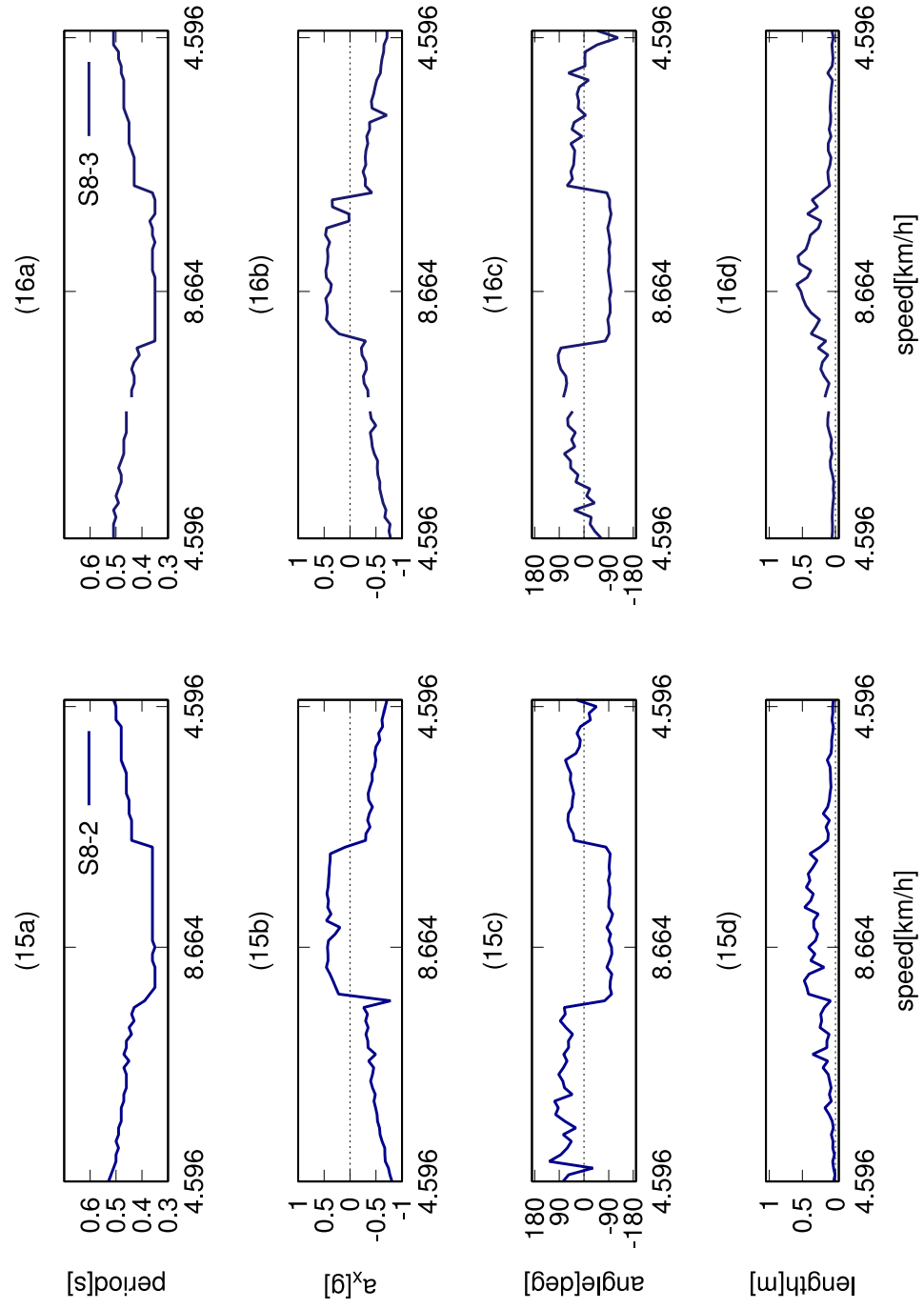


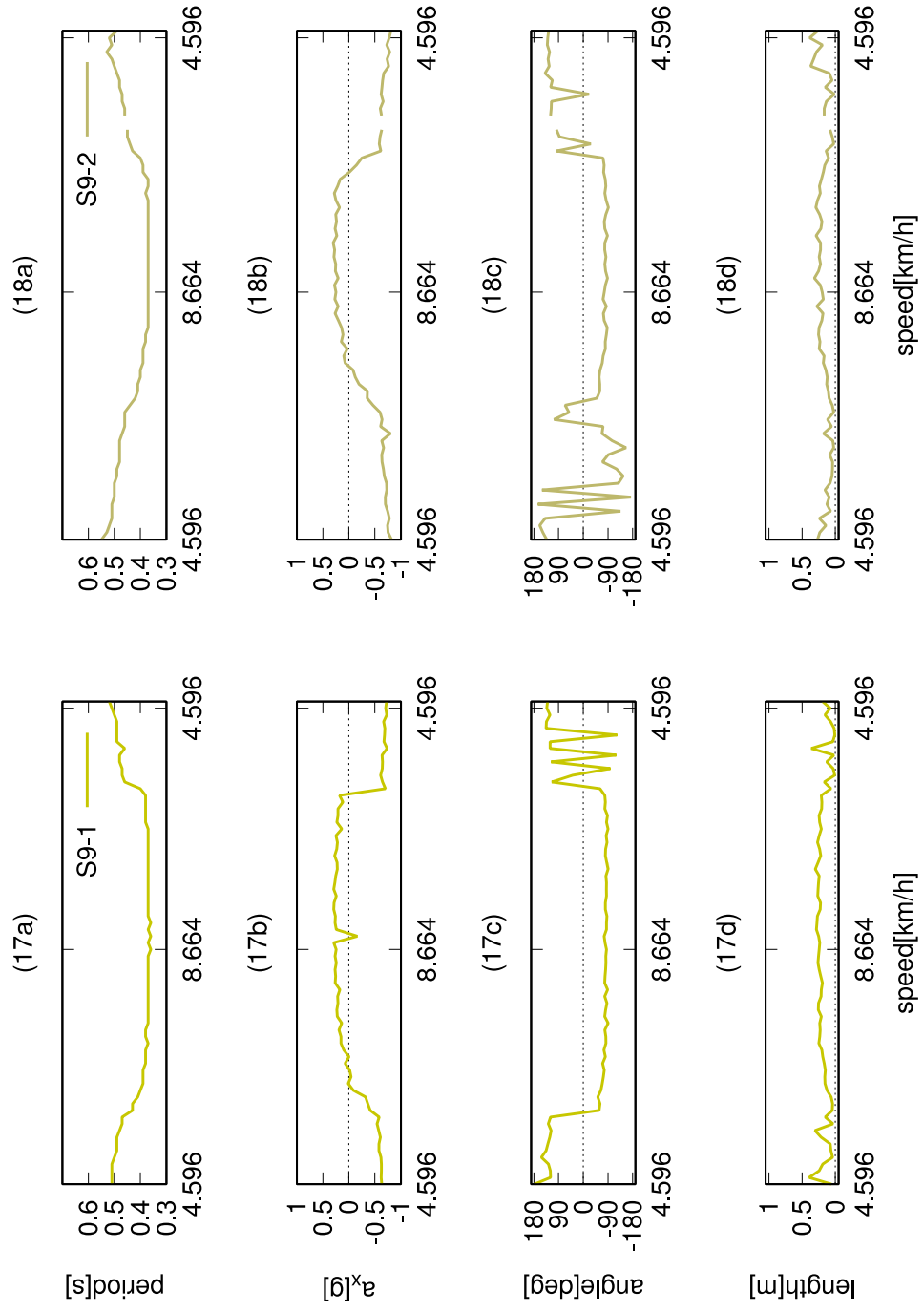


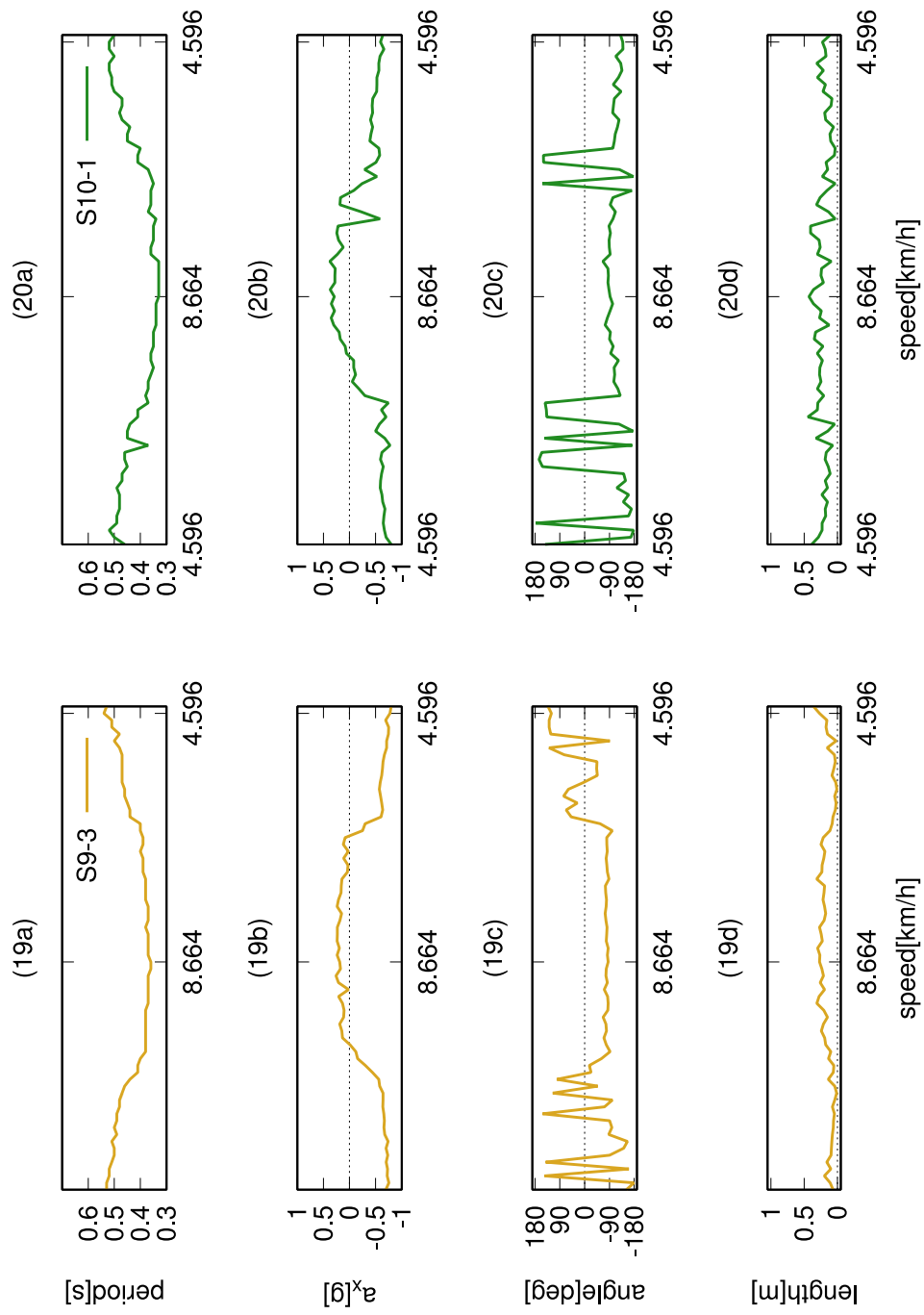


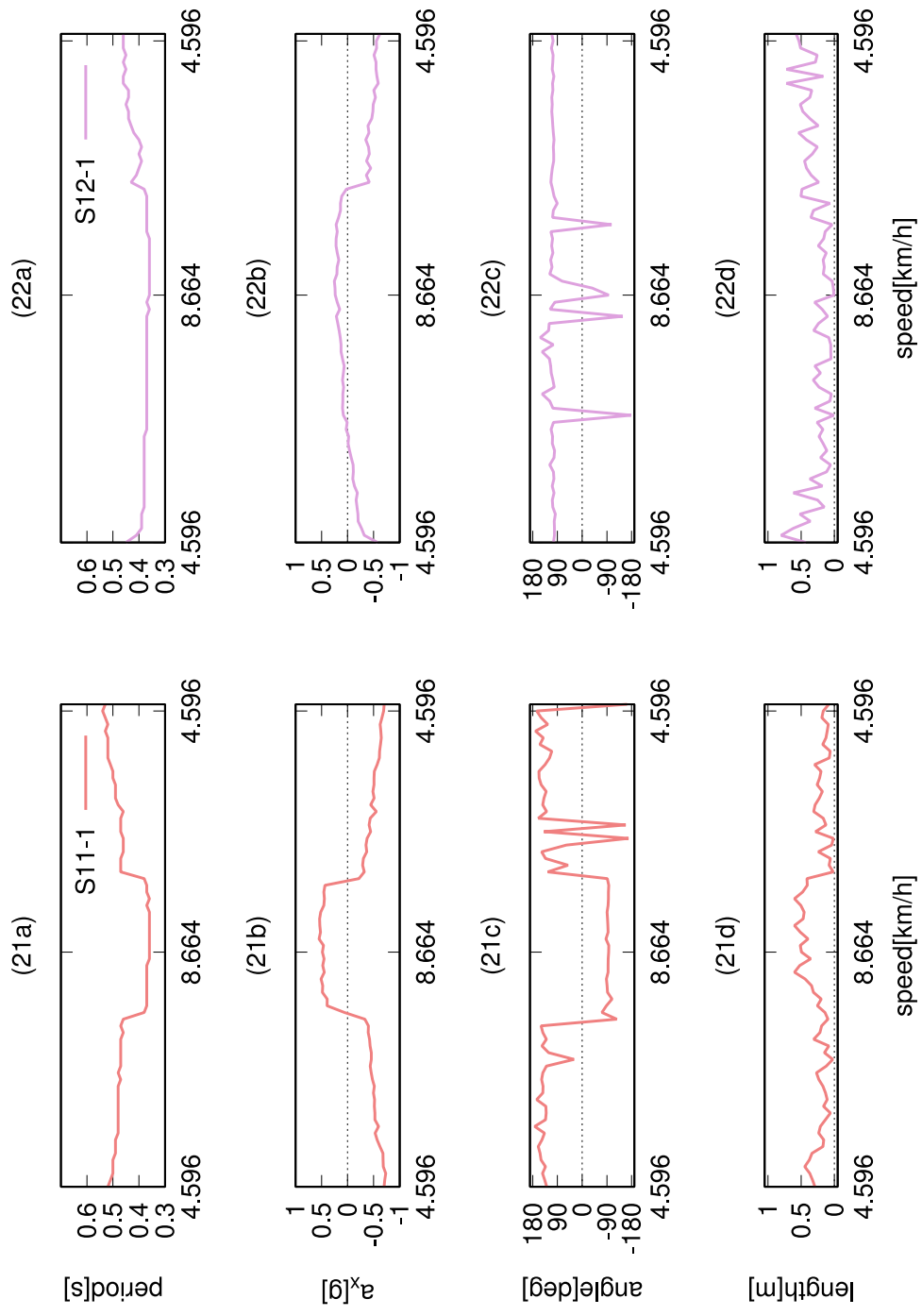


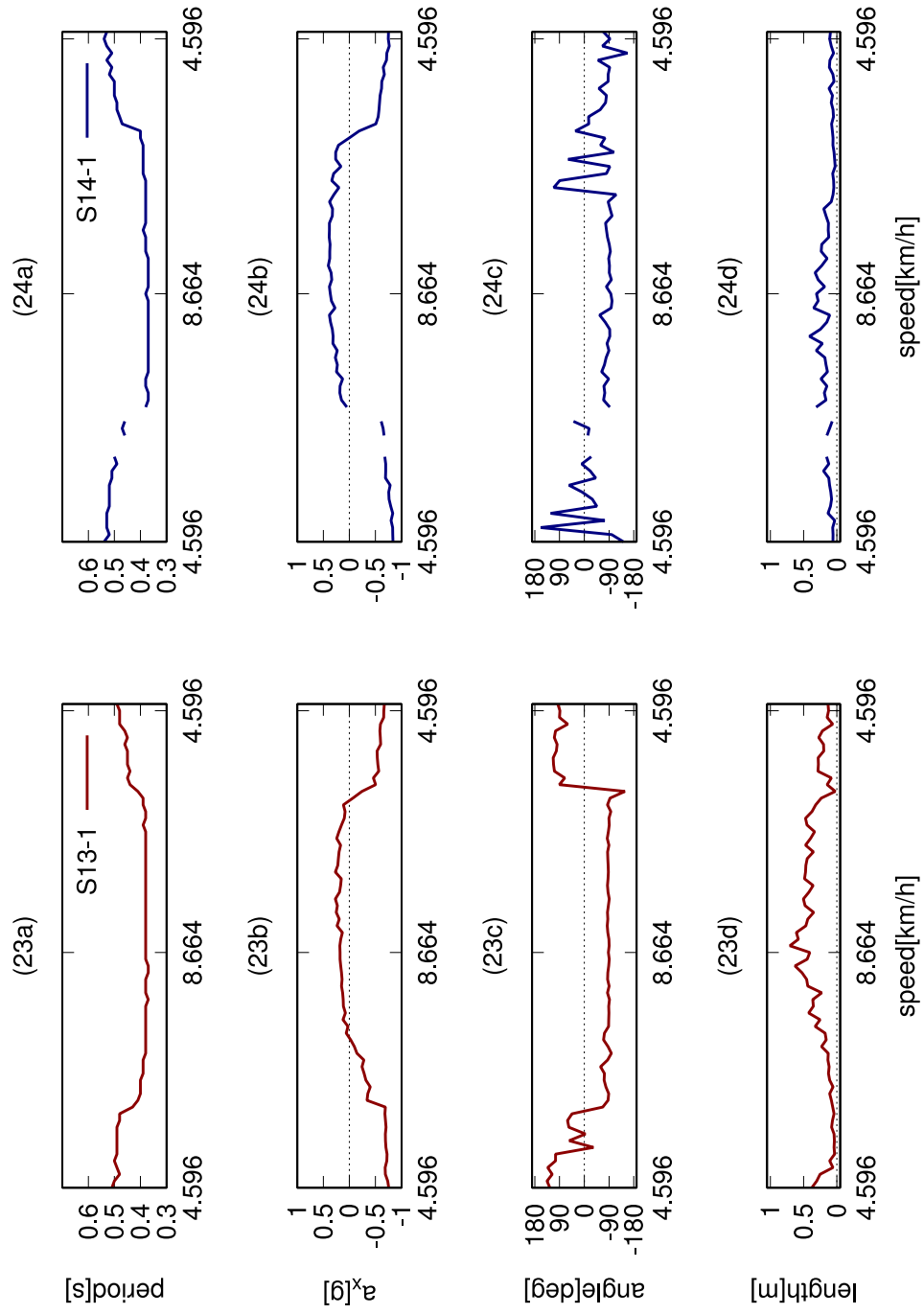


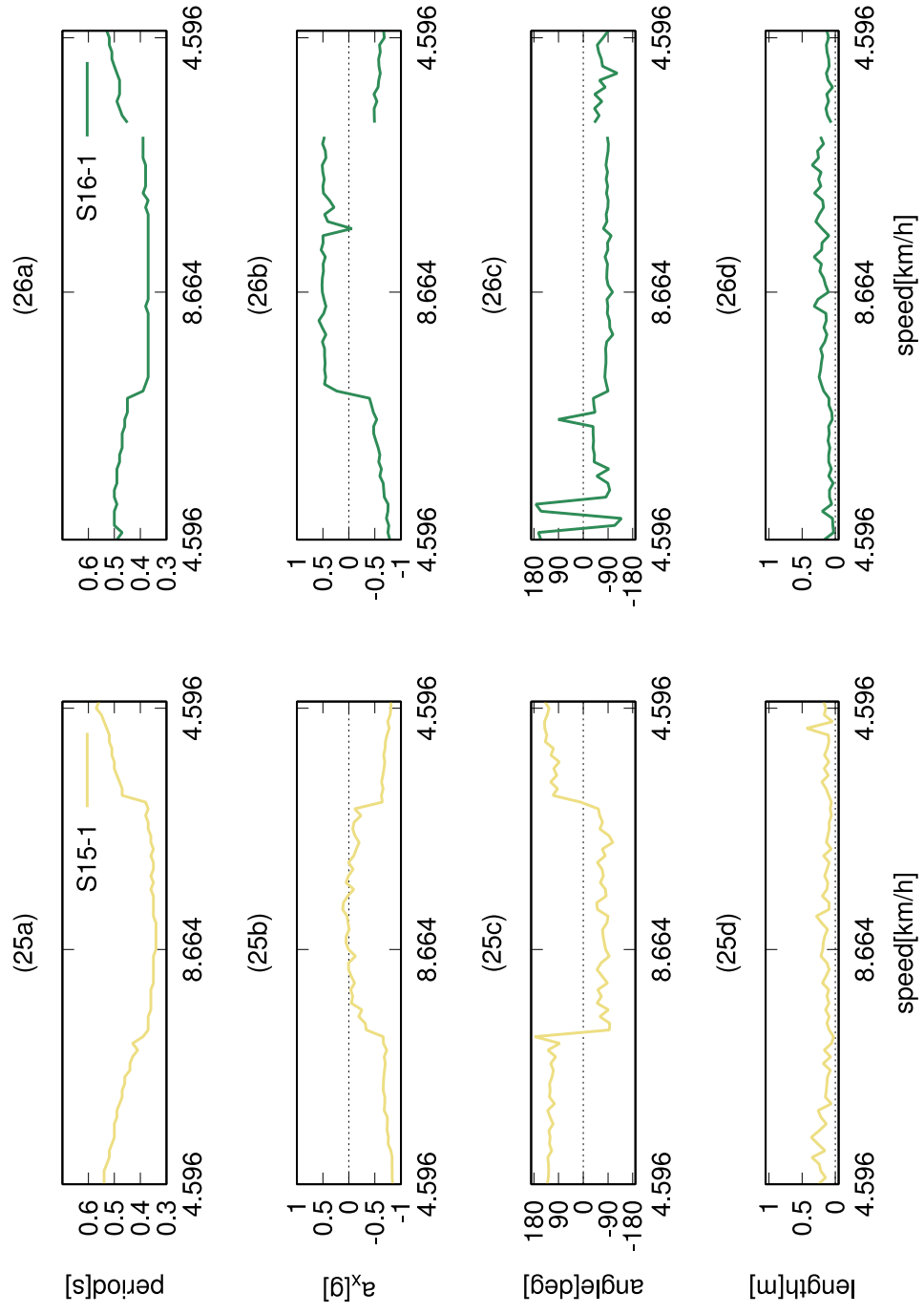


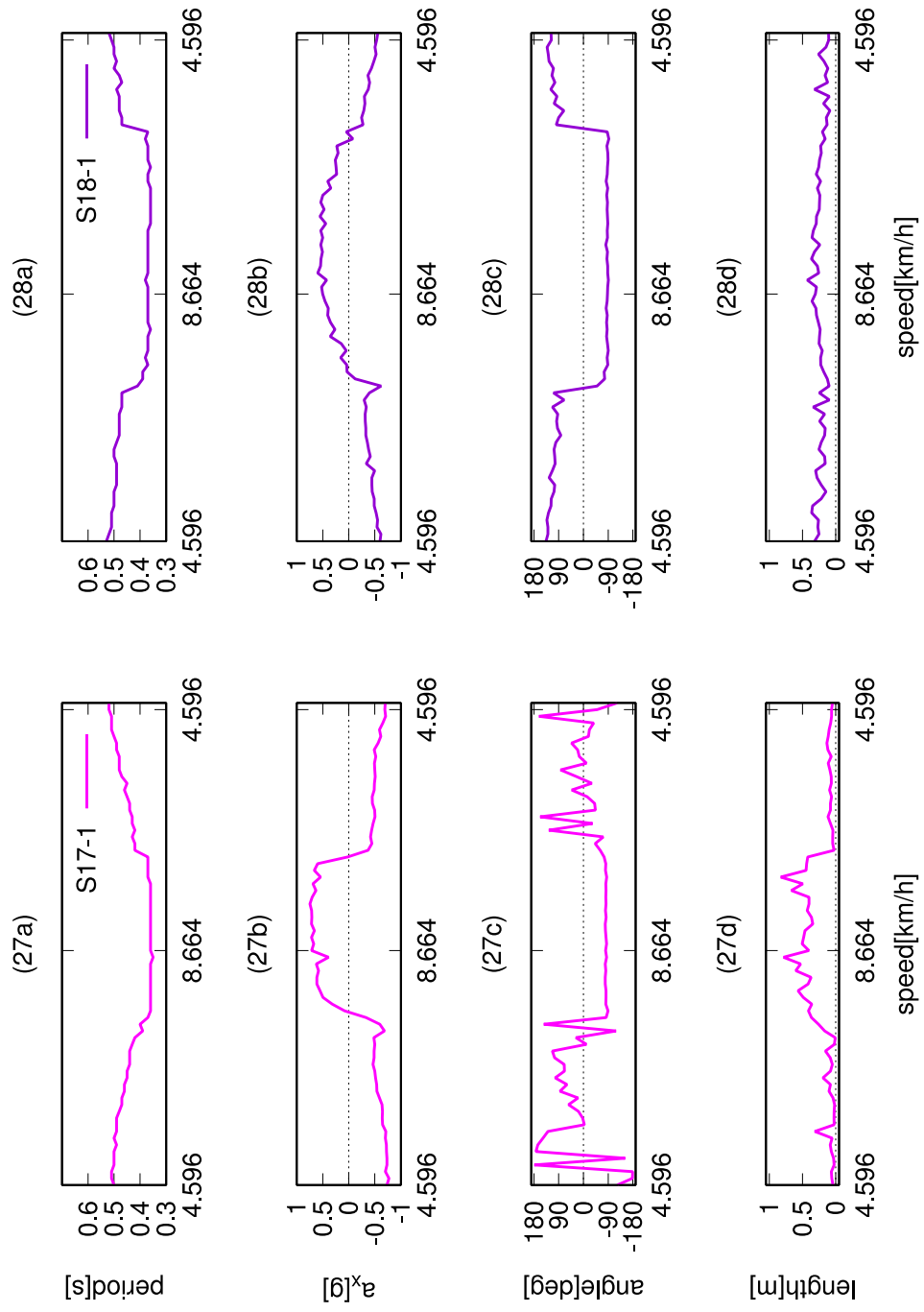


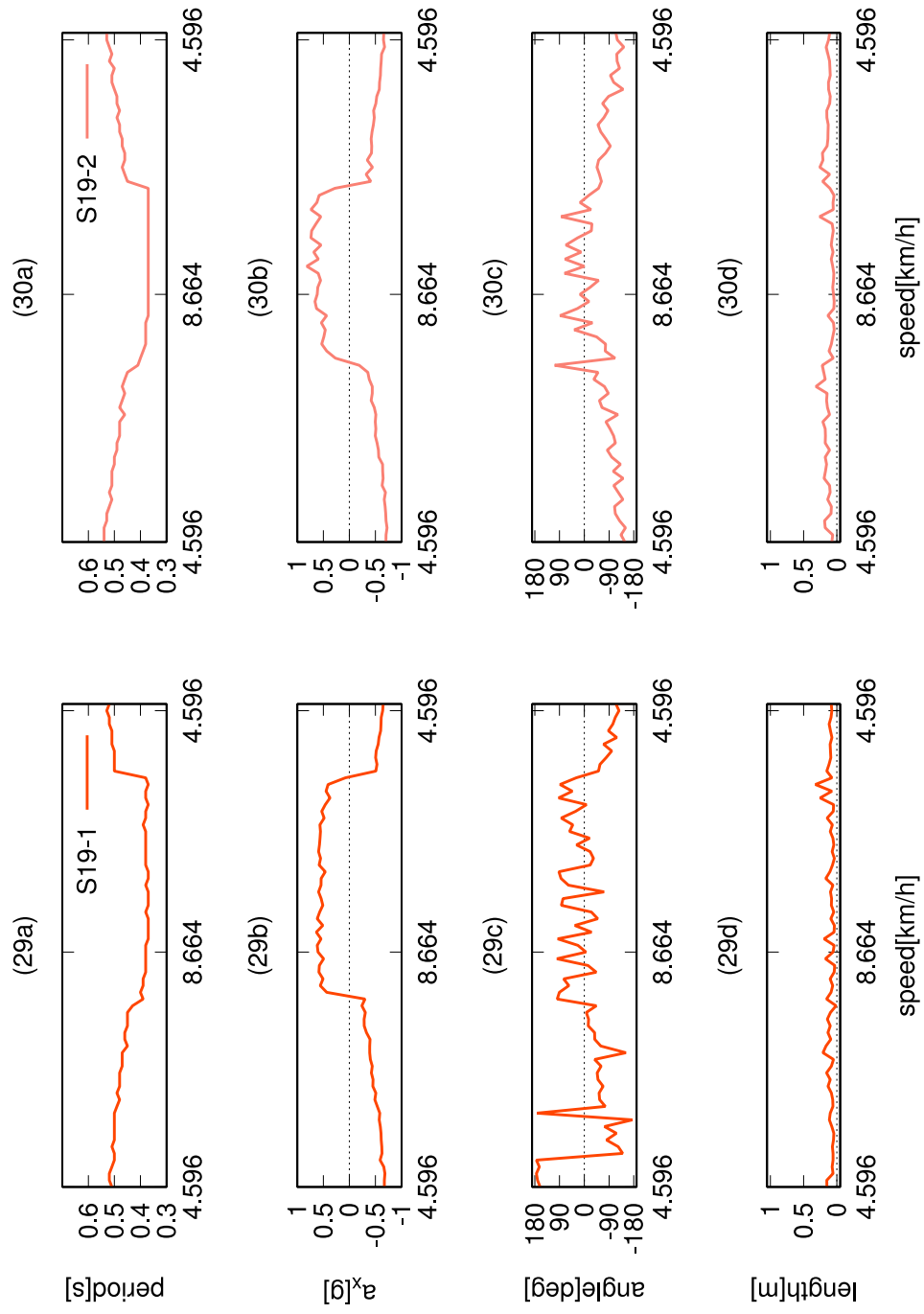


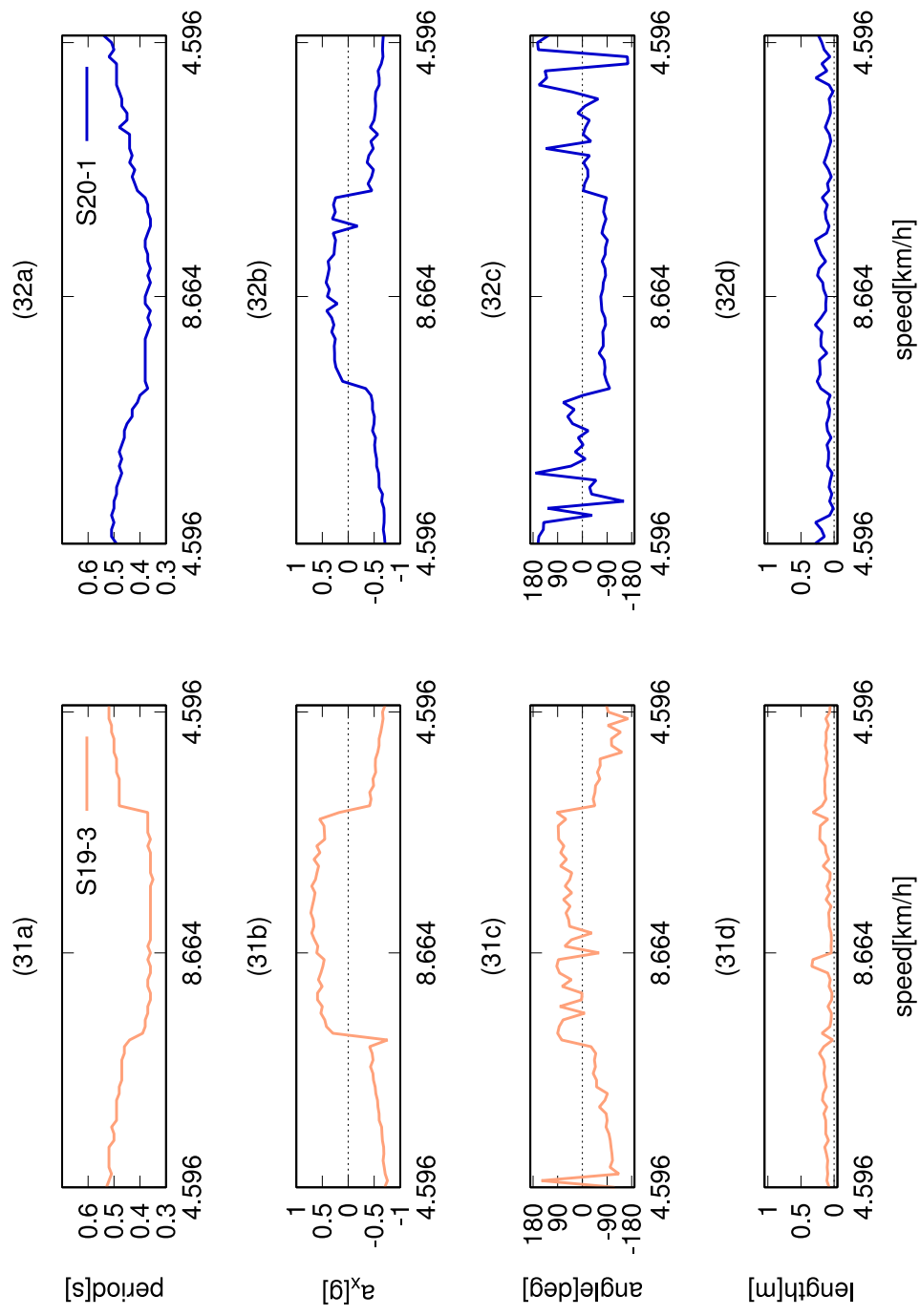


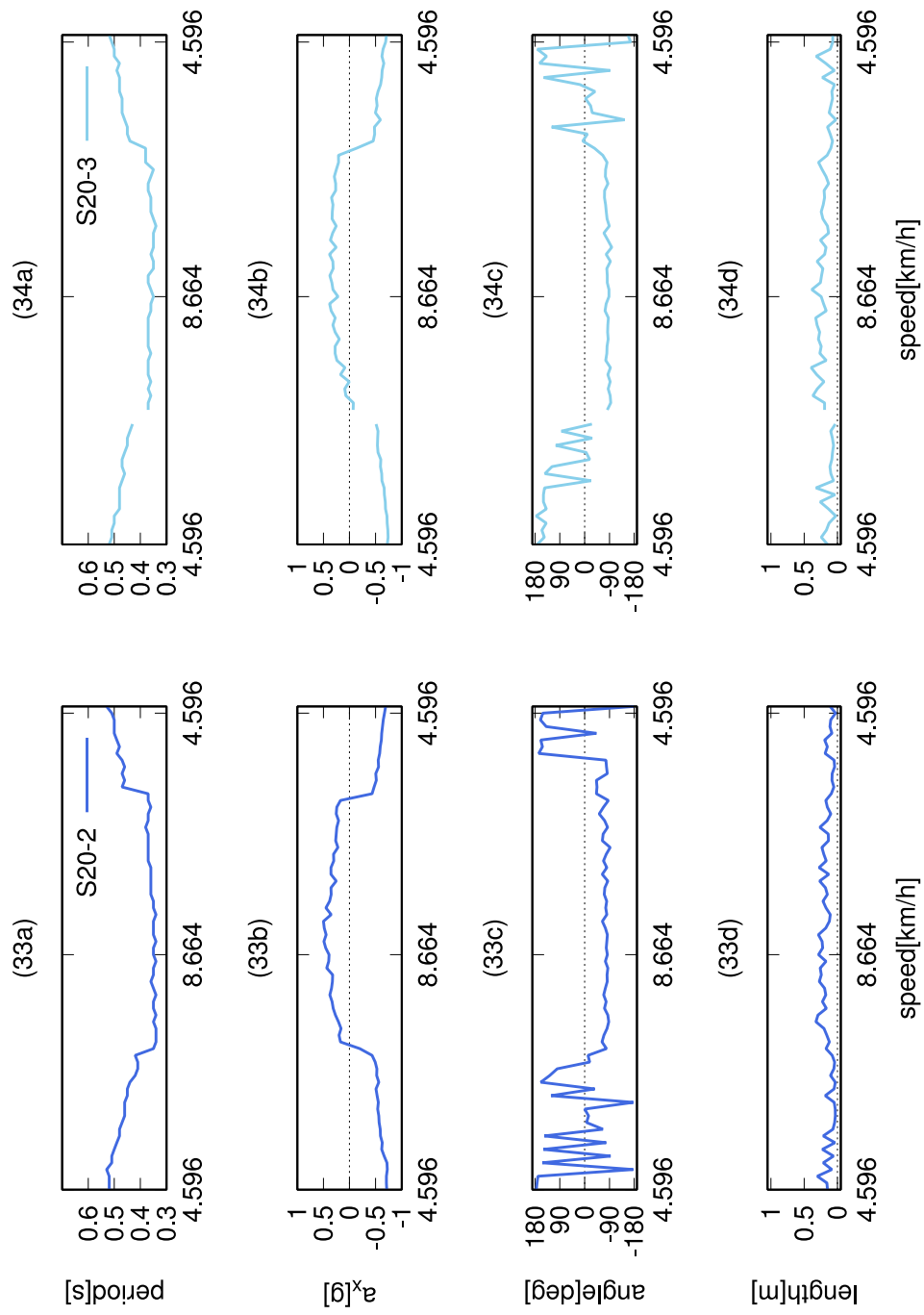


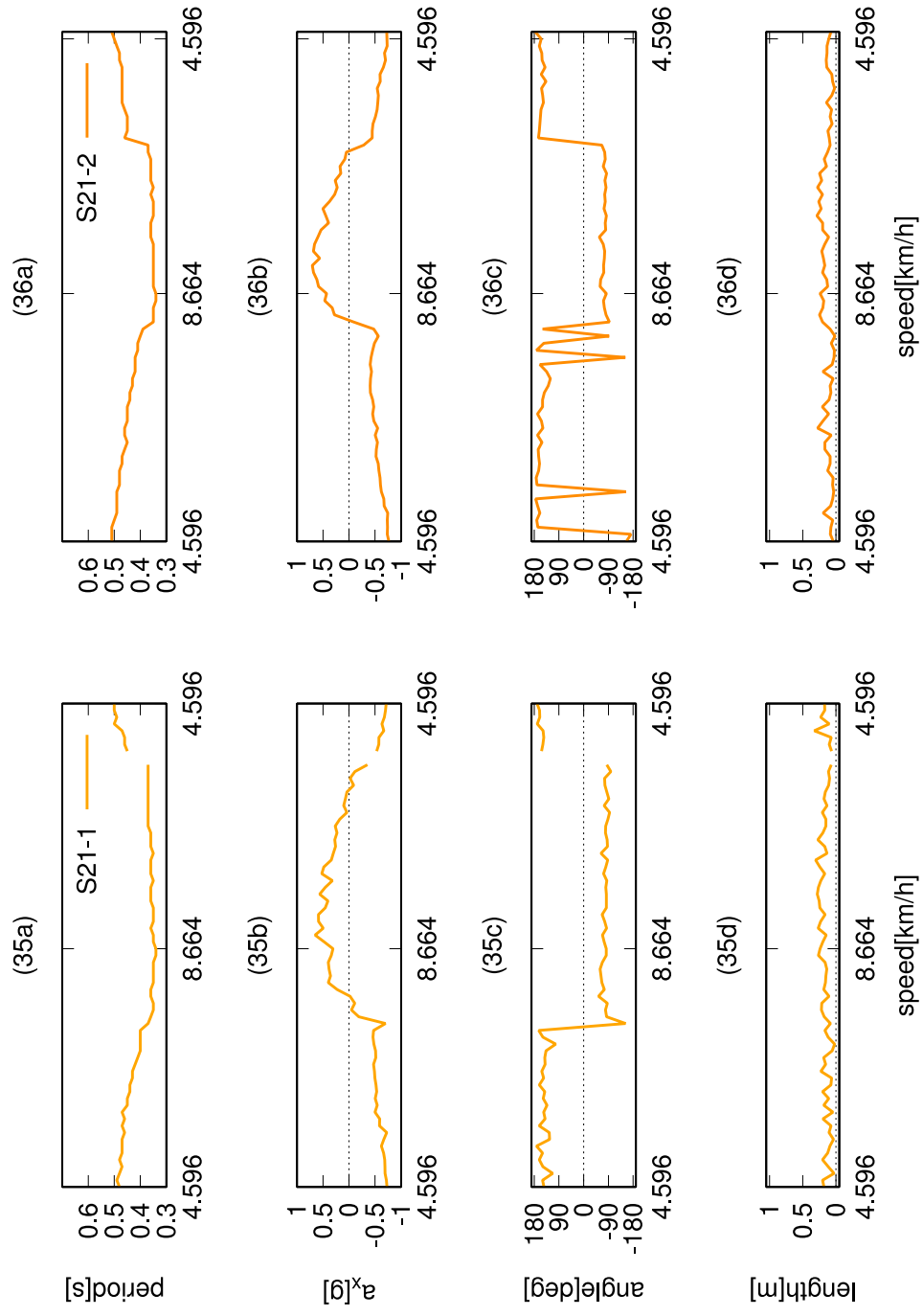












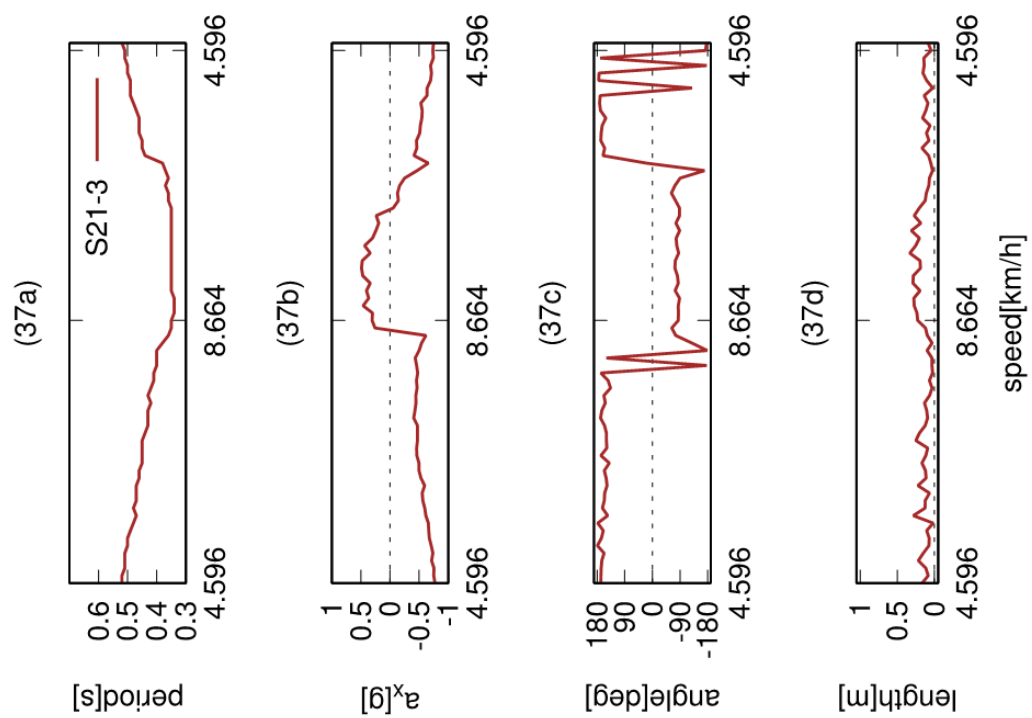


図 各サンプルの各窓における周期 (a)、加速度上下成分の最大値 (b)、LMP までの角度 (c)、距離 (d) とトレッドミルの速度との関係

付録 B

踝および腿に CSL を取り付けたときの歩行、走行それぞれにおける典型的な時系列データ

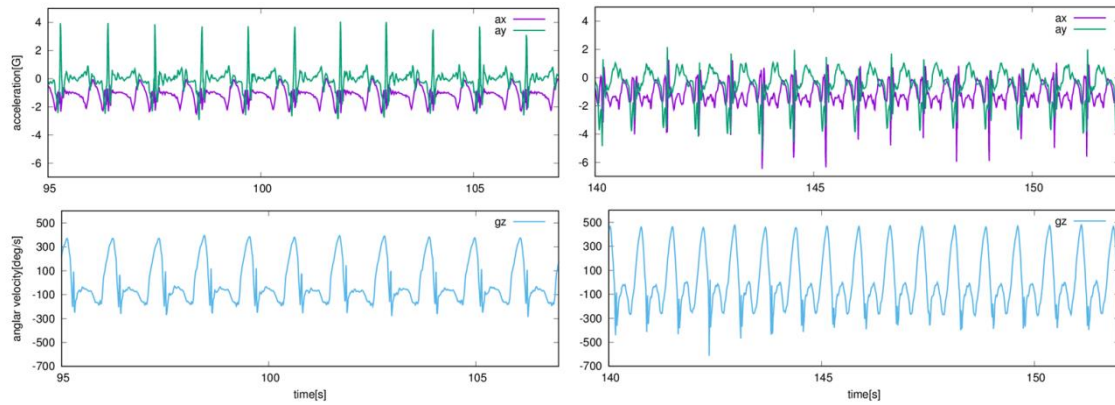


図 1 踝に CSL を取り付けたときの歩行（左）、走行（右）の時系列データ。

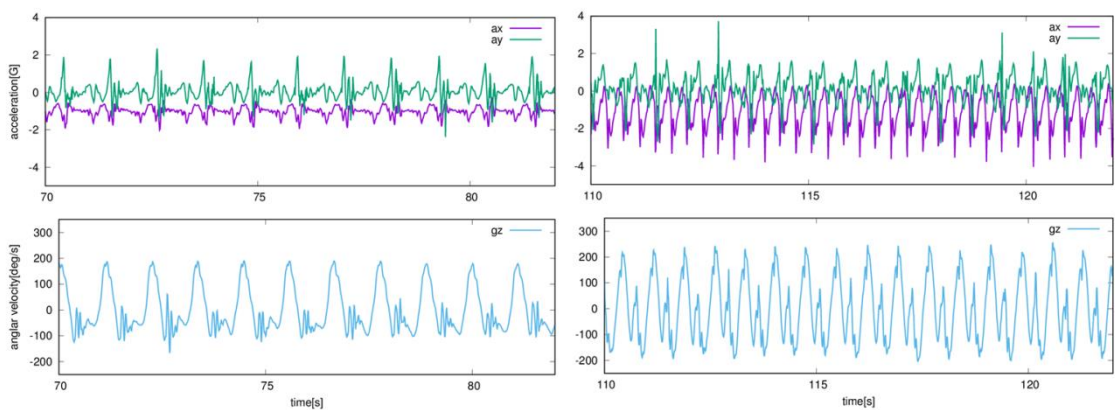


図 2 腿に CSL を取り付けたときの歩行（左）、走行（右）の時系列データ。