

博 士 論 文

テコンドーのバイオメカニクス的研究
-前回し蹴りの「素早さ」に着目して-

平成 28 年度

筑波大学大学院人間総合科学研究科体育科学専攻

木下 まどか

目次

表のタイトル一覧	vi
図のタイトル一覧	vii
1. 緒論	1
1.1. テコンドーの歴史	1
1.2. 競技としてのテコンドー	2
1.3. テコンドーに関するバイオメカニクス的研究の必要性	3
1.4. 「素早さ」に関するバイオメカニクス的研究の必要性	4
1.5. 本研究の目的および研究課題	6
1.5.1. 目的	6
1.5.2. 研究課題	6
1.6. 研究上の仮定	7
1.7. 研究の限界	7
1.8. 用語の定義	8
2. 文献研究	10
2.1. スウィング動作に関する研究	10
2.2. 格闘技種目のバイオメカニクス的研究	12
2.3. 対人種目の対応動作に関する研究	16
2.4. 認知機能に関する研究	17
2.5. 文献研究の総括	17
3. 方法	
3.1. 実験 1	19
3.1.1. 被験者	19
3.1.2. 実験試技	19

3.1.3.	データ収集	20
3.1.4.	データ処理	25
3.2.	測定 1	25
3.2.1.	被験者	25
3.2.2.	測定試技	25
3.2.3.	被験者固有の測定周波数	25
3.3.	実験 2	26
3.3.1.	被験者	26
3.3.2.	実験試技	26
3.3.3.	データ収集	29
3.3.4.	データ処理	29
3.4.	身体代表点の座標値の算出および分析基礎パラメータの算出方法	29
3.4.1.	身体代表点の座標値の算出	29
3.4.2.	身体セグメント移動座標系および関節移動座標系の運動軸定義	30
3.4.3.	身体セグメント角度および角速度	32
3.4.4.	関節角度および角速度	32
3.4.5.	身体セグメントの重心座標値, 速度, 加速度, 全身の重心座標値, 速度, 加速度および慣性パラメータ	33
4.	ダイナミックな動作局面における前回し蹴り動作の「素早さ」	34
4.1.	目的	34
4.2.	方法	34
4.2.1.	局面定義	35
4.2.2.	kinematics 的貢献度	37
4.2.3.	関節トルク, 関節力によるモーメント	38
4.2.4.	力学的エネルギーフロー	40
4.2.5.	被験者のグループ分け	41
4.2.6.	統計処理	47

4.3. 結果	47
4.3.1. LEGUP 局面	49
4.3.2. STRIKE 局面	52
4.4. 考察	71
4.4.1. テコンドーの前回し蹴り動作のダイナミックな動作局面における基本メカニズム	71
4.4.2. ダイナミックな動作局面における速度的, 時間的な「素早さ」の決定要因	81
4.5. 要約	87
5. 準スタティックな動作局面における前回し蹴り動作の「素早さ」	89
5.1. 目的	89
5.2. 方法	90
5.2.1. 局面定義	91
5.2.2. 被験者のグループ分け	92
5.2.3. 統計処理	92
5.3. 結果	92
5.3.1. 蹴り脚つま先離地時における蹴りスピードに対する kinematics 的貢献	92
5.3.2. READY 局面における kinematics と kinetics	99
5.3.3. READY 局面における energetics	105
5.4. 考察	108
5.4.1. 準スタティックな動作局面における速度的, 時間的な「素早さ」の決定要因	108
5.5. 要約	113
6. 前回し蹴り動作の開始タイミングの相違による動作変化	114
6.1. 目的	114
6.2. 方法	115
6.2.1. 局面定義	115

6.2.2.	被験者固有のステップ動作周波数	115
6.2.3.	光提示タイミング	115
6.2.4.	統計処理	116
6.3.	結果	121
6.3.1.	被験者固有のステップ動作測定周波数	121
6.3.2.	動作時間, 蹴りスピードおよびステップ動作の周波数	121
6.3.3.	蹴り動作開始時の身体重心速度と加速度	124
6.3.4.	光提示タイミングと蹴り動作開始時の身体重心加速度	124
6.3.5.	光提示タイミングと動作時間	125
6.3.6.	蹴り動作開始時の身体重心加速度と kinematics の関係	129
6.4.	考察	132
6.4.1.	ステップ動作周波数と前回し蹴り動作の関係	132
6.4.2.	LED 発光タイミングの相違による動作時間, 蹴りスピードおよび身体重心加速度	132
6.4.3.	LED 発光タイミングの相違による蹴り動作の変容	134
6.5.	要約	135
7.	前回し蹴り動作の感覚的な「素早さ」の検討	137
7.1.	目的	137
7.2.	方法	138
7.2.1.	局面定義	138
7.2.2.	評価量の算出	139
7.3.	結果	145
7.3.1.	評価量の検討	145
7.3.2.	評価量間の検討	147
7.4.	考察	152
7.4.1.	各評価量の特徴	152
7.4.2.	評価量間の検討	153
7.4.3.	主観的な「素早さ」と評価量とのマッチング	153
7.5.	要約	154

8.	速度的, 時間的, 感覺的「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互評価	156
8.1.	目的	156
8.2.	評価量の相互関連	156
8.3.	「素早さ」の総合評価	158
8.4.	フィードバックシートの作成	168
8.5.	今後の課題	174
9.	結論	175
9.1.	絶対的パラメータとしての速度的, 時間的「素早さ」	175
9.1.1.	ダイナミックな動作局面における前回し蹴り動作の速度的, 時間的「素早さ」について	175
9.1.2.	準スタティックな動作局面における前回し蹴り動作の速度的, 時間的「素早さ」について	176
9.1.3.	前回し蹴り動作の開始タイミングの相違による動作の変容について	176
9.2.	感覺的な「素早さ」の定量化	177
9.3.	速度的, 時間的, 感覺的「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互評価について	177
9.4.	今後のテコンドー競技におけるバイオメカニクスへの展望	178
	謝辞	179
	Appendix	180
	参考文献	223
	博士論文における業績一覧	228

表のタイトル一覧

Table 1-1	Definition of technical terms.	9
Table 3-1	Characteristics of all thirty-five subjects.	22
Table 4-1	Averaged mechanical energy flow during LEGUP and STRIKE.	68
Table 4-2	Mechanical energy flow during LEGUP divided into four groups.	69
Table 4-3	Mechanical energy flow during STRIKE divided into four groups.	70
Table 5-1	Mechanical energy flow during READY divided into four groups.	106

図のタイトル一覧

Figure 3-1	Experimental field 1-A.	21
Figure 3-2	Experimental field 1-B.	21
Figure 3-3	Experimental trial.	23
Figure 3-4	Location of reflective markers.	24
Figure 3-5	Experimental trial.	27
Figure 3-6	Experimental condition.	28
Figure 3-7	Segment coordinate system.	31
Figure 4-1	Phase definition of roundhouse kick.	36
Figure 4-2	Free body diagram of segment.	39
Figure 4-3	Scatter plots of kicking speed at impact and kicking time during motion phase.	44
Figure 4-4	Scatter plots of kicking speed at impact and kicking time during motion phases divided into four groups.	45
Figure 4-5	Scatter plots of trajectory distance of kicking leg and two variables.	46
Figure 4-6	Time-series data of kicking speed as all thirty-five subjects.	56
Figure 4-7	Averaged time-series data of kicking speed as all thirty-five subjects.	56
Figure 4-8	Time-series data of kicking speed divided into four groups.	56
Figure 4-9	Averaged joint angle data at three motion events.	57
Figure 4-10	Joint angle data at three motion events divided into four groups.	58
Figure 4-11	Averaged time-series data of joint angular velocity.	59
Figure 4-12	Time-series data of joint angular velocity divided into four groups.	60
Figure 4-13	Averaged time-series data of contribution to kicking speed.	61
Figure 4-14	Time-series data of contribution to kicking speed divided into four groups.	62

Figure 4-15	Averaged time-series data of joint torque and moment of joint force.	63
Figure 4-16	Time-series data of joint torque divided into four groups.	64
Figure 4-17	Time-series data of moment of joint force divided into four groups.	65
Figure 4-18	Averaged time-series data of mechanical energy.	66
Figure 4-19	Time-series data of mechanical energy divided into four groups.	67
Figure 4-20	Conceptual diagram of constraint condition in Taekwondo roundhouse kick.	73
Figure 4-21	Function of hip joint torque of adduction.	75
Figure 4-22	Pattern diagram of moment of hip joint force produced by lower torso movement.	76
Figure 4-23	Kicking speed produced by internal rotation of kicking hip joint.	79
Figure 4-24	Pattern diagram of mechanical energy flow during swing motions.	80
Figure 4-25	Pattern diagram of how to translate large mechanical energy by joint force power	86
Figure 5-1	Phase definition of roundhouse kick.	91
Figure 5-2	Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking speed at impact.	94
Figure 5-3	Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking time during all three phase.	95
Figure 5-4	Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking time during READY phase.	96
Figure 5-5	Scatter plots of speed of lower torso and four parameters.	97
Figure 5-6	Plots of unit vector of kicking velocity at toe rises off the floor in all three directions.	98

Figure 5-7	Joint angle data at two motion events divided into four groups.	101
Figure 5-8	Time-series data of joint angular velocity divided into four groups.	102
Figure 5-9	Time-series data of joint torque divided into four groups.	103
Figure 5-10	Time-series data of moment of joint force divided into four groups.	104
Figure 5-11	Bar graph of mechanical energy generated by both support and kicking legs data divided into four groups during READY phase.	107
Figure 5-12	Pattern diagram of how to raises kicking leg by both legs.	111
Figure 5-13	Pattern diagram of how to transfer the mechanical energy from thigh of support leg to pelvis by joint force power.	112
Figure 6-1	Stick pictures of roundhouse kick.	117
Figure 6-2	Definition of STEP phase and event of EML.	118
Figure 6-3	Definition of step frequencies.	119
Figure 6-4	Normalized LED timing.	120
Figure 6-5	Scatter plot of step frequency, body mass, and height.	122
Figure 6-6	Scatter plot of kicking time during READY phase, step frequency, and kicking speed at impact according to three conditions.	122
Figure 6-7	Scatter plot of kicking time from EML to STR, step frequency, kicking speed at impact, and time during READY phase according to two conditions.	123
Figure 6-8	Plots of center of gravity velocity and acceleration of vertical axis at STR	126
Figure 6-9	Scatter plots of center of gravity acceleration of vertical axis at STR and normalized LED timing in Group A and B.	127
Figure 6-10	Scatter plots of time from EML to STR and normalized LED timing in Group A and B.	128

Figure 6-11	Joint angle data at four motion in every groups.	130
Figure 6-12	Time-series data of joint angular velocity in every groups.	131
Figure 7-1	Calculation of affinity of period.	142
Figure 7-2	Calculation of affinity of amplitude.	142
Figure 7-3	Example results of fourier series expansion.	143
Figure 7-4	Calculation of timing and minimum differences.	144
Figure 7-5	Plots of affinity of period and amplitude	148
Figure 7-6	Plots of evaluation value based on the result of fourier series expansion.	149
Figure 7-7	Plots of timing and minimum differences based on the result of fourier series expansion.	150
Figure 7-8	Scatter plots of all parameters.	151
Figure 8-1	Plots of kicking speed and kicking time parameters.	160
Figure 8-2	Scatter plots of time during STEP1 and other parameters.	161
Figure 8-3	Scatter plots of time during STEP2 and other parameters.	162
Figure 8-4	Scatter plots of affinity of period and other parameters.	163
Figure 8-5	Scatter plots of affinity of amplitude and other parameters.	164
Figure 8-6	Scatter plots of evaluation and other parameters.	165
Figure 8-7	Scatter plots of timing and other parameters.	166
Figure 8-8	Feedback sheet.	170
Figure 8-9	Feedback sheet of GOOD1.	171
Figure 8-10	Feedback sheet of GOOD2.	172
Figure 8-11	Feedback sheet of POOR.	173

1. 緒論

1.1 テコンドローの歴史

テコンドー (Taekwondo) の”tae”は跆 (足), ”kwon”は拳, ”do”は道を表し, 日本の空手や韓国の伝統武術を応用した韓国発祥の格闘技である。テコンドーは蹴り技に重点を置くことで, 主に突き技を用いる空手や中国の武術太極拳とは区別され発展を遂げてきた。歴史は浅く, 1955 年に「テコンドー」という名称が正式に命名された。現在は, 1966 年に創設された International Taekwon-Do Federation (国際テコンドー連盟, 以下, ITF) と 1973 年に創設された World Taekwondo Federation (世界テコンドー連盟, 以下, WTF) の 2 団体が主要な国際競技団体である。両団体の違いは競技のスタイルやルールである。ITF では, ライトコンタクト制で, 防具は手足のみである。一方, WTF では, フルコンタクト制で, 手足のみならず頭部, 胴部にも防具の着用を義務付けており, よりスポーツ性が高い。WTF におけるテコンドー競技は, 第 27 回オリンピック・シドニー大会 (2000 年) で組手(겨루기, キョルギ) 種目がオリンピック正式種目となり, 世界中で親しまれるスポーツへと成長した。日本国内の競技会や世界選手権大会では, 体重別に男女各 8 階級が設けられ, オリンピックでは, 階級が統合され男女各 4 階級に変更される。オリンピックの出場資格は, 世界ランキングの上位者および大陸予選の通過者に与えられる。これまで, シドニーオリンピックからリオデジャネイロオリンピックまでの計 5 大会で 38 カ国がメダルを手に入れている。日本選手団では, シドニーオリンピックにおいて, 岡本依子選手 (女子-67kg 級) が銅メダルを獲得している。近年では, 濱田真由選手 (女子-57kg 級) が 2015 年の世界選手権大会 (ロシア) において優勝し, 日本選手団初の金メダルを獲得している。2016 年に開催されたリオデジャネイロオリンピックでは, 惜しくも濱田真由選手のメダル獲得はなかったが, 女子選手のみならず男子選手やジュニア選手も世界で躍進していることから,

2020年に開催される東京オリンピックでのテコンドー選手の活躍が期待される。また、2020年の東京パラリンピックでは、上肢障害アスリートのためのパラテコンドーの組手種目も新規種目として加わることが決定している。

なお、本論文ではオリンピック競技に採用されているWTFにおけるテコンドー競技をテコンドーと表記する。

1.2 競技としてのテコンドー

テコンドーは、1辺が約3.3mの8角形のコート内で競技が行われ、体重による階級制（男女各8階級）、ラウンド制（2分3ラウンド）、ポイント制である。ルールは、蹴り技でポイントを獲得することに重点が置かれている。たとえば、ポイント獲得のための打撃技は相手選手の中段（体幹部）と上段（頭部）への蹴り、および中段への突きである。獲得ポイントは、中段の突きと蹴りが1ポイント、上段の蹴りが3ポイントで、回転蹴りは2ポイントの加点となる（2016年12月現在）。下段（下肢部）への打撃と上段への突きは禁止されており、中段への連続の突きもポイントにならない。また、ロンドンオリンピック決勝戦全8試合（男子4階級、女子4階級）においても、ポイント獲得要因の78%が蹴り技であった（木下と藤井, 2014）ことや、蹴り技の攻撃は試合においておよそ80%を占める（Falco and Estevan, 2014）と述べられていることから、テコンドーにおける蹴り技の重要性は明らかである。そこで、試合において勝利するためには、多様な蹴り技を駆使する必要がある。また、近年のルール改正により、有効打撃の判定が電子防具により行われるようになったことで、ポイントを獲得するためには、衝撃力の強い蹴り技に比べて、相手選手に当てることができる、「素早く」かつ「正確な」蹴り技が求められる傾向にある。

1.3 テコンドーに関するバイオメカニクス的研究の必要性

競技スポーツに対する医・科学の貢献度合いは、競技種目によって違いがある。特に、スポーツバイオメカニクス分野の研究は、個人的・基礎的動作に着目したものが多く、したがって、陸上競技、スピードスケート、水泳などの記録系種目へは貢献しやすく、審判員の主観的な判断も含まれる体操競技、フィギュアスケートなどの採点種目、ゲームの流れ、状況などにより動作が時々刻々と変容する野球、サッカー、テニスなどの球技系種目、テコンドーを含む柔道、ボクシング、レスリングなどの格闘技系種目への貢献は難しい。また、阿江と藤井（2002）は、「複雑なスポーツ運動やヒトの動きを研究し、スポーツ科学におけるスポーツバイオメカニクスの役割を果たすためには、研究のすすめ方に関してさらに多くの工夫が必要であろう」と述べ、対人種目に対する研究をスポーツバイオメカニクスがこれから取り組むべき課題の1つであるとしている。

これまでにテコンドーを題材に様々な分野（哲学、教育学、心理学、社会学、経営学、栄養学、生理学、生化学、医学、力学など）での研究がなされている。バイオメカニクスの研究では、試合の分析を行ったもの（Luk et al., 2001; Falco et al., 2012）、バイオメカニクスの動作メカニズムを明らかにし、蹴り動作のパフォーマンスを評価したもの（Tang et al., 2007; Falco et al., 2009; Kim et al., 2010; Estevan et al., 2013）がある。これらの研究から、前回し蹴りはテコンドーにおける多様な蹴り技の中でもポイント獲得率が高く、初心者が習得すべき、基本的かつ重要な蹴り技であることが報告されている。また、蹴りのインパクト力やスピード、動作時間を評価指標とし、テコンドーのパフォーマンス（「素早さ」）が評価されている。しかし、これらの研究で対象とされている実験試技は、被験者の任意のタイミングにより動作を始めた前回し蹴り動作であることが多い。しかし、テコンドーは対人種目であるため、時々刻々と変容する状況の中で蹴り動作開始のタイミングを変化させ、対応する必要がある。Kim and Kim（2014）は、LEDライトによる光提示を動作開始の合図とした試技を行わせている。そして、蹴り出し前のステップ動作の有無や蹴り出し

前のステップ動作からの蹴り出しタイミングの違いにより、インパクト時の蹴りスピードと LED ライトによる光提示からターゲットへのインパクトまでの時間がどのように変化するかを検討しているが、動作の変化については報告していない。

以上のことから、実際のテコンドーの競技場面においては、時々刻々と相手選手との関係が変化することを考慮すると、相手選手との関係により変化する様々な動作要因を評価するためのバイオメカニクス的研究は、試合に勝つ蹴り動作を分析するために不可欠である。

1.4 「素早さ」に関するバイオメカニクス的研究の必要性

「素早さ」は、様々な競技スポーツにおいて求められる技術要素の 1 つである。野球であれば、野手はアウトを取るために送球の「素早さ」が求められる。ここで、送球の「素早さ」を内野手の捕球から送球したボールが一塁手のグラブに収まるまでの総時間の短さと定義すると、「素早さ」を高めるためには、「捕球から送球までの動作時間を短くする要素」と「投げるボールスピードを大きくする要素」が挙げられる。しかし、選手の状態や試合の状況、戦術などその時々によって、同じ「素早さ」であったとしても内包する要素の割合は異なる。たとえば、一塁手近くに転がったボールを二塁手が捕球すれば、送球距離が短いので、ボールスピードを大きくすることよりも捕球から送球までの動作時間を短くすることで素早さを高めることができる。一方、一塁手から遠く離れた三塁手がボールを捕球した場合は、動作時間が長くなったとしても、投げるボールスピードを大きくする方が素早さを高めることができる。小林（2013）は、「スポーツにおけるスピードという語には、様々な意味が含まれている」「日本語では『スピード』と『クイックネス』に関する言葉の区別はあまり明確ではなく、『クイックネス』は、素早い動き、敏捷な身体の動きなどと表現され、これらの要素をも包括して『スピードのある動き』として表現されることがある」と述べている。ここでは、球技系種目である野球の送球を例に挙げたが、格闘技

系種目であるテコンドローの蹴り技であっても同様に、蹴り動作の「素早さ」には、様々な意味（動作要因）が含まれている。たとえば、蹴りの「速さ」に加え、相手に到達する時間の「早さ」、相手の動作への反応の「早さ」、姿勢の立て直しの「早さ」、蹴りの軌道の「意外さ」などといった様々な技術が必要となる。前述したように、ポイントを獲得するためには、衝撃力の強い蹴り技に比べて、相手選手に当てることができる「素早く」かつ「正確な」蹴り技が求められる傾向にある。テコンドローの「素早さ」における先行研究（Tang et al., 2007; Falco et al., 2009; Kim and Hintichs, 2006; Estevan et al., 2013; Falco et al., 2013; Kim et al., 2014; Kinoshita and Fujii, 2014）では、主に蹴りスピード、動作時間、反応時間といった測定が容易である値によって構成される絶対的パラメータが評価指標として用いられている。しかし、テコンドローが対人種目であることを考慮すると、「素早さ」を評価する際には、一見すると測定が不可能である「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータも含まれることになる。また、テコンドローの前回し蹴り動作には、蹴り脚が蹴りスピードを獲得する前の準スタティックな動作局面と、蹴り脚が地面から離れ、蹴りスピードを獲得していくダイナミックな動作局面が存在する。そして上述したような、蹴りスピード、動作時間は、蹴りスピードを獲得していくダイナミックな動作局面について評価している研究が多い。しかし、ダイナミックな動作局面は、軸脚のみで身体の挙動を制御する必要があることを考慮すると、両脚で身体に力を作用させることができる、準スタティックな動作局面の動作も蹴りスピードの生成および動作時間の短縮に大きく関係すると考えられる。

主に記録系種目を指す競争の「素早さ」では、速度や動作時間が評価指標に等しい。一方、上述したように、対人競技の「素早さ」は、複数の評価指標が存在する（蹴りスピード、動作時間など）ため、先行研究のように「素早さ」に含まれる評価指標を個別に評価しても対人競技の「素早さ」を評価できるとは言い難い。したがって、対人競技であるテコンドローにおける試合に勝つための蹴り動作のパフォーマンスを評価するためには、複数

ある「素早さ」の評価指標を複合的に検討することが不可欠である。

以上のことから、対人種目であるテコンドーの「素早さ」において、蹴りスピード、動作時間、反応時間といった測定が容易である絶対的パラメータ、および一見すると測定が不可能である「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータが複合した評価指標を提示することは、試合に勝つ蹴り動作を分析するために不可欠である。

1.5 本研究の目的および研究課題

1.5.1 目的

本研究の目的は、対人種目であるテコンドーの前回し蹴り動作に対してバイオメカニクスの観点から新たな「素早さ」の評価方法を提示することで、試合に勝つための蹴り動作に関する新たな知見を得ることである。

1.5.2 研究課題

本研究では、目的を達成するために以下の3つの課題を設定した。

研究課題 1

前回し蹴り動作における「素早さ」のうち絶対的パラメータとしての速度的、時間的「素早さ」の決定要因を明らかにし、評価すること。

- 1-1 前回し蹴り動作の速度的、時間的「素早さ」生成メカニズムを、ダイナミックな動作局面に着目して kinematics, kinetics, energetics 的観点から検討すること。
- 1-2 前回し蹴り動作の速度的、時間的「素早さ」生成メカニズムを、準スタティックな動作局面に着目して kinematics, kinetics, energetics 的観点から検討すること。

研究課題 2

前回し蹴り動作における「素早さ」のうち「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覺的「素早さ」を周波数的観点から提案し、主観的観点から検討すること。

研究課題 3

研究課題 1 と 2 で得られた知見をもとに、前回し蹴り動作における速度的、時間的、感覺的な「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互関連を検討すること。

1.6 研究上の仮定

本研究における実験に際して次の仮定を設定した。

- (1) 身体各セグメントは剛体とみなすことができ、身体は 15 の部分からなる剛体リンクモデルとみなすことができる。
- (2) 被験者の身体各セグメントの慣性特性は、阿江（1996）の推定式を用いて算出できる。
- (3) 全ての試技において、疲労による影響が結果や考察に与える影響は小さい。
- (4) 全ての試技において、性別、階級による影響が結果や考察に与える影響は小さい。

1.7 研究の限界

本研究には、以下のように得られた知見の一般化、普遍化に関する限界があるだろう。

- (1) 関節トルクは、関節まわりの筋群および靭帯などの組織が発揮した合成トルクであり、個々の筋の作用については言及できない。
- (2) テコンドーの蹴り技のうち前回し蹴り動作を対象に研究を行ったため、前回し蹴り動作以外の蹴り技に関しては、本研究で得られた知見をそのまま適用することはできない。
- (3) パフォーマンスを評価するための指標は、複数挙げられるが、まずは「素早さ」につ

いて検討したため、その他の評価指標に関しては言及できない。

1.8 用語の定義

本研究において、以下のように用語の定義をした (Table 1-1)。

- (1) 絶対的パラメータ：バイオメカニクス分野で主に用いられている、速度や時間といった物理量のうち、計測が容易であり、客観的に評価することができるパラメータ
- (2) 感覚的パラメータ：相手選手の認知を遅らせ、「素早い」と感じさせるような値の抽出が可能であり、客観的に評価することができるパラメータ
- (3) 速度的「素早さ」：前回し蹴り動作におけるインパクト時の蹴りスピードにもとづいた評価量
- (4) 時間的「素早さ」：前回し蹴り動作における動作時間にもとづいた評価量
- (5) 感覚的「素早さ」：前回し蹴り動作前の上下のステップ動作周期の類似性にもとづいた評価量
- (6) 主観的「素早さ」：個人の経験や能力、心理状態などに依存し、客観的には評価することができない評価量
- (7) kinematics 的観点：3次元自動動作分析装置から得られた座標データを用いた分析
- (8) kinetics 的観点：地面反計から得られた、力データを用いた分析
- (9) energetics 的観点：力学的エネルギーに関する値を用いた分析
- (10) 周波数的観点：フーリエ級数展開により得られた直流成分、余弦成分、および正弦成分の係数を用いた分析
- (11) 主観的観点：個人の経験や能力、心理状態などに依存し「素早い」と感じたかどうかのアンケートによる分析

Table 1-1 Definition of technical terms.

Standpoints	Evaluation parameters	Analysis methods
Subjectivity	Experience parameter	Questionnaire survey
Objectivity	Absolute parameter	Kinematics Kinetics Energetics
	Sensuous parameter	Frequency analysis

2. 文献研究

本章では，スウィング動作に関する研究，格闘技種目のバイオメカニクスの研究，対人種目の対応動作に関する研究，認知機能に関する研究を総括し，本研究の意義について検討する．

2.1 スウィング動作に関する研究

上肢のスウィング動作を代表とするスポーツ動作として，テニスのサーブ動作および野球の投球動作が挙げられる．また，下肢のスウィング動作を代表とするスポーツ動作として，サッカーのキック動作が挙げられる．

Sprigings et al. (1994) は，上肢およびラケットからなる系で，テニスのサーブ動作のラケットヘッドスピードに対する各関節のキネマティクスの貢献度を算出し，ラケットヘッドスピード生成メカニズムについて分析した．そして，インパクト時のラケットヘッドスピードは肩関節の内旋動作によって大きく生成され，その他に手関節の掌屈，肩関節の水平屈曲，肘関節の回内の順にラケットヘッドスピードの生成に関係していたと報告している．その他，テニスのサーブ動作に関して Elliott et al. (1995)，Gordon and Dapena (2006)，Tanabe and Ito (2007) も Sprigings et al. (1994) と同様の手法を用いて，上肢およびラケットからなる系でラケットヘッドスピードに対する各関節のキネマティクスの貢献度を算出している．

宮西ほか (1996) は，Sprigings et al. (1994) の方法を参考にし，上肢および上腕からなる系で野球の投球動作のボールスピードに対する各関節および上腕のキネマティクスの貢献度を算出し，ボールスピード生成メカニズムについて分析した．そして，テニスのサーブ動作ではインパクト時にほとんど貢献していなかった肘関節伸展動作によってもボール

水平速度を生成していることを明らかにした。また、モデルに上腕を加えることで、ボールスピード増加に対する上腕の役割を明らかにしている。

宮西ほか（1997）は、野球の投球動作について、体幹および投球側上肢各部分の力学的エネルギー、力学的エネルギーの流れ、さらに力学的仕事を算出した。そして、ボールへ伝えられるエネルギーの大部分が手関節の関節力パワーに起因しており、さらにそれらのパワーのほとんどは、体幹や肩関節の運動（筋群）によって生み出されたエネルギーが関節や筋・腱を介して転移することによってもたらされているものと報告している。

島田ほか（2004）は、野球の投球動作について、下腕や下肢における力学的エネルギーの流れについて分析した。そして、ピボット脚股関節トルクによって生成されたエネルギーが下腕および上腕を経由し、投球腕各部位およびボールに伝達されていることを明らかにした。また、ボール初速度を大きくするためには、動作終盤にストライド脚股関節力によって力学的エネルギーを大腿から下腕へと伝達することなどが重要であると報告している。

Robertson and Mosher（1985）は、サッカーの蹴り動作についてキネティクスの分析をした。そして、支持足着地後インパクトに向けて蹴り足の膝関節伸展動作開始前から膝関節伸展トルクを発揮し、インパクト直前には膝関節屈曲トルクを発揮していると報告している。

Levanon and Dapena（1998）は、サッカーのインステップキック動作について3次元分析をした。そして、インパクト直前の足部速度は約86%が膝関節の伸展動作により生成されていると報告している。

布目（1999）は、サッカーのインステップキック、インサイドキックにおける蹴り足の関節トルクと関節パワーを算出することで各々の蹴りのメカニズムを比較した。そして、両キックに共通して、膝関節伸展の顕著な関節トルクが右つま先の離地からインパクトまで発揮されていたと報告している。

手島と角田（2010）は、発育期男子サッカー選手における下肢スウィング速度とボールキック能力について分析した。そして、スウィング速度とボール飛距離の間には、全ての年代群に有意な相関関係が認められたものの、高校生群と大学生群ではスウィング速度よりもその他の技術的な要因が大きく関わることを報告している。

以上のことから、スウィング動作を用いて、遠位端である手部や足部を加速させる際には、近位端のセグメントから順次加速させていく（ムチ的な動作を行う）ことで効果的に遠位端を加速できる力学的メカニズムは共通である。しかし、達成すべき目的が異なることで、動作特性は異なると考えられる。本研究で対象としているテコンドーの前回し蹴り動作は、サッカーのキック動作と同様に下肢のスウィング動作であるが、バイオメカニクス分野で研究対象とされるような「助走をつける」ことができ、「地面に置いてある」ボールを蹴り、「動作時間」に規定がなく、「連続して」蹴ることがないサッカーのフリーキック動作とは動作メカニズムが異なると予想される。

したがって、テコンドーのためのトレーニングや練習方法の提案などに応用するためには、詳細な動作分析を行うことで、テコンドー競技特有の動作の特徴を示す必要があると考えられる。

2.2 格闘技種目のバイオメカニクスの研究

格闘技種目では、ゲームの流れ、状況などにより動作が時々刻々と変化するため、個人的・基礎的動作に着目することが多いバイオメカニクスの評価が難しい。したがってテコンドーでは、バイオメカニクスの研究に比べて、ゲーム分析や、トレーニングの効果の検証、傷害調査および減量調査に関する研究が多く行われている。

Albuquerque et al. (2012) は、シドニー（2000年）、アテネ（2004年）、北京（2008年）オリンピックにおけるテコンドー競技に出場した選手の性別ごとの生まれ月を調査した。結果として、性別に関係なくオリンピック出場者数と生まれ月との間に統計的に有意な関

係は、認められなかった。しかし、生まれ月とオリンピック出場の関係は、競技人口の多さにも影響を受けるため、これから更なる競技人口の増加が見込まれるテコンドーにおいては、近い将来、生まれ月が競技レベルに影響するだろうと報告している。

テコンドーでは、ゴムバンドを蹴り脚の足首に装着して、前回し蹴り動作を行うこと（ゴムバンドトレーニング）をトレーニングのひとつとすることが一般的である。そこで、**Jakubiak and Saunders (2008)** は、ゴムバンドトレーニングに、蹴りスピードを向上させる効果があるかどうかを検証した。その結果、トレーニングを行わせなかったコントロール群に比べ、1 か月間トレーニングを行った被験者群は、蹴りスピードが有意に増加したため、ゴムバンドトレーニングは、蹴りスピードの向上に効果的であると報告している。

Luk et al. (2001) は、1999 年に開催されたアジア大会のうち男子 3 階級 21 試合について、攻撃形態、蹴りの種類、攻撃部位、蹴り技の得点率を分析した。そして、中段への蹴りの割合は 91.4%と上段への蹴りの割合に比べて大きかった。前回し蹴りの割合は蹴り技全体の 72.7%であり、得点率も高かったと報告している。

Falco et al. (2012) は、2011 年開催のスペイン大学生選手権大会準決勝戦、決勝戦男女各 4 階級 61 試合について、攻撃形態、蹴りの種類、攻撃部位、蹴り技の得点率等を分析した。そして、カウンター攻撃よりも自ら攻撃を仕掛ける選手は試合に勝利しやすいこと、また近年のルール改正により、上段への蹴り（3 ポイント）の方が、中段への蹴り（1 ポイント）より有効になったにもかかわらず、依然として試合においては中段への前回し蹴りが広く用いられていると報告している。

しかし、動作を客観的な立場からバイオメカニクス的に捉えることは、非常に重要である。そこで以下のようなバイオメカニクス的な研究も散見される。

Kim and Hintichs (2006) は、テコンドーの 6 種類の蹴り技を、スウィング型（前蹴り、前回し蹴り）、突き型（横蹴り、後ろ蹴り）、組合せ型（横回し蹴り、後ろ回し蹴り）に分類し、3 次元分析をした。そして、スウィング型に分類された前回し蹴りは 6 種類の蹴り技

の中で最も蹴りのスピードが大きく、被験者間で股関節屈曲・伸展と膝関節屈曲・伸展の角度変化が同様のパターンを示していることから、初心者でも習得しやすく基本的かつ重要な蹴り技であると報告している。

Tang et al. (2007) は、テコンドー一流選手の利き足と非利き足での前回し蹴りに関してキネマティクスの分析をした。そして、一流選手の蹴り動作は利き足、非利き足とも蹴り足各関節のスピード変化は同様のパターンを示したことから、利き足、非利き足の区別はなく、左右両足で同じように蹴る技術がトップレベルでは必要であると報告している。

Falco et al. (2009) は、テコンドーの前回し蹴りに関して、選手間の距離（試技距離）に着目し、距離の変化が試技時間やインパクト時の力に与える影響について熟練者と未熟練者を比較した。そして、両群ともに距離の増加とともに試技時間も長くなりインパクト時の力は小さくなると報告している。

Kim et al. (2010) は、テコンドーの前回し蹴りに関して、試技距離の変化と体幹、骨盤、蹴り足、軸足股関節のキネマティクスの変化の関係に着目して分析をした。そして、試技距離が長くなるにつれて、軸足股関節を伸展し、骨盤は左回旋させることで、距離の増加に対応していると報告している。

Kim et al. (2011) は、テコンドーの蹴り技 4 種類（前回し蹴り、後ろ蹴り、横蹴り、後ろ回し蹴り）に関して、蹴り足の股関節角速度の単位ベクトルと膝関節角速度の単位ベクトルの内積をとることで、股関節と膝関節の協調運動の指標を定義し、特に屈曲・伸展運動とキックスピードの生成に着目して分析した。そして、前回し蹴りに比べ研究の少ない後ろ蹴りでは、股関節伸展動作および膝関節伸展動作によってキックスピードを獲得していると報告している。

Estevan et al. (2013) は、テコンドーのパフォーマンスは初期姿勢のスタンス、蹴りの距離、高さや選手のレベル、性別そして階級などによって大きく影響されるとし、初期姿勢のスタンスに着目して前回し蹴り動作の 3 次元分析をした。そして、スタンスを変化させ

てもインパクトにおけるキックスピードに有意差は認められなかったが、試技時間には、有意差が認められたことを報告している。

Kim and Kim (2014) は、LED ライトの発光を動作開始の合図とした試技を行わせている。そして、蹴り出し前のステップ動作の有無や蹴り出し前のステップ動作からの蹴り出しタイミングの違いにより、インパクト時の蹴りスピードと LED ライト発光からターゲットへのインパクトまでの時間がどのように変化するかを検討している。その結果、ステップの有無により、LED ライト発光からターゲットへのインパクトまでの時間には有意な差は認められないが、インパクト時の蹴りスピードには有意な差が認められることを報告している。

テコンドーだけでなく、他の格闘技種目においては、以下のようなバイオメカニクスの研究がなされている。

吉福と池上 (1984) は、格闘技における打 (蹴) の動作は相手を倒すことを目的とし、狙った身体部位に正確に命中させること、命中した際に効果があることが必要不可欠であると述べている。そこで様々な格闘技 (空手, 日本拳法, 中国拳法, キックボクシング) の打動作についてバイオメカニクスの観点からインパクトの衝撃力を分析し、それぞれの格闘技における打動作の特徴を挙げた。また、上肢を加速するパワーの主な発生源は肩関節を通じて体幹から上肢に流れ込むエネルギーであると報告している。

Emmermacher et al., (2007) は、空手の回し蹴りについてバイオメカニクスの観点から蹴り脚の軌道の分析を行った。その結果、蹴り脚の軌道の後半から半円を描くような軌道を描いていることは、相手選手に蹴り動作の認知を遅らせる効果があるのではないかと報告している。

以上のことから、テコンドーにおいて、様々な研究が行われているが、詳細な動作分析を行った研究は少なく、前回し蹴り動作を行うための基本メカニズム、また前回し蹴り動作を行うことによって身体に生じる力学特性を示した研究はない。また、バイオメカニク

スの分野におけるテコンドーの「素早さ」に関する評価は、主に蹴りスピード、動作時間、反応時間といった測定が容易である値によって構成される絶対的パラメータが用いられている。しかし、テコンドーが対人種目であることを考慮すると、「素早さ」を評価する際には、一見すると測定が不可能である「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータも含まれることになる。

様々な格闘技においてその競技特性の違いから、同じ「打撃」という動作であってもキネマティクスの分析では、異なる点が挙げられるが、エナジェティクスの分析では同様の傾向が示されると考えられる。そこでテコンドーの前回し蹴りの分析を行うことでテコンドーだけではなく、他の蹴り動作を用いる格闘技の指導に関しても有益な示唆を得ることができると考えられる。

2.3 対人種目の対応動作に関する研究

Fujii et al. (2014) は、バスケットボールの1対1の攻防について、ディフェンスの動きに着目し、(1) ディフェンスの成否を説明するための変数を検討、(2) どのようなパターンでディフェンスを成功させているかを検討することを目的として研究を行った。線形判別分析の結果、ディフェンダーの「動きだし」時間およびディフェンダーとドリブラーの内外側方向のピーク速度がディフェンスの成否に重要なパラメータであること、また、ディフェンスが成功した試技においては「動きだし」の始まりが早く、ディフェンスが成功するパターンは3つにわけられることを報告している。

Fujii et al. (2015) は、バスケットボールの1対1の攻防について、ディフェンスの成功率は、determination局面での荷重状態では78.8%であったにもかかわらず、非荷重状態では29.6%にまで下がったことを報告している。このことから、攻防直前の地面反力が、ディフェンスの成否を判断するために重要な役割を担っていることを報告している。

以上のことから、対人競技の対応動作に関する研究は行われているが、陸上競技、スピ

ードスケート、水泳などの記録系種目に比べて少ない。上述したように、スポーツバイオメカニクス分野の研究は、個人的・基礎的動作に着目したものが多い。したがって、ゲームの流れ、状況などにより動作が時々刻々と変化する野球、サッカー、テニスなどの球技系種目、テコンドーを含む柔道、ボクシング、レスリングなどの格闘技系種目に関しては、対応動作が無数に存在するために、バイオメカニクスの観点から研究対象とすることが難しい。しかし、対人種目に対するバイオメカニクスの研究を、これからのスポーツバイオメカニクス分野発展のために必要かつ重要な観点の1つだといえる。

2.4 認知機能に関する研究

田山と川崎（1994）は、速度知覚について運動視の基本は、その質的側面としての方向の知覚と量的側面としての速度の知覚であると報告している。

Pollock（1953）は、水平方向よりも垂直方向のほうが運動対象の位置の変化を知覚するのに必要な最小速度である、運動速度閾が低いと報告している。

Welford（1980）は、青年の光単純刺激による反応時間は、およそ 0.19 sであることを報告している。

以上のことから、ヒトの運動知覚の習性を利用することで、相手選手に、自分の前回し蹴り動作があたかも「素早い」蹴り動作であるように錯覚させることが可能であることが考えられる。

2.5 文献研究の総括

スウィング動作の速度獲得メカニズムに関する研究は、様々な競技種目において広く行われている。しかし、達成すべき目的が異なることで、動作特性は異なると考えられる。本研究で対象としているテコンドーの前回し蹴り動作は、先行研究の多いサッカーのキック動作と同様に下肢のスウィング動作であるが、蹴り動作のターゲットが異なり、ルール

により制限されることで、異なった特徴を示すことが考えられる。テコンドーの蹴り動作に関する研究では、蹴りの種類や蹴りの距離等に着目し、キネマティクスのパラメータのみではなくインパクト時のインパクト力の変化が研究されている。しかし、ポイントを獲得するために必要なスピードが「速い」蹴りに加え、相手に到達する時間が「早い」蹴り、相手の動作への「早い」反応、姿勢の「早い」立て直しなど、テコンドー特有の「素早い」蹴り動作について検討しているものはない。

主に記録系種目を指す競争の「素早さ」では、速度や動作時間が評価指標に等しい。一方、上述したように、対人競技の「素早さ」は、評価指標が複数存在する（蹴りスピード、動作時間など）ため、先行研究のように「素早さ」に含まれる評価指標を個別に評価しても対人競技の「素早さ」を評価できるとは言い難い。したがって、対人競技であるテコンドーにおける試合に勝つための蹴り動作のパフォーマンスを評価するためには、複数ある「素早さ」の評価指標を複合的に検討することが不可欠である。

以上のことから、対人種目であるテコンドーの「素早さ」において、蹴りスピード、動作時間、反応時間といった測定が容易である絶対的パラメータおよび、一見すると測定が不可能である「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータが複合した評価指標を提示することは、試合に勝つ蹴り動作を分析するために不可欠である。

3. 方法

本研究では、研究課題 1, 2 および 3 を遂行するために 3 回の実験（実験 1-A, 実験 1-B, 実験 2）および 1 回の測定（測定 1）を行った。なお本研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認（課題番号 体 27-66）を得て行われた。

3.1 実験 1

本実験では、2 か所の異なる実験環境（実験 1-A : Figure 3-1, 実験 1-B : Figure 3-2）で、異なる被験者に対して、同内容の実験を実施した。実験環境の違いによるデータへの影響はないものとする。

3.1.1 被験者

テコンドーを専門競技とする 35 名を被験者とした（男子選手 27 名, 女子選手 8 名）。競技レベルは全日本選手権大会入賞者から主だった成績のない者まで様々であった。Table 3-1 に、被験者の身体特性、競技歴および戦績を示した。被験者には事前に実験内容や危険性について説明を行い、口頭および書面にて参加の同意を得た。

3.1.2 実験試技

利き脚での中段前回し蹴りとし、最大努力で素早い蹴り動作を行うよう被験者に指示をした（Figure 3-3）。素早い動作について各被験者には「ミットまでの到達時間が短いかつ蹴り脚のスピードが速いことである」という共通の認識を与えた。先行研究（Falco et al., 2012）を参考に軸脚側のつま先からミットの中心までの水平距離が脚長と等しくなるように設定した 3 試技を行わせ、3 試技の中でインパクト時の蹴りスピード（後述）が最も大きかった

試技を分析対象試技とした。試技の際には、被験者と身長が同程度の相手選手の中段に前回し蹴りを行うことを想定して、テコンドー経験者が被験者の中段（体幹部）の高さでミットを保持した。なお、実験前に十分なウォーミングアップを行わせ、試技間に十分な休憩をとらせることで、全ての試技で全力に試技を行わせた。

3.1.3 データ収集

(1) 実験 1-A

赤外線カメラ 14 台を含む光学式 3 次元自動動作分析装置（VICON MX+, Vicon Motion Systems 社製）を用い、18 名の被験者（男子選手 13 名、女子選手 5 名、Subject No. 1-18）の身体各部およびミットに貼付した専用マーカー（Figure 3-4）の 3 次元座標値をサンプリング周波数 250 Hz で収集した。2 台のフォースプラットフォーム（Kistler 9281A, 9287B, Kistler 社製）を用い、両脚の地面反力をサンプリング周波数 1000 Hz で測定した(Figure 3-1)。

(2) 実験 1-B

赤外線カメラ 14 台を含む光学式 3 次元自動動作分析装置 (MAC3D System, Motion Analysis 社製) を用い、17 名の被験者（男子選手 14 名、女子選手 3 名、Subject No. 19-35）の身体各部およびミットに貼付した専用マーカー（Figure 3-4）の 3 次元座標値をサンプリング周波数 200 Hz で収集した。また、2 台のフォースプラットフォーム (Kistler 9281A, 9287B, Kistler 社製) を用い、両脚の地面反力をサンプリング周波数 2000 Hz で測定した（Figure 3-2）。

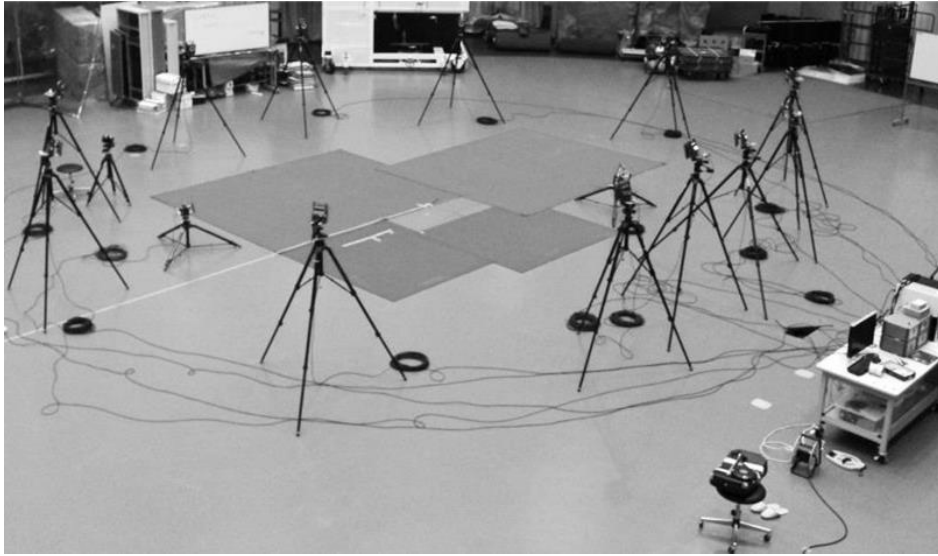


Figure 3-1 Experimental field 1-A.

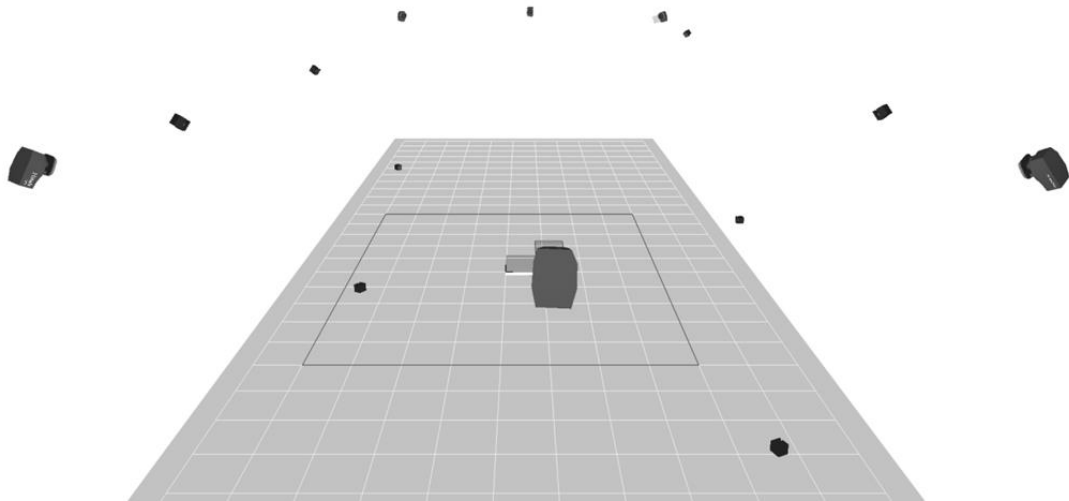


Figure 3-2 Experimental field 1-B.

Table 3-1 Characteristics of all thirty-five subjects.

Subject No.	Sex	Age (yr.)	Height (m)	Body mass (kg)	Experience (yr.)	Remarks
1	Female	20	1.58	62	2	
2	Female	20	1.56	51	2	National university game 2 nd
3	Female	22	1.58	57	5	National game 2 nd ,and National university game 1 st
4	Male	27	1.83	66	10	National game 2 nd
5	Male	21	1.68	61	4	National game 2 nd ,and National university game 1 st
6	Male	20	1.7	58	3	National game entry and National university game 3 rd
7	Female	19	1.7	59	1	
8	Male	20	1.7	61	2	
9	Male	20	1.71	98	2	National university game 2 nd
10	Male	19	1.78	76	1	
11	Male	25	1.74	63	9	
12	Male	21	1.68	64	10	National game entry
13	Male	22	1.68	63	6	National university game 2 nd
14	Male	29	1.65	50	20	Taiwan university game Top 8
15	Female	19	1.58	48	1	
16	Male	20	1.77	71	5	National game 3 rd
17	Male	19	1.75	64	9	National game entry
18	Male	19	1.69	58	1	
19	Male	20	1.75	59	2	
20	Male	20	1.71	54	2	
21	Male	20	1.74	64	2	
22	Female	20	1.66	59	2	National game 3 rd and National university game 2 nd
23	Male	19	1.72	57	1	
24	Female	19	1.58	50	1	
25	Male	20	1.83	64	2	National game entry
26	Male	20	1.71	59	2	
27	Female	19	1.55	66	1	
28	Male	19	1.72	64	1	
29	Male	20	1.75	63	2	
30	Male	20	1.77	66	2	National game entry and National university game 2 nd
31	Male	20	1.76	56	2	
32	Male	19	1.75	63	1	
33	Male	19	1.76	66	1	
34	Male	25	1.83	64	3	National game entry and National university game 3 rd
35	Male	27	1.74	61	12	National game entry
Mean		20.8	1.71	62	3.8	
SD		2.6	0.07	8.5	4.1	

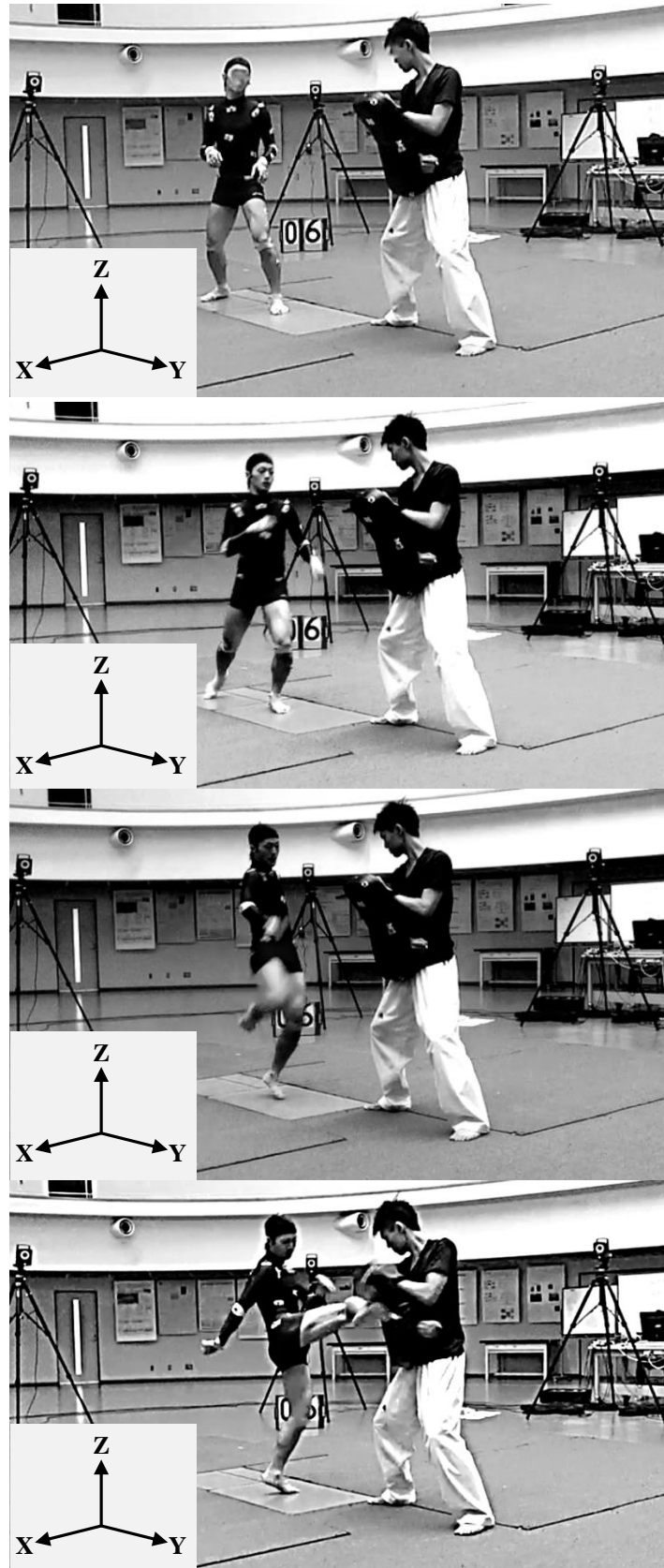
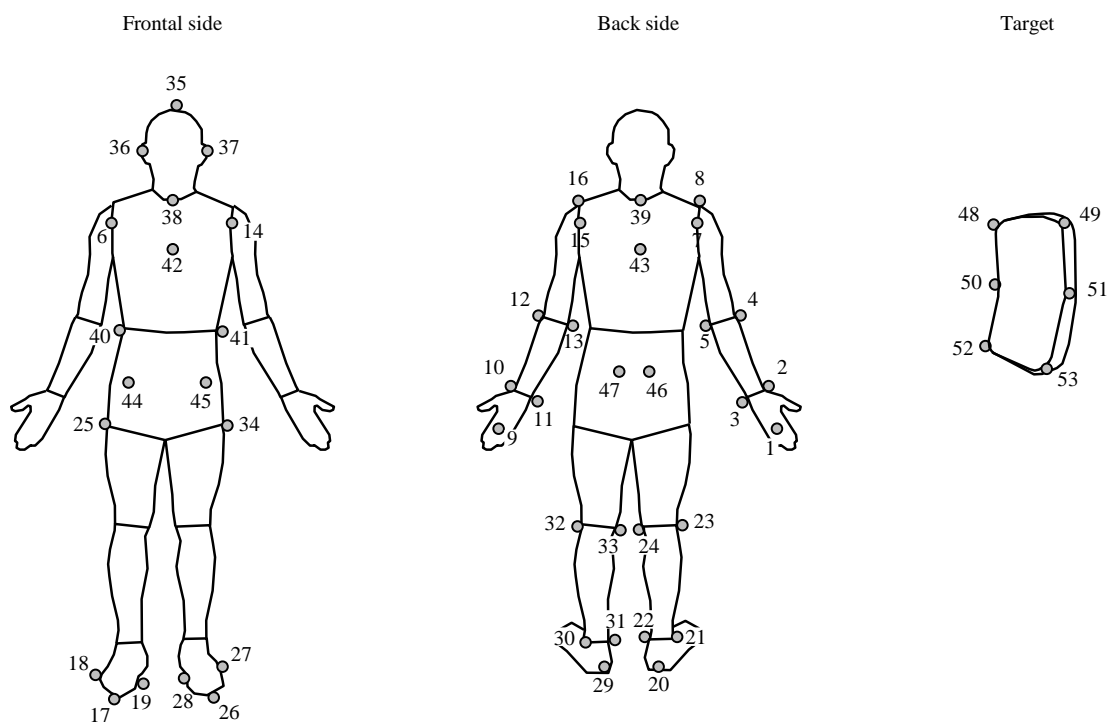


Figure 3-3 Experimental trial.



1 Right 3rd metacarpal	(RHND)	21 Right ankle lateral side	(RANL)	41 Left rib	(LRIB)
2 Right wrist lateral side	(RWRL)	22 Right ankle medial side	(RANM)	42 Xiphoid process frontal side	(XPFS)
3 Right wrist medial side	(RWRM)	23 Right knee lateral side	(RKNL)	43 Xiphoid process back side	(XPBS)
4 Right elbow lateral side	(RELL)	24 Right knee medial side	(RKNM)	44 Right anterior superior iliac spine	(RASI)
5 Right elbow medial side	(RELM)	25 Right trochanter major	(RTRO)	45 Left anterior superior iliac spine	(LASI)
6 Right shoulder frontal side	(RSHF)	26 Left toe	(LTOE)	46 Right posterior superior iliac spine	(RPSI)
7 Right shoulder back side	(RSHB)	27 Left 5th metatarsal	(LBAL)	47 Left posterior superior iliac spine	(LPSI)
8 Right acromion	(RSHA)	28 Left 1st metatarsal	(LBAM)	48 Target 1	(MIT1)
9 Left 3rd metacarpal	(LHND)	29 Left calcaneus	(LHEL)	49 Target 2	(MIT2)
10 Left wrist lateral side	(LWRL)	30 Left ankle lateral side	(LANL)	50 Target 3	(MIT3)
11 Left wrist medial side	(LWRM)	31 Left ankle medial side	(LANM)	51 Target 4	(MIT4)
12 Left elbow lateral side	(LELL)	32 Left knee lateral side	(LKNL)	52 Target 5	(MIT5)
13 Left elbow medial side	(LELM)	33 Left knee medial side	(LKNM)	53 Target 6	(MIT6)
14 Left shoulder frontal side	(LSHF)	34 Left trochanter major	(LTRO)		
15 Left shoulder back side	(LSHB)	35 Top of head	(HEAD)		
16 Left acromion	(LSHA)	36 Right ear	(REAR)		
17 Right toe	(RTOE)	37 Left ear	(LEAR)		
18 Right 5th metatarsal	(RBAL)	38 Suprasternal frontal side	(STEF)		
19 Right 1st metatarsal	(RBAM)	39 Suprasternal back side	(STEB)		
20 Right calcaneus	(RHEL)	40 Right rib	(RRIB)		

Figure 3-4 Location of reflective markers.

3.1.4 データ処理

被験者からミットに向かう水平方向を Y 軸，鉛直上向きを Z 軸，Y 軸と Z 軸の外積によって得られる方向を X 軸とし，X 軸，Y 軸，Z 軸からなる座標系を静止座標系と定義した (Figure 3-3)。

実験 1-B で取得した 3 次元座標値を，内挿補完することで，250Hz にアップサンプリングした。またサンプリング周波数 2000Hz で収集したフォースプラットフォームのデータは内挿補完することで，250Hz にダウンサンプリングした。収集した被験者の身体各部およびミットに貼付したマーカーの 3 次元座標値に対して，Wells and Winter (1980) の方法を参考に最適遮断周波数 (12.5Hz-25.0Hz) を決定し，Butterworth digital filter を用いて平滑化処理を行った。

3.2 測定 1

3.2.1 被験者

テコンドーを専門競技とする 48 名 (年齢 18.9 ± 2.9 [yr.]，身長 1.65 ± 0.09 [m]，身体質量 55.4 ± 10.8 [kg]，国籍は日本および韓国) を被験者とした (男子選手 29 名，女子選手 19 名)。

3.2.2 測定試技

蹴り動作を行う際に用いる上下に動くステップ運動を 60 秒間行うように指示した。十分な休憩を取り，3 回測定を行った。

3.2.3 被験者固有の測定周波数

測定で収集した 3 回分の測定値を平均し，被験者固有のリズム運動の周波数とした。

3.3 実験 2

3.3.1 被験者

テコンドーを専門競技とする 17 名を被験者とした(男子選手 14 名, 女子選手 3 名, Subject No. 19-35). 競技レベルは全日本選手権大会入賞者から主だった成績のない者まで様々であった. Table 3-1 に, 被験者の身体特性, 競技歴および戦績を示した. 被験者には事前に実験の説明を行い, 口頭および書面にて参加の同意を得た.

3.3.2 実験試技

利き脚での中段前回し蹴りとし, 最大努力で素早い蹴り動作を行うよう被験者に指示をした (Figure 3-5). 素早い動作について各被験者には「ミットまでの到達時間が短いかつ蹴り脚のスピードが速いことである」という共通の認識を与えた. 実験 1 と同様に, 軸脚側のつま先からミットの中心までの水平距離が脚長と等しくなるように設定した. また, 蹴り出すタイミングについて 3 つの条件を設けた. 具体的には, 条件 1: 被験者が蹴りやすいタイミングで任意に動作を行う試技, 条件 2: 被験者の身体重心が上方向に速度を持っている時 (UP 局面) に験者がミット上部に取り付けられた LED ライトにより光提示を行い, 被験者は発光を確認後, できる限り素早く蹴る試技, 条件 3: 被験者の身体重心が下方向に速度を持っている時 (DOWN 局面) に験者が条件 2 と同様の光提示を行い, 被験者は発光を確認後, できる限り素早く蹴る試技である (Figure 3-6). 光提示タイミングは, 被験者の上下ステップ動作に合わせて験者が意図的に操作した (Figure 3-5). 条件 2, 3 の設定通りに光提示ができなかった被験者 3 名を除外し, 残りの被験者 12 名 (Subject No. 19-21, 23,24, 26-29, 31-33) の 36 試技を分析対象とした. 試技の際には, 被験者と身長が同程度の相手選手の中段に前回し蹴りを行うことを想定して, テコンドー経験者が被験者の中段 (体幹部) の高さでミットを保持した. なお, 実験前に十分なウォーミングアップを行わせ, 試技間に十分な休憩をとらせることで, 全ての試技で全力に試技を行わせた.

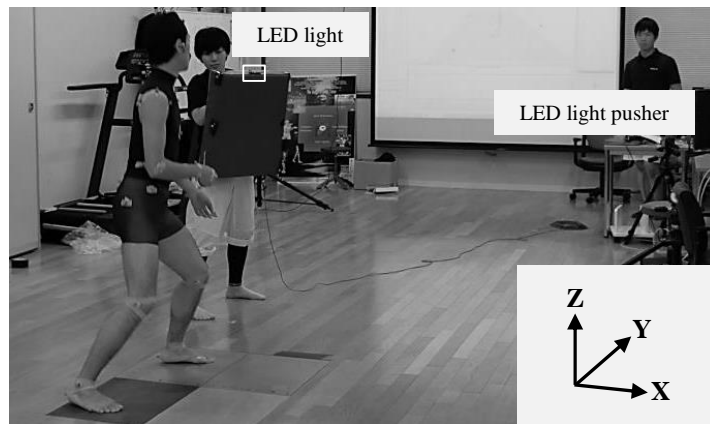


Figure 3-5 Experimental trial.

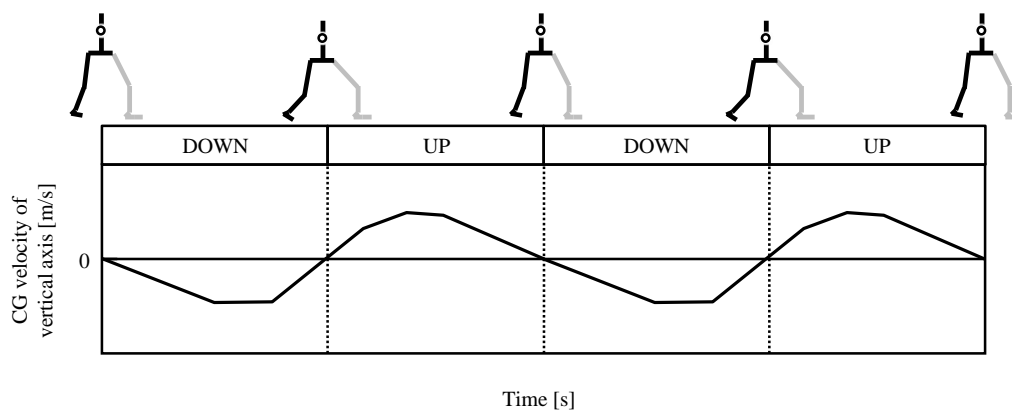


Figure 3-6 Experimental condition.

3.3.3 データ収集

実験 1-B と同様に、赤外線カメラ 14 台を含む光学式 3 次元自動動作分析装置 (MAC3D System, Motion Analysis 社製) を用い、17 名の被験者の身体各部およびミットに貼付した専用マーカの 3 次元座標値をサンプリング周波数 200 Hz で収集した。2 台のフォースプラットフォーム (Kistler 9281A, 9287B, Kistler 社製) を用い、両脚の地面反力をサンプリング周波数 2000 Hz で測定した。また、ミット上部に付けられた LED ライトによる光提示タイミングを記録したアナログデータをサンプリング周波数 2000 Hz で記録した (Figure 3-5)。

3.3.4 データ処理

実験 1 と同様に被験者からミットに向かう水平方向を Y 軸、鉛直上向きを Z 軸、Y 軸と Z 軸の外積によって得られる方向を X 軸とし、X 軸、Y 軸、Z 軸からなる座標系を静止座標系と定義した (Figure 3-5)。

サンプリング周波数 2000Hz で収集したフォースプラットフォームおよび光提示タイミングを記録したアナログデータは内挿補完することで、200Hz にダウンサンプリングした。収集した被験者の身体各部およびミットに貼付したマーカの 3 次元座標値に対して、Wells and Winter (1980) の方法を参考に最適遮断周波数 (12.5Hz-25.0Hz) を決定し、Butterworth digital filter を用いて平滑化処理を行った。

3.4 身体代表点の座標値の算出および分析基礎パラメータの算出方法

3.4.1 身体代表点の座標値の算出

手関節、肘関節、足関節、膝関節、第 3 中足骨頭については、関節の内外側に貼付した 2 個のマーカの中点を関節中心とした。肩関節については、関節の前後に貼付した 2 個のマーカの中点を関節中心とした。股関節については臨床歩行分析研究会 (倉林ら, 2003) の推定式を用い、大転子と上前腸骨棘点のマーカを結ぶ線分上で左右大転子から 1/3 の位

置にある点を仮想標点とし、左右の仮想標点結ぶ線分上で、左右大転子間の長さの 18% を内挿した点を股関節中心とした。試技前に被験者の安全を考慮して取り外した左右つま先のマーカーについては、試技前に取得した静止立位時のつま先、第 1 中足骨頭、第 5 中足骨頭、および踵に貼付したマーカーの座標値と試技時の第 1 中足骨頭、第 5 中足骨頭、および踵に貼付したマーカーの座標値を用いて試技中のつま先の座標値を再算出した。なお、利き脚が左脚であった被験者のデータは、座標変換を行うことで、右脚で試技を行ったとして算出した。以下、本研究では、右脚を蹴り脚、左脚を軸脚と表記する。

3.4.2 身体セグメント移動座標系および関節移動座標系の運動軸定義

本研究では、人体を手部、前腕、上腕、足部、下腿、大腿、頭部、上胴および下胴の計 15 セグメントが 14 の関節で連結されている剛体リンクモデルとして取り扱った。上胴と下胴の間は体幹仮想関節（以下、体幹関節）で連結されているものとした。また、手部、前腕、上腕、足部、下腿、大腿、頭部、上胴、および下胴の各セグメントに右手系の移動座標系を設定し、各セグメントの姿勢とした (Figure 3-7)。上肢および下肢に関しては、右上肢、右下肢の座標系について示したが、左上肢、左下肢も同様の手順で設定した。なお、大腿と下腿の移動座標系を設定する際には、膝関節が屈曲・伸展動作のみを行うように設定した。詳細は Appendix に記載する。

足部、下腿、大腿、および下胴にそれぞれ設定した移動座標系の各軸は、足関節 (1 自由度：底屈・背屈)、膝関節 (1 自由度：屈曲・伸展)、股関節 (3 自由度：屈曲・伸展、内転・外転、内旋・外旋)、および体幹関節 (3 自由度：前屈・後屈、左傾・右傾、左回旋・右回旋) の運動軸を表している。

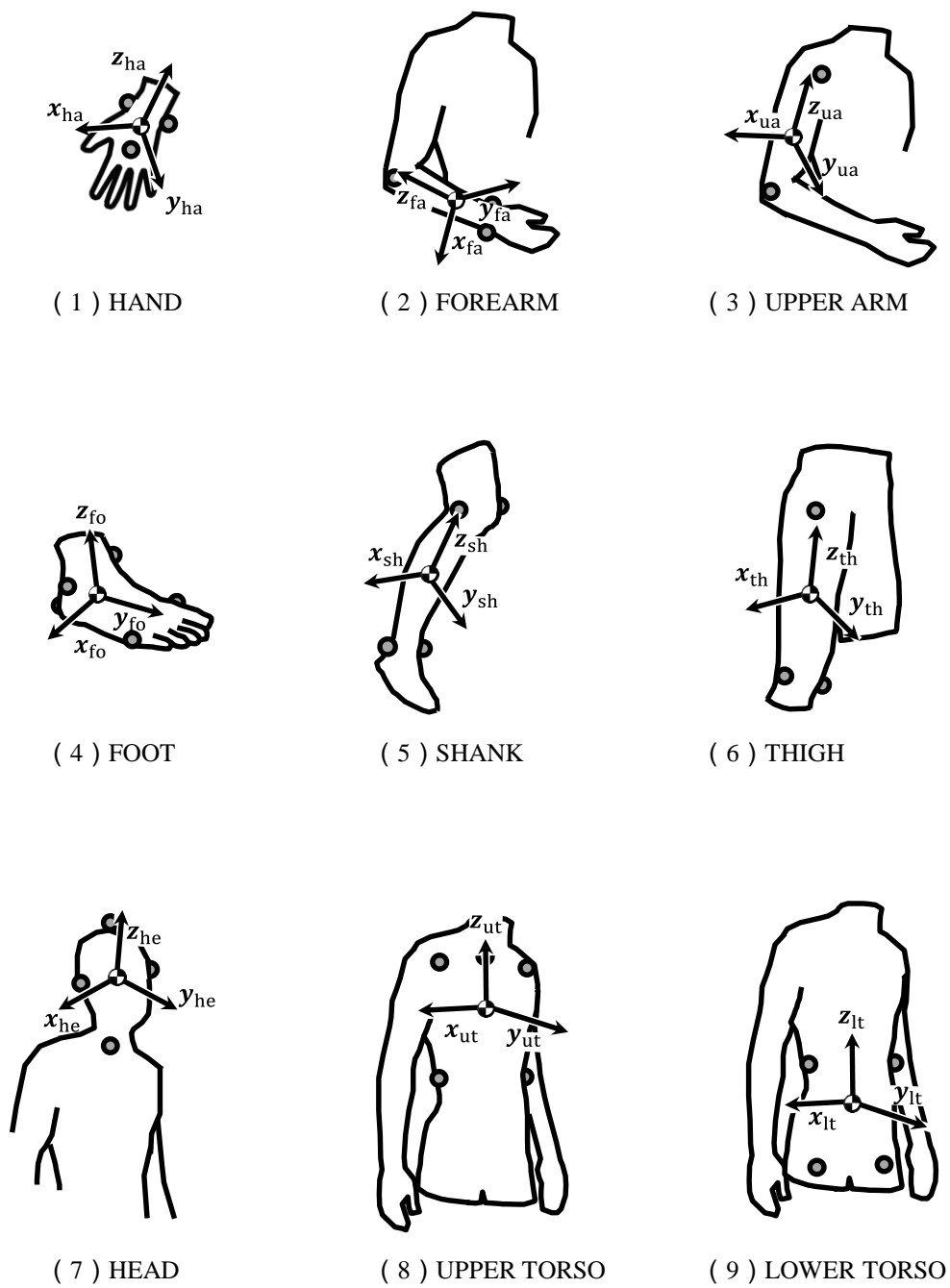


Figure 3-7 Segment coordinate system.

3.4.3 身体セグメント角度および角速度

(1) 身体セグメント角度

設定した身体セグメント移動座標系をもとに，上胴および下胴のセグメント角度を算出した．詳細は Appendix に記載する．

(2) 身体セグメント角速度

設定した身体セグメント移動座標系をもとに，身体セグメントの移動座標系各軸まわりの角速度を以下の式 (4.1) により算出した．静止座標系各軸まわりの角速度を算出する場合には，移動座標系各軸まわりの角速度に座標変換を行った．

$$\omega_i = \mathbf{k} \cdot \frac{d\mathbf{j}}{dt}, \quad \omega_j = \mathbf{i} \cdot \frac{d\mathbf{k}}{dt}, \quad \omega_k = \mathbf{j} \cdot \frac{d\mathbf{i}}{dt} \quad (4.1)$$

ここで ω_i ， ω_j ， ω_k は，身体セグメントの移動座標系各軸まわりの角速度， \mathbf{i} ， \mathbf{j} ， \mathbf{k} は，移動座標系の各軸方向の単位ベクトルを示す．

3.4.4 関節角度および角速度

(1) 関節角度

設定した身体セグメント移動座標系をもとに，左右足関節，膝関節，股関節の関節角度を算出した．詳細は Appendix に記載する．

(2) 関節角速度

算出した移動座標系における身体セグメント角速度を用い，各関節に隣接する遠位セグメントの角速度から近位セグメントの角速度の差を取ることで関節角速度を以下の式 (4.2) により算出した．

$$\begin{aligned}\omega_{jx} &= \mathbf{x}_j \cdot (\boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_p) \\ \omega_{jy} &= \mathbf{y}_j \cdot (\boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_p) \\ \omega_{jz} &= \mathbf{z}_j \cdot (\boldsymbol{\omega}_d - \boldsymbol{\omega}_p)\end{aligned}\tag{4.2}$$

ここで ω_{jx} , ω_{jy} , ω_{jz} は, 各関節軸まわりの角速度, \mathbf{x}_j , \mathbf{y}_j , \mathbf{z}_j は, 各関節運動軸の単位ベクトル, $\boldsymbol{\omega}_d$ は, 各関節に隣接する静止座標系における遠位セグメントの角速度, $\boldsymbol{\omega}_p$ は, 各関節に隣接する静止座標系における近位セグメントの角速度を示している.

3.4.5 身体セグメントの重心座標値, 速度, 加速度, 全身の重心座標値, 速度, 加速度および慣性パラメータ

算出した身体代表点の座標データおよびフォースプラットフォームによって測定した被験者の体重から, 阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて, 身体セグメントおよび全身の重心座標データ, 各セグメントの慣性パラメータを算出した. また, 算出した身体セグメントおよび全身の重心座標データを時間微分することで身体セグメントおよび全身の重心速度データを, 身体セグメント重心速度データを時間微分することで身体セグメント重心加速度データを算出した.

4. ダイナミックな動作局面における前回し蹴り動作の「素早さ」

4.1 目的

これまでのテコンドーの「素早さ」に関する研究では、「素早さ」の評価として、蹴りスピード、動作時間などが個別に用いられてきた (Tang et al., 2007; Falco et al., 2009; Kim et al., 2010; Estevan et al., 2013). しかし、「素早さ」は様々な評価指標から成り立ち、それぞれの評価指標を個別に検討したとしてもテコンドーにおける「素早さ」を評価したとは言い難い. そこでまずは、測定が容易である、絶対的パラメータとしての「蹴りスピード」および「動作時間」の2要因を総合的に評価する必要がある. テコンドーの前回し蹴り動作は、蹴り脚の動きが少ない蹴り脚離地前の準スタティックな動作局面と蹴り脚離地後に大きな蹴りスピードを獲得していくダイナミックな動作局面が存在する. 本章では、大きな蹴りスピードを有するダイナミックな動作局面として、蹴り脚の離地後からターゲットへのインパクトまでを詳細に分析し、前回し蹴り動作における速度的、時間的「素早さ」の獲得メカニズムを明らかにすることから始める.

本章の目的は、ダイナミックな動作局面に着目して前回し蹴り動作における「素早さ」のうち、測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の決定要因を kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにすることである.

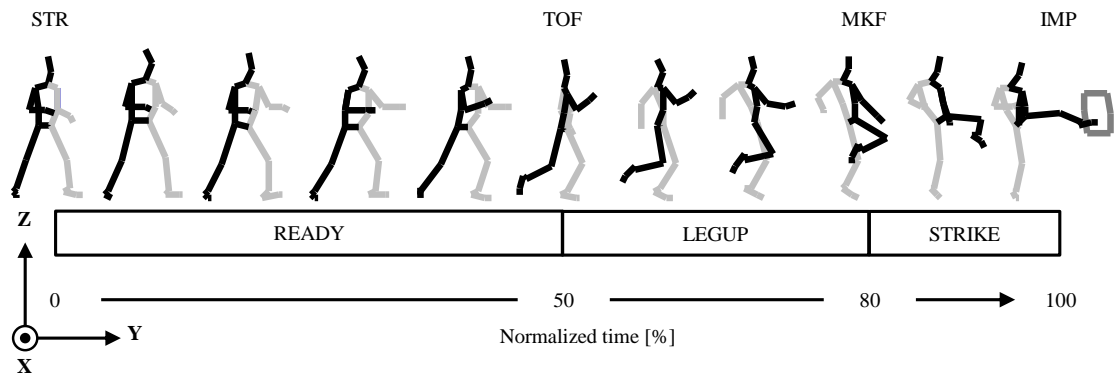
4.2 方法

本章の被験者、実験環境および試技、データ収集、データ処理は第3章において述べた実験1の通りである. 分析基礎パラメータについても同様に、第3章において述べた. 本章では、ダイナミックな動作局面に着目して前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素

早さ」を kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにするために後述するような kinematics 的貢献度, 関節トルク, 関節力によるモーメント, エネルギーフローと蹴りスピードおよび動作時間の関係を検討する.

4.2.1 局面定義

全身の重心の合成速度 (速さ) を重心スピードとし, その重心スピードが急激に上昇する前の極小時を「蹴り動作開始」(Start to kick, 以下, STR), 蹴り脚のつま先が地面から離れる瞬間を「蹴り脚離地」(Toe rises off the floor, 以下, TOF), 蹴り脚膝関節の屈曲が最大になる瞬間を「蹴り脚膝関節最大屈曲」(Maximum knee flexion, 以下, MKF), 蹴り脚足部がミットと接触する瞬間を「インパクト」(Impact, 以下, IMP) と定義した (Figure 4-1). また, STR から TOF までを READY 局面, TOF から MKF までを LEGUP 局面, MKF から IMP までを STRIKE 局面とした. STR から IMP までの動作時間を 100% とし, 得られた時系列データの規格化を行った. なお, 全被験者が READY 局面, LEGUP 局面, STRIKE 局面に要した時間の平均値にもとづき, 各局面時間がそれぞれ 50%, 30%, 20% になるように規格化を行った. なお, 本章では, ダイナミックな動作局面として, LEGUP 局面および STRIKE 局面を分析した.



STR: Start to kick, TOF: Toe rises off the floor, MKF: Maximum knee flexion, IMP: Impact to target.

Figure 4-1 Phase definition of roundhouse kick.

4.2.2 kinematics 的貢献度

本研究では、試合時の前回し蹴りの打突部位を考慮して、蹴り脚足部第 3 中足骨頭を蹴りスピード評価の対象点とした。そして、身体セグメントの角速度から先行研究 (Springs et al., 1994) の方法をもとに、下胴および蹴り脚各関節の運動によって得られる蹴り速度 (蹴りスピード評価対象点の速度) を算出し、蹴り速度の合成速度を蹴りスピードとした。任意の瞬間の蹴り速度は、関節間の相対速度を利用して以下の式 (4.1) で表すことができる。

$$\mathbf{V}_{\text{kick}} = \mathbf{V}_{\text{to}} + \mathbf{V}_{\text{hi/to}} + \mathbf{V}_{\text{kn/hi}} + \mathbf{V}_{\text{an/kn}} + \mathbf{V}_{\text{kick/an}} \quad (4.1)$$

ここで、 \mathbf{V}_{kick} は任意の瞬間の蹴り速度、 \mathbf{V}_{to} は軸足各関節の運動によって得られた下胴上端中心の速度ベクトル、添字の hi, kn, an は、蹴り脚股関節、蹴り脚膝関節、蹴り脚足関節をそれぞれ示し、たとえば、 $\mathbf{V}_{\text{hi/to}}$ は、蹴り脚股関節速度から下胴上端中心の速度の差を取ったベクトルを示す。ここで式 (1) の右辺を各セグメントの角速度を用いて表すと以下の式 (4.2) に変換できる。

$$\mathbf{V}_{\text{kick}} = \mathbf{V}_{\text{to}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{lt}} \times \mathbf{r}_{\text{hi/to}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{th}} \times \mathbf{r}_{\text{kn/hi}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{sh}} \times \mathbf{r}_{\text{an/kn}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{fo}} \times \mathbf{r}_{\text{kick/an}} \quad (4.2)$$

添字の lt, th, sh, fo は、下胴、蹴り脚大腿、蹴り脚下腿、蹴り脚足部の各セグメントをそれぞれ示す。 \mathbf{r} は添字の 2 点を結ぶベクトルである。たとえば、 $\mathbf{r}_{\text{hi/to}}$ は、下胴上端中心から蹴り脚股関節中心点を結ぶベクトルを示す。ここで式 (4.2) の右辺を各関節の角速度を用いて表すと以下の式 (4.3) に変換できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{\text{kick}} = & \mathbf{V}_{\text{to}} + (\boldsymbol{\omega}_{\text{ltx}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{lty}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{ltz}}) \times \mathbf{r}_{\text{kick/lt}} + (\boldsymbol{\omega}_{\text{hix}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{hiy}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{hiz}}) \times \mathbf{r}_{\text{kick/hi}} \\ & + (\boldsymbol{\omega}_{\text{knx}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{kny}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{knz}}) \times \mathbf{r}_{\text{kick/kn}} + (\boldsymbol{\omega}_{\text{anx}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{any}} + \boldsymbol{\omega}_{\text{anz}}) \times \mathbf{r}_{\text{kick/an}} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$\boldsymbol{\omega}_{\text{lt}}$ 以外の角速度は各関節の角速度ベクトルである。式 (4.3) の右辺の各成分を蹴り速度ベクトルの方向へ投影することで、下胴および蹴り脚各関節の関節運動によって生成された蹴りスピードを算出した。なお本研究では、この生成された蹴りスピードを kinematics 的貢献 (以下、貢献) と呼ぶことにする。なお、身体に貼付したマーカーのずれによって、蹴りスピードに誤差 (min : -1.64 m/s, max : 2.49 m/s) が生じるが、結果に影響しないとして、

取り除いた.

4.2.3 関節トルク，関節力によるモーメント

Figure 4-2 は，身体セグメントの遠位端と近位端に関節力および関節トルクが加わっている場合のフリーボディダイアグラムである．剛体の運動方程式より，身体セグメントにかかる力と加速度の間，身体セグメントの角運動量と合トルクの間には，それぞれ以下の式 (4.4) および (4.5) の関係が成り立つ．

$$\mathbf{F}_d + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_G = m\mathbf{a} \quad (4.4)$$

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{r}_d \times \mathbf{F}_d + \mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p + \mathbf{T}_d + \mathbf{T}_p \quad (4.5)$$

ここで， \mathbf{F}_d は遠位端から加わる関節力， \mathbf{F}_p は近位端から加わる関節力， \mathbf{F}_G は重力， m は身体セグメントの質量， \mathbf{a} は重心の加速度， \mathbf{L} は静止座標系における角運動量， \mathbf{r}_d は重心から遠位端に向かうベクトル， \mathbf{r}_p は重心から近位端に向かうベクトル， \mathbf{T}_d は遠位端から加わる関節トルク， \mathbf{T}_p は近位端から加わる関節トルクを示す．したがって，遠位端にかかる関節力および関節トルクを既知とすれば，近位端にかかる関節力および関節トルクは以下の式 (4.6) および (4.7) で算出できる．

$$\mathbf{F}_p = m\mathbf{a} - (\mathbf{F}_d + \mathbf{F}_G) \quad (4.6)$$

$$\mathbf{T}_p = \dot{\mathbf{L}} - (\mathbf{r}_d \times \mathbf{F}_d + \mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p + \mathbf{T}_d) \quad (4.7)$$

この計算を身体の遠位のセグメントから順次行うことで，各関節の関節力と関節トルクを求めた．また，本研究では，関節力，関節トルクを，各関節に隣接する近位セグメントから遠位セグメントに作用する力およびトルクとして表す．また，各関節に隣接する近位セグメントから遠位セグメントに作用する関節力によるモーメントは以下の式 (4.8) で算出できる．

$$\mathbf{M}_p = \mathbf{r}_p \times \mathbf{F}_p \quad (4.8)$$

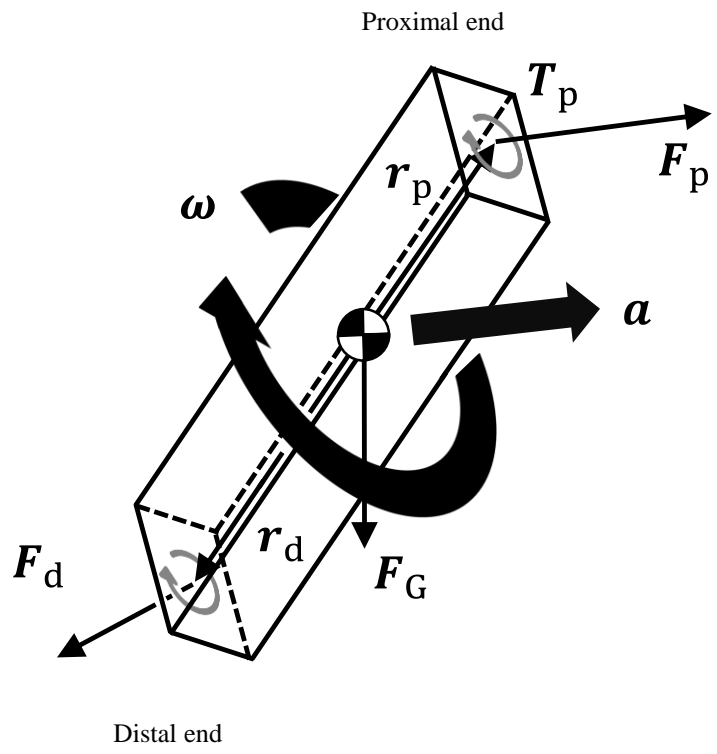


Figure 4-2 Free body diagram of segment.

4.2.4 力学的エネルギーフロー

Winter and Robertson (1990) の方法をもとに、頭部と上肢、上腕、下腕、蹴り脚・軸脚足部、下腿、大腿の身体 9 セグメントに関する energetics パラメータを以下の式で算出した。なお、各関節における力学的エネルギーの生成を関節トルクパワー（以下 JTP）、身体セグメントおよび各関節における力学的エネルギーの流入出、伝達のうち、関節トルクによるものをセグメントトルクパワー（以下 STP）、関節力によるものを関節力パワー（以下 JFP）とした。

(1) 力学的エネルギー

セグメントの力学的エネルギーを以下の式 (4.9) を用いて算出した。

$$E_s = m_s g h_{scg} + \frac{1}{2} m_{scg} |\mathbf{V}|_{scg}^2 + \frac{1}{2} (I'_{scgx} \omega'_{scgx}{}^2 + I'_{scgy} \omega'_{scgy}{}^2 + I'_{scgz} \omega'_{scgz}{}^2) \quad (4.9)$$

ここで、 E_s はセグメントの力学的エネルギー、 h_{scg} は静止座標系における各セグメント重心の座標データの Z 軸成分、 \mathbf{V}_{scg} は並進速度ベクトル、 I'_{scgx} 、 I'_{scgy} および I'_{scgz} は各セグメントまわりにおける主慣性モーメント I'_{scg} の各成分、 ω'_{scgx} 、 ω'_{scgy} および ω'_{scgz} は各セグメントの移動座標系における各軸まわりの角速度を示す。

(2) 力学的パワー

関節トルクにより発生するパワー、関節トルクによりセグメントに伝達されるパワー、関節力によりセグメントに伝達されるパワーを以下の式 (4.10)、(4.11)、(4.12) を用いて算出した。

(a) 関節トルクパワー

$$JTP_j = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_j \quad (4.10)$$

(b) セグメントトルクパワー

$$STP_s = \mathbf{T}_j \cdot \boldsymbol{\omega}_s \quad (4.11)$$

(c) 関節力パワー

$$JFP_j = \mathbf{F}_j \cdot \mathbf{V}_j \quad (4.12)$$

ここで、 \mathbf{T}_j は静止座標系における各関節トルク、 $\boldsymbol{\omega}_j$ は静止座標系における各関節角速度、 $\boldsymbol{\omega}_s$ は静止座標系における各セグメント角速度、 \mathbf{F}_j は静止座標系における各関節力、 \mathbf{V}_j は静止座標系における各関節並進速度を示す。

(3) 力学的仕事・エネルギー

力学的パワーとして算出した JTP, STP, JFP を動作局面ごとに時間積分した値を力学的仕事または力学的エネルギーとし、JTP による力学的エネルギーの生成（正の力学的仕事）と吸収（負の力学的仕事）、STP による力学的エネルギーの流入出および JFP による力学的エネルギーの伝達を示す energetics 的パラメータとした。

4.2.5 被験者のグループ分け

(1) 全被験者の蹴りスピードと動作時間の関係

Figure 4-3 の (a) - (c) は、全被験者の IMP の蹴りスピードと READY 局面（準スタティックな動作局面）における動作時間の関係、全被験者の IMP の蹴りスピードと LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間（ダイナミックな動作局面）の関係、全被験者の IMP の蹴りスピードと READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。IMP の蹴りスピードと蹴り脚がほとんど動かないため、蹴りスピードは概ねゼロである READY 局面の動作時間に有意な相関関係は認められなかった (Figure 4-3 (a))。一方で、IMP の蹴りスピードと大きな蹴りスピードを保持し、蹴り脚のダイナミックな動作局面である LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間に有意な負の相関関係が認められた ($p < 0.05$, $r = -0.779$) (Figure 4-3 (b))。また、READY 局面の動作時間 (mean = 0.318 ± 0.079 s) は、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間 (mean = 0.223 ± 0.025 s) に比べて長かった。IMP の蹴りスピードと全ての局面の動作時間に有意な負の相

関関係が認められた ($p < 0.05$, $r = -0.445$) (Figure 4-3 (c)). ここで、典型的な被験者群として、IMP の蹴りスピードと全ての局面の動作時間において、蹴りスピードが平均+SD よりも大きく、蹴り時間が平均-SD よりも小さい被験者 3 名を GOOD (蹴りスピード : 19.26 ± 0.32 m/s, 動作時間 : 0.440 ± 0.011 s), 蹴りスピードが平均-SD よりも小さく、動作時間が平均+SD よりも大きい被験者 3 名を POOR (蹴りスピード : 13.28 ± 0.56 m/s, 動作時間 : 0.677 ± 0.035 s), 蹴りスピードが平均 $\pm 0.5SD$ 内であり、動作時間が平均-0.5SD よりも小さい被験者 5 名を TIME (蹴りスピード : 15.70 ± 0.43 m/s, 動作時間 : 0.454 ± 0.015 s), 蹴りスピードが平均-0.5SD 内であり、動作時間が平均+SD よりも大きい被験者 3 名を SPEED (蹴りスピード : 15.04 ± 0.39 m/s, 動作時間 : 0.691 ± 0.026 s) とした. なお, GOOD は, READY 局面の動作時間および LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間においても動作時間が平均-0.5SD よりも小さかった. 一方で, POOR は READY 局面の動作時間および LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間においても動作時間が平均-0.5SD よりも大きかった.

Figure 4-4 の (a) - (c) は, 全被験者平均およびグループ平均の IMP の蹴りスピードと READY 局面における動作時間の関係, 全被験者平均およびグループ平均の IMP の蹴りスピードと LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係, 全被験者平均およびグループ平均の IMP の蹴りスピードと READY 局面, LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している. Figure 4-3 に示したように, GOOD は蹴りスピードが大きく, 動作時間が短いため, 速度的, 時間的な「素早さ」を実現している. TIME は蹴りスピードが平均的であるが, 動作時間が短いため, 時間的な「素早さ」を実現している. また SPEED は蹴りスピードが平均的であるが, TIME に比べて動作時間が長く, POOR は蹴りスピードも小さく, 動作時間も長い.

(2) グループ間の足部移動距離

Figure 4-5 の (a) - (d) は、全被験者平均およびグループ平均の足部移動距離（以下、蹴りの道のり距離）を脚長で除した値と **IMP** の蹴りスピードの関係、全被験者平均およびグループ平均の蹴りの道のり距離を脚長で除した値と **READY** 局面における動作時間の関係、全被験者平均およびグループ平均の蹴りの道のり距離を脚長で除した値と **LEGUP** 局面と **STRIKE** 局面を合わせた動作時間の関係、全被験者平均およびグループ平均の蹴りの道のり距離を脚長で除した値と **READY** 局面、**LEGUP** 局面および **STRIKE** 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。なお、実験試技におけるターゲットまでの距離は、脚長を基準に決定した。蹴りの距離に関して、動作時間が同様であるが蹴りのスピードが異なる、**GOOD** と **TIME**、**POOR** と **SPEED** に大きな差がないだけでなく、グループ間にも大きな差はみられなかった。

(3) グループ分けの適正

本章では、速度的、時間的な「素早さ」を検討するために、**IMP** の蹴りスピードおよび **READY** 局面、**LEGUP** 局面および **STRIKE** 局面を合わせた動作時間をもとに、グループ分けを行った。ここで、**TIME** は **GOOD** に比べ **IMP** の蹴りスピードが小さいが、概ね同程度の動作時間であった。しかし、蹴りの道のり距離についても、概ね同程度の値であったため、蹴りの距離を短くすることよりも、平均の蹴りスピードを大きく保っていた。この関係は、**POOR** と **SPEED** 間の関係についても同様である。したがって、蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の獲得メカニズムを検討するための、グループ分けは適切であったと考えられる。

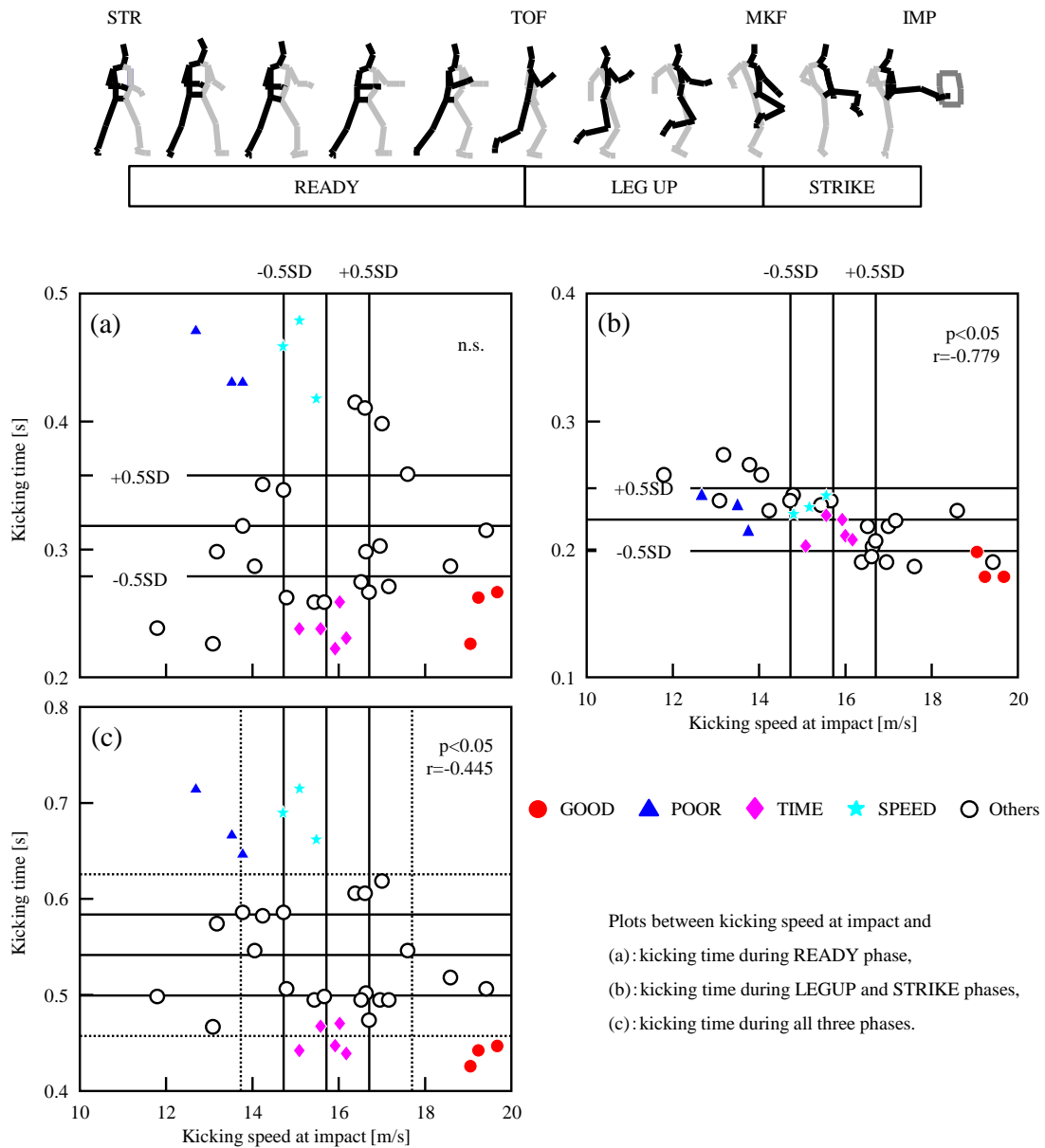


Figure 4-3 Scatter plots of kicking speed at impact and kicking time during motion phase.

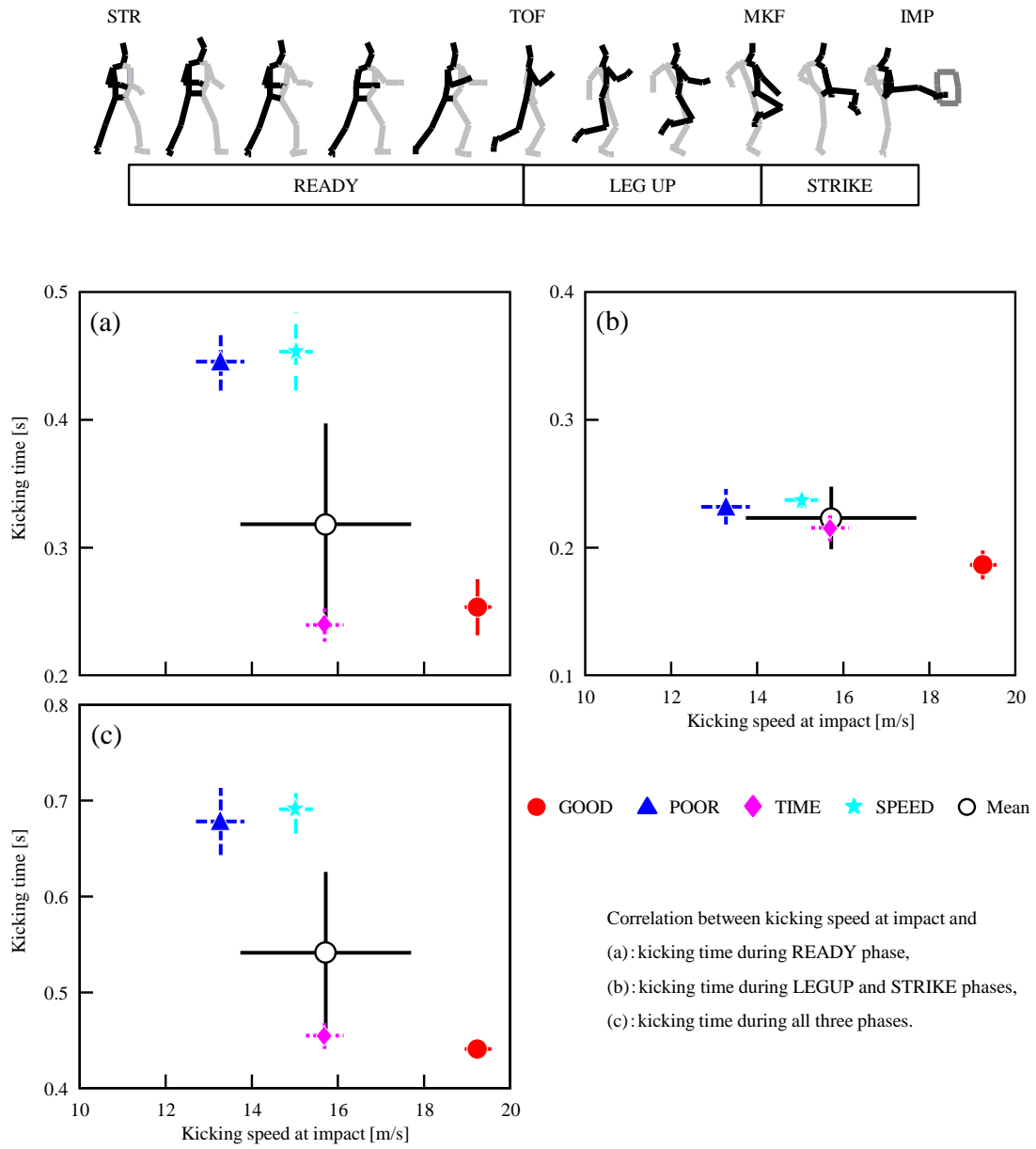
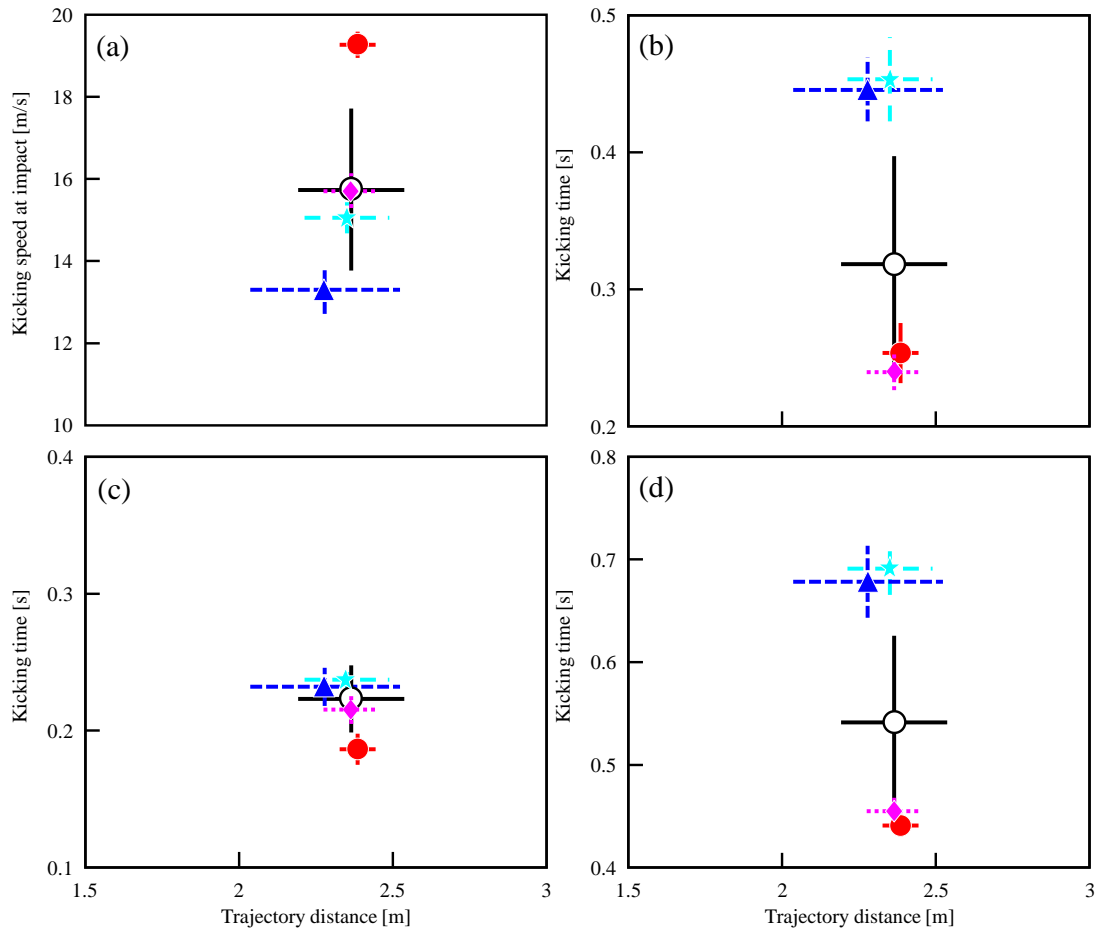
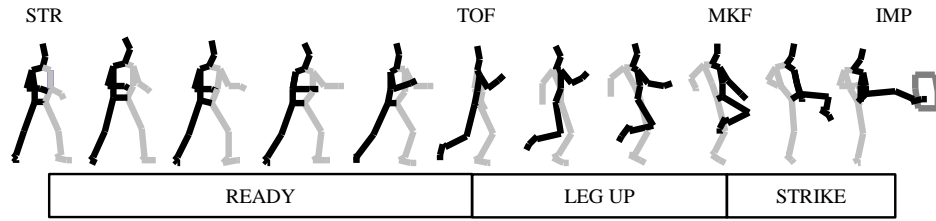


Figure 4-4 Scatter plots of kicking speed at impact and kicking time during motion phases divided into four groups.



Correlation between trajectory distance and

(a): kicking speed at impact,

(b): kicking time during READY phase,

(c): kicking time during LEGUP and STRIKE phases,

(d): kicking time during all three phases.

● GOOD ▲ POOR
◆ TIME ★ SPEED ○ Mean

Figure 4-5 Scatter plots of trajectory distance of kicking leg and two variables.

4.2.6 統計処理

本章では、グループ分けを行ったが、グループ間の差の検定に関する統計処理を行っていない。なお、算出される事象はすべて物理法則により担保されているため、速度的、時間的な「素早さ」の基本メカニズムを検討することは十分に可能である。

4.3 結果

本節では、全被験者 35 名の平均値と、速度的、時間的「素早さ」の検討を行うために、前述した方法で選出した各グループの平均値を、必要に応じて標準偏差とともに示していく。

Figure 4-6 は、全被験者 35 名の蹴りスピードの時系列データを示している。また、Figure 4-7 は、全被験者 35 名平均の蹴りスピードおよびその標準偏差の時系列データを示している。Figure 4-8 は、各グループの蹴りスピードの時系列データを示している。Figure 4-9 は、全被験者 35 名平均の上胴と下胴のセグメント角度（左右屈角度，左右回旋角度），蹴り脚および軸脚の関節角度（股関節：屈曲伸展角度，内外転角度，内外旋角度，膝関節：屈曲伸展角度，足関節：底背屈角度）ならびにその標準偏差のイベントごと（TOF, MKF, IMP）のデータを示している。Figure 4-10 は、各グループの上胴と下胴のセグメント角度，蹴り脚および軸脚の関節角度ならびにその標準偏差のイベントごと（TOF, MKF, IMP）のデータを示している。Figure 4-11 は、全被験者 35 名平均の上胴と下胴のセグメント角速度（左右屈角速度，左右回旋角速度），蹴り脚および軸脚の関節角速度（股関節：屈曲伸展角速度，内外転角速度，内外旋角速度，膝関節：屈曲伸展角速度，足関節：底背屈角速度）ならびにその標準偏差の時系列データを示している。Figure 4-12 は、各グループの上胴と下胴のセグメント角速度，蹴り脚および軸脚の関節角速度の時系列データを示している。なお，Figure 4-9, 4-10, 4-11, 4-12 における，U-は上胴，L-は下胴，K-は蹴り脚，S-は軸脚を示している。Figure 4-13 は、全被験者 35 名平均の蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピ

ード, 下胴および蹴り脚の各関節運動による kinematics 的貢献および標準偏差の時系列データを示している. Figure 4-14 は, 各グループの蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピード, 下胴および蹴り脚の各関節運動による kinematics 的貢献の時系列データを示している. Figure 4-15 は, 全被験者 35 名平均の上胴から下胴に作用する体幹関節トルクと上胴から下胴に作用する体幹関節力によるモーメント, 蹴り脚および軸脚の下胴から大腿に作用する股関節トルク, 下胴から大腿に作用する股関節力によるモーメント, 大腿から下腿に作用する膝関節トルク, 大腿から下腿に作用する膝関節力によるモーメントならびにその標準偏差の時系列データを示している. Figure 4-16 は, 各グループの上胴から下胴に作用する体幹関節トルク, 蹴り脚および軸脚の下胴から大腿に作用する股関節トルク, 大腿から下腿に作用する膝関節トルクの時系列データを示している. Figure 4-17 は, 各グループの上胴から下胴に作用する体幹関節力によるモーメント, 下胴から大腿に作用する股関節力によるモーメント, 大腿から下腿に作用する膝関節力によるモーメントの時系列データを示している. Figure 4-18 は, 全被験者 35 名平均の頭部と上肢, 上胴, 下胴, 蹴り脚および軸脚の大腿, 下腿, 足部の力学的エネルギーならびにその標準偏差の時系列データを示している. Figure 4-19 は, グループ平均の頭部と上肢, 上胴, 下胴, 蹴り脚および軸脚の大腿, 下腿, 足部の力学的エネルギーの時系列データを示している. Table 4-1 は, 全被験者 35 名平均の JTP による体幹および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収, JFP による上胴, 下胴, 下肢セグメント間の力学的エネルギーの伝達, ならびに STP による上胴, 下胴, 下肢セグメント間の力学的エネルギーの流入出を LEGUP 局面, STRIKE 局面にわけて示している. Table 4-2 は, LEGUP 局面におけるグループ平均の JTP による体幹および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収, JFP による上胴, 下胴, 下肢セグメント間の力学的エネルギーの伝達, ならびに STP による上胴, 下胴, 下肢セグメント間の力学的エネルギーの流入出を示している. Table 4-3 は, STRIKE 局面における各グループの JTP による体幹および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収, JFP による上胴, 下胴, 下肢セグメン

ト間の力学的エネルギーの伝達，ならびに STP による上胴，下胴，下肢セグメント間の力学的エネルギーの流入出を示している．

以下，特徴的なデータについて述べていく．

4.3.1 LEGUP 局面

(1) 蹴りスピード

全被験者 35 名の蹴りスピードの変化パターンは，概ね同様であった (Figure 4-6)．TOF で蹴りスピードは約 4 m/s であり，MKF まで漸増する同様な変化パターンであった．標準偏差は，時間経過ごとに，大きくなった (Figure 4-7)．各グループの蹴りスピードの変化パターンは，GOOD, TIME と POOR, SPEED で概ね同様であった．MKF でグループごとの差が最も小さかった (Figure 4-8)．

(2) 頭部と上肢および体幹部

上胴の左回旋角速度は，漸減した (Figure 4-11) が，POOR のみ TOF の値が小さかった (Figure 4-12)．下胴の左回旋角速度は，60% でピークになり，その後 MKF まで値を保持していた (Figure 4-11)．ピークになったタイミングは TIME が最も早く，GOOD は MKF でピークになった (Figure 4-12)．下胴左回旋角速度の増加に伴い，下胴の左回旋動作による蹴りスピードに対する正の貢献が増加し (Figure 4-13)，70% までは TIME の値が大きかったが，MKF の貢献は，SPEED が大きかった (Figure 4-14)．左右回旋軸まわりの体幹関節トルクは，左回旋方向に作用した (Figure 4-15)．頭部と上肢，上胴，下胴では，大きな力学的エネルギーの変動はみられなかった (Figure 4-18)．JTP により体幹関節で生成された力学的エネルギーは大きくないが (Table 4-1)，POOR の値が最も大きかった (Table 4-2)．JFP により，体幹関節を介して GOOD と TIME は上胴から下胴に，POOR と SPEED は下胴から上胴に力学的エネルギーが伝達された (Table 4-2)．STP により，上胴から下胴に大きな力学的エネルギーが流入し (Table 4-1)，GOOD, TIME, POOR, SPEED の順に大きかった (Table 4-2)．

また、下脛から蹴り脚大腿に大きな力学的エネルギーが流出し (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2).

(3) 蹴り脚

股関節屈曲角速度は、60%以降 MKF まで急増し (Figure 4-11), 股関節屈曲角速度は、GOOD, TIME の順で増加率が大きかった (Figure 4-12). 股関節の屈曲角速度の変化に伴い、股関節の屈曲動作による蹴りスピードに対する正の貢献が 60%以降 MKF まで急増して (Figure 4-13), MKF では GOOD, TIME の順で大きかった (Figure 4-14). 屈曲伸展軸まわりの股関節トルクは、屈曲方向に作用し (Figure 4-15), 常に GOOD の値が大きかった (Figure 4-16). 一方、股関節力によるモーメントの屈曲伸展成分は、伸展方向に作用し (Figure 4-15), 70%以降、グループごとの値は概ね同様であった (Figure 4-17). 内外転軸まわりの股関節トルクは、内転方向に作用し (Figure 4-15), TOF では TIME の値が大きかったが、70%以降、グループごとの値は概ね同様であった (Figure 4-16). 一方、股関節力によるモーメントの内外転成分は、外転方向に作用し (Figure 4-15), 70%以降、GOOD, TIME と POOR, SPEED でパターンが分かれた (Figure 4-17). 内外旋軸まわりの股関節トルクは外旋方向に作用し (Figure 4-15), 70%以降、GOOD, TIME と POOR, SPEED でパターンが分かれた (Figure 4-16). 大腿の力学的エネルギーは、漸増し (Figure 4-18), 変化パターンは、GOOD と TIME, POOR と SPEED に分かれた (Figure 4-19). JTP により大きな力学的エネルギーが股関節で生成され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). JFP により、股関節を介して下脛から大腿に大きな力学的エネルギーが伝達され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). STP により、下脛から大腿に大きな力学的エネルギーが流入し (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). 膝関節屈曲角速度は、緩やかに減少した (Figure 4-11). 屈曲伸展軸まわりの膝関節トルクは、屈曲方向に作用し (Figure 4-15), LEG UP 局面を通して、GOOD の値が最も小さかった (Figure 4-16). 一方、膝関節力によるモーメントの屈曲伸展成分は、概ね伸展方向に作用した (Figure 4-15). 下腿の力学的エネルギーは、

MKF 前にピークになり (Figure 4-18), LEG UP 局面を通して, GOOD の値が最も大きく, POOR と SPEED は概ね同様の値であった. (Figure 4-19). JTP により膝関節で生成された力学的エネルギーは股関節に比べて小さいが (Table 4-1), GOOD の値が最も小さかった (Table 4-2). JFP により, 膝関節を介して大腿から下腿に大きな力学的エネルギーが伝達され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). 足部の力学的エネルギーは, 漸増した (Figure 4-18).

(4) 軸脚

股関節伸展角速度は, 60%まで漸増し, その後 MKF まで漸減した (Figure 4-11). GOOD, TIME と POOR, SPEED でパターンが分かれた (Figure 4-12). 屈曲伸展軸まわりの股関節トルクは, 大きく伸展方向に作用した (Figure 4-13). 一方, 股関節力によるモーメントの屈曲伸展成分は, 大きく屈曲方向に作用した (Figure 4-14). 股関節内転角速度は, 60%で外転角速度に変化した (Figure 4-11). 内外転軸まわりの股関節トルクは, TOF で外転方向に作用し (Figure 4-15), GOOD, TIME, SPEED, POOR の順で内転方向への作用に変化した (Figure 4-16). 股関節内旋角速度のピークは, GOOD, TIME が大きく, 変化パターンも, GOOD, TIME と POOR, SPEED で分かれたが, MKF では, グループごとで異なった値を示した (Figure 4-12). JTP により大きな力学的エネルギーが股関節で生成され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きく POOR が最も小さかった (Table 4-2). JFP により, 股関節を介して大腿から下腿に大きな力学的エネルギーが伝達され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). 膝関節伸展角速度は, 70%以降緩やかに減少したが (Figure 4-11), MKF までに GOOD のみ, 屈曲角速度に変化しなかった (Figure 4-12). 屈曲伸展軸まわりの膝関節トルクは, 伸展方向に作用した (Figure 4-15). JTP により膝関節で生成された力学的エネルギーは股関節ほど大きくないが (Table 4-1), POOR の値が最も大きかった (Table 4-2). JFP により, 膝関節を介して下腿から大腿に伝達された力学的エネルギーは大きくないが (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). 足関節を介して足部から下腿に伝

達された力学的エネルギーは大きくないが (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-2). 軸脚の各関節角速度の変化に伴い, 軸脚の動きにより生成された下胴の並進スピードによる蹴りスピードに対する正の貢献は漸減し (Figure 4-12), POOR, TIME, SPEED は同様の値であった (Figure 4-13). また, 60%まで GOOD の貢献が大きかった (Figure 4-13). 軸脚では, 大きな力学的エネルギーの変動はみられなかった (Figure 4-18).

4.3.2 STRIKE 局面

(1) 蹴りスピード

全被験者 35 名の蹴りスピードは, LEG UP 局面に続き, IMP まで漸増する同様の変化パターンであった (Figure 4-6). 標準偏差は, 時間経過ごとに, 大きくなった (Figure 4-7).

グループ間の蹴りスピードの変化パターンは, 大きく異なっていた. IMP でグループごとの差が最も大きかった (Figure 4-8).

(2) 頭部と上肢および体幹部

上胴の左右屈角速度は, 緩やかに左屈角速度が増加した (Figure 4-11). 左右屈軸まわりの体幹関節トルクは, 体幹関節力によるモーメントに比べて, 値が大きかった (Figure 4-15). 下胴の左屈角速度は, STRIKE 局面を通して POOR, GOOD と TIME, SPEED の順で大きかった (Figure 4-12). 下胴の左屈角速度の変化に伴い, MKF 直前から, 下胴の左屈動作による蹴りスピードに対する正の貢献が増加し (Figure 4-13), POOR, GOOD, TIME, SPEED の順で大きかった (Figure 4-14). 左右屈軸まわりの体幹関節トルクは, GOOD, TIME と POOR, SPEED でパターンが分かれた (Figure 4-16). 上胴の左回旋角速度は, LEG UP 局面に続いて, 漸減し, IMP で概ねゼロであったが (Figure 4-11), 変化パターンは, GOOD と POOR, TIME, SPEED に分かれた (Figure 4-12). 下胴の左回旋角速度は, MKF 直前から 90%まで概ね同様の値を保持していたが, 90%以降 IMP まで漸減したが (Figure 4-11), GOOD は 90%以降, 急激に減少した (Figure 4-12). 下胴の左回旋動作による蹴りスピードに対す

る正の貢献の変化パターンは、GOOD と SPEED, POOR と TIME で同様の变化パターンであった。また、GOOD と SPEED の貢献は、IMP 直前で減少した (Figure 4-14)。左右回旋軸まわりの体幹関節トルクは、IMP 直前まで左回旋方向に作用していた (Figure 4-15) が、GOOD の右回旋トルクのピーク値が大きかった (Figure 4-16)。JTP により体幹関節で生成された力学的エネルギーは大きくないが (Table 4-1)、POOR の値が最も小さかった (Table 4-3)。

(3) 蹴り脚

股関節屈曲角速度は、漸減し (Figure 4-11)、STRIKE 局面を通して、GOOD の値が大きかった (Figure 4-12)。股関節の屈曲動作による蹴りスピードに対する貢献の変化パターンは、股関節の屈曲角速度の変化に伴い、MKF 以降、漸減し (Figure 4-13)、STRIKE 局面を通して、GOOD の正の貢献の値が大きかった (Figure 4-14)。屈曲伸展軸まわりの股関節トルクは、90%まで屈曲方向に作用し (Figure 4-15)、GOOD が最も大きかった。一方、股関節力によるモーメントの屈曲伸展成分は、90%まで、伸展方向に作用した (Figure 4-15)。股関節内転角速度は、MKF 前に外転角速度に変化し、90%まで増加した (Figure 4-11)。股関節の外転動作による蹴りスピードに対する正の貢献は、STRIKE 局面を通して、POOR の正の貢献の値が大きかった (Figure 4-14)。内外転軸まわりの股関節トルクは、STRIKE 局面を通して、GOOD, TIME, SPEED, POOR の順で大きく内転方向に作用した (Figure 4-16)。一方、股関節力によるモーメントの内外転軸成分は、外転方向に作用した (Figure 4-15)。股関節内旋角速度は、GOOD, TIME と SPEED, POOR でパターンが分かれ、GOOD は 90%以降増加した (Figure 4-12)。股関節の内旋動作による蹴りスピードに対する貢献の変化パターンは内旋角速度とは異なり、POOR とそれ以外のグループで変化パターンが分かれた (Figure 4-14)。内外旋軸まわりの股関節トルクが、外旋方向の作用から内旋方向の作用に変化するタイミングは、POOR, SPEED, TIME, GOOD の順だった (Figure 4-16)。大腿のエネルギーは、MKF で、GOOD, TIME, SPEED, POOR の順に大きかったが、急減し、IMP でのグループごとの値は概ね同様であった (Figure 4-19)。JTP により、大きな力学的エネ

ルギーが股関節で吸収され (Table 4-1), 大きさは SPEED, TIME, GOOD, POOR の順だった (Table 4-3). JFP により, 股関節を介して大腿から下胴に大きな力学的エネルギーが伝達され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-3). STP により, 下胴から大腿に流入した力学的エネルギーは大きくないが (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-3). 膝関節屈曲角速度は, GOOD とそれ以外のグループで変化パターンが分かれた (Figure 4-11). 膝関節の伸展動作による蹴りスピードに対する貢献は, STRIKE 局面を通して, GOOD の正の貢献の値が大きかった (Figure 4-14). 屈曲伸展軸まわりの膝関節トルクは, MKF で GOOD が最も小さかったが, 90%以降にピークになり, 最も値が大きかった (Figure 4-16). 一方, 膝関節力によるモーメントの屈曲伸展成分は, 概ね伸展方向に作用していた (Figure 4-15). 下腿の力学的エネルギーは, STRIKE 局面を通して GOOD, TIME, POOR と SPEED の順で概ねピーク値と同様な値を保持していた (Figure 4-19). JTP により膝関節で吸収された力学的エネルギーは股関節ほど大きくないが (Table 4-3), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-3). JFP により, 膝関節を介して大腿から下腿に大きな力学的エネルギーが伝達され (Table 4-1), GOOD の値が最も大きかった (Table 4-3). 足部の力学的エネルギーは, 大腿のエネルギーの減少と同程度のタイミングで急増し始めたが GOOD の増加率が大きかった (Figure 4-19). JFP により, 足関節を介して下腿から足部に大きな力学的エネルギーが伝達され, GOOD の値が最も大きかった (Table 4-3).

(4) 軸脚

股関節屈曲角速度は, POOR とそれ以外のグループで変化パターンが分かれた. POOR は STRIKE 局面を通して, 大きかった (Figure 4-12). 股関節外転角速度は, 90%まで増加した (Figure 4-11) が, 減少が始まるタイミングは, GOOD, SPEED, POOR と TIME の順だった (Figure 4-12). 内外転軸まわりの股関節トルクは, MKF 以降, 内転方向に作用した (Figure 4-15). 股関節内外旋角速度はグループごとに大きく異なっていた (Figure 4-12). JTP により, GOOD のみ大きな力学的エネルギーが股関節で吸収された (Table 4-3). 膝関節伸展角

速度は、GOOD とそれ以外のグループで変化パターンが大きく異なっていた。

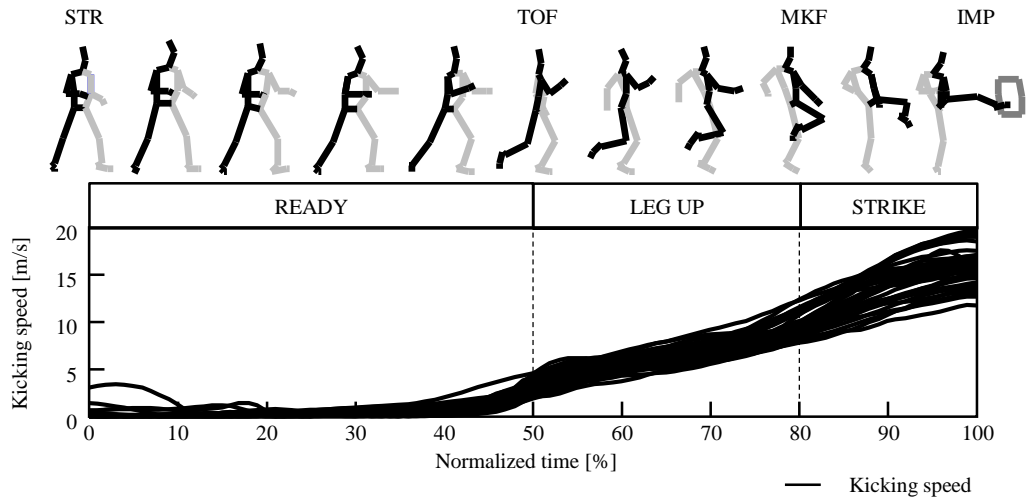


Figure 4-6 Time-series data of kicking speed as all thirty-five subjects.

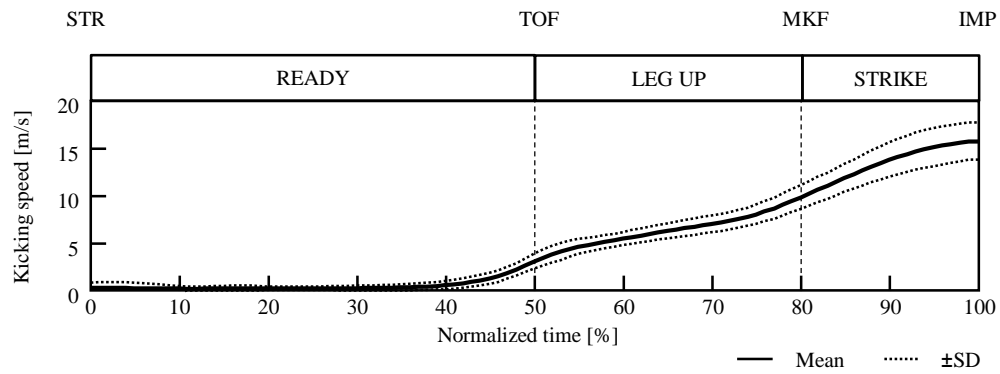


Figure 4-7 Averaged time-series data of kicking speed as all thirty-five subjects.

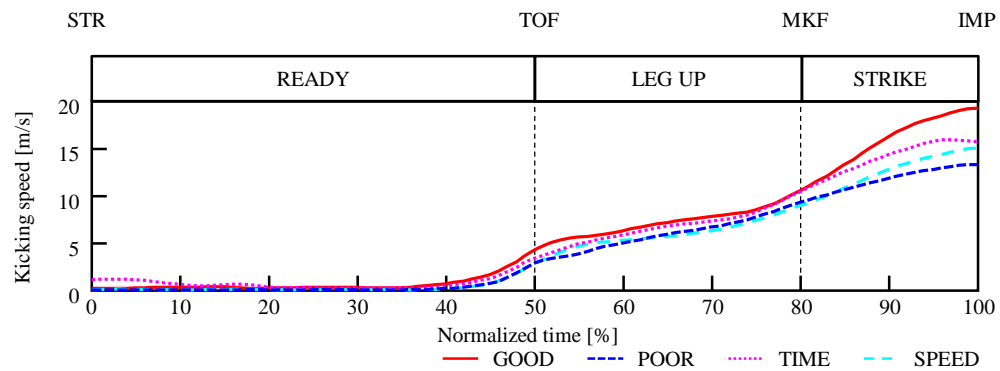


Figure 4-8 Time-series data of kicking speed divided into four groups.

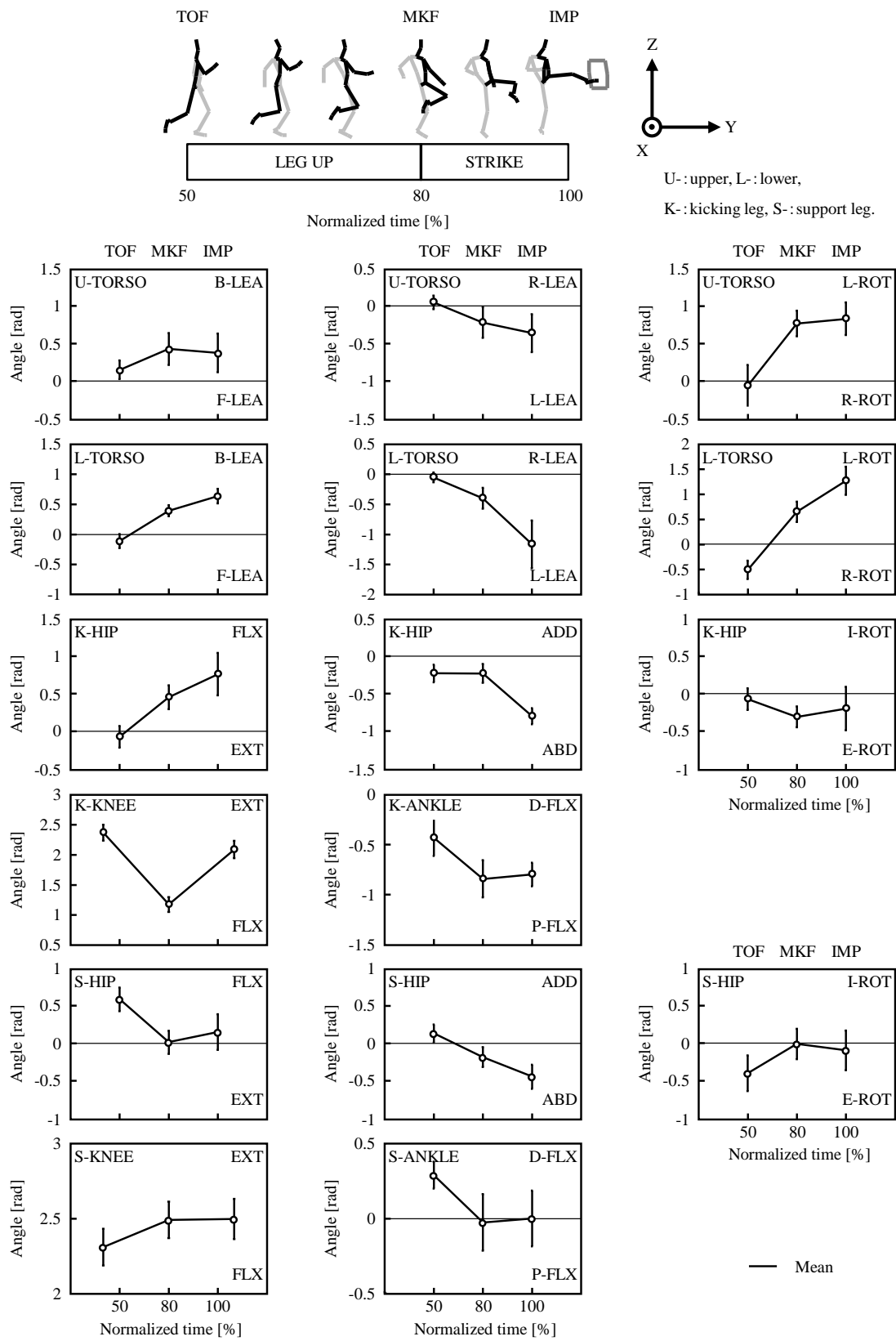


Figure 4-9 Averaged joint angle data at three motion events.

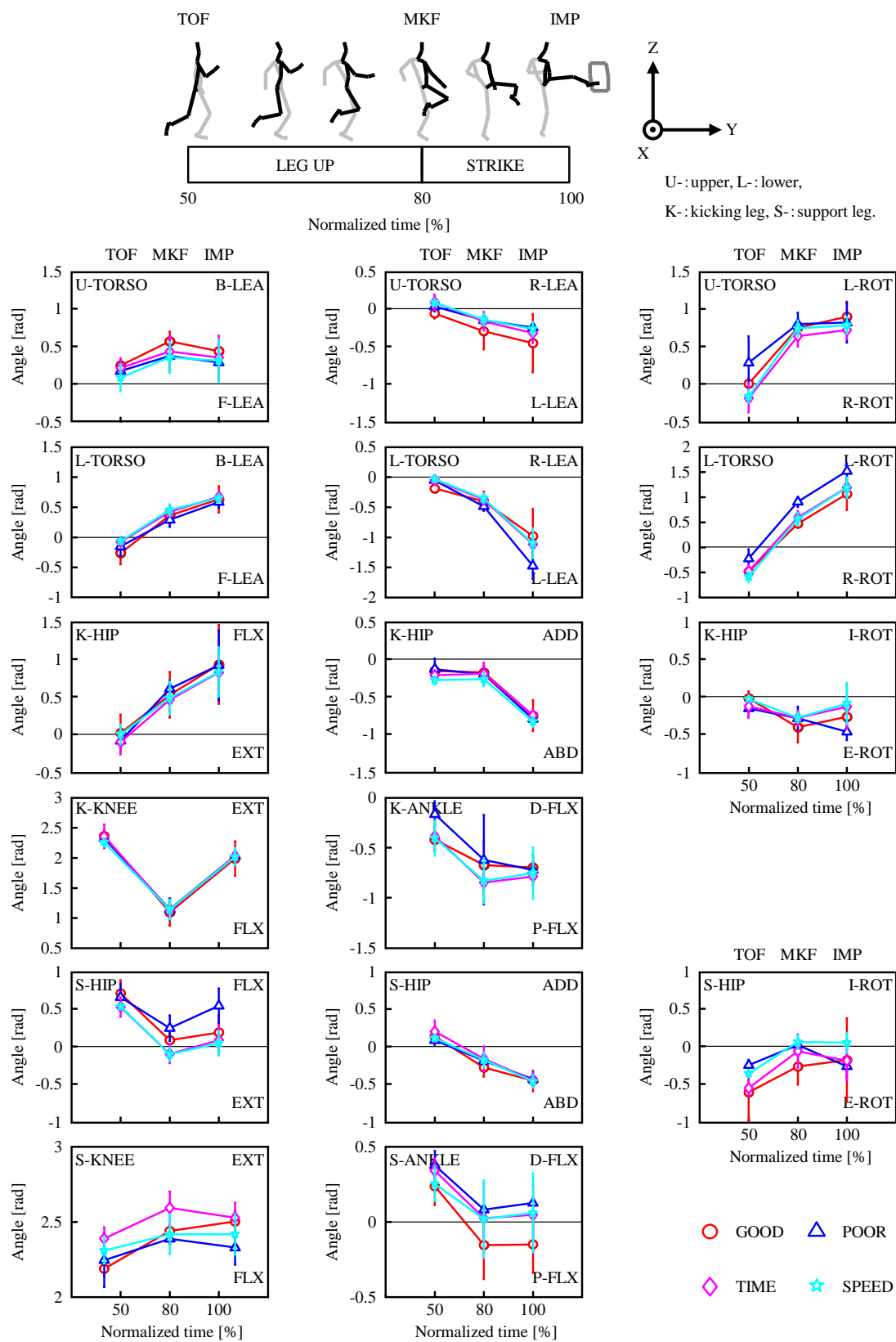


Figure 4-10 Joint angle data at three motion events divided into four groups.

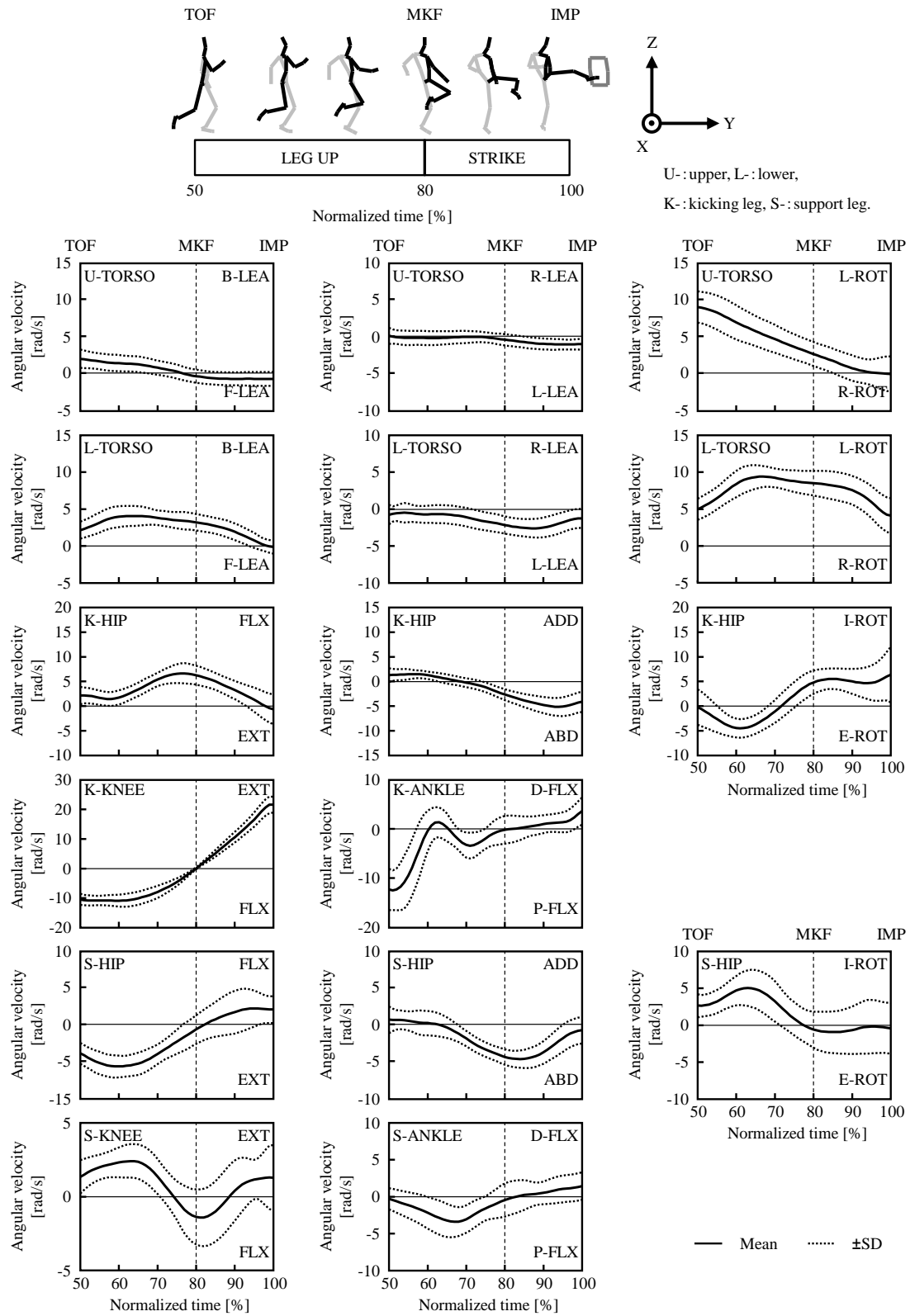


Figure 4-11 Averaged time-series data of joint angular velocity.

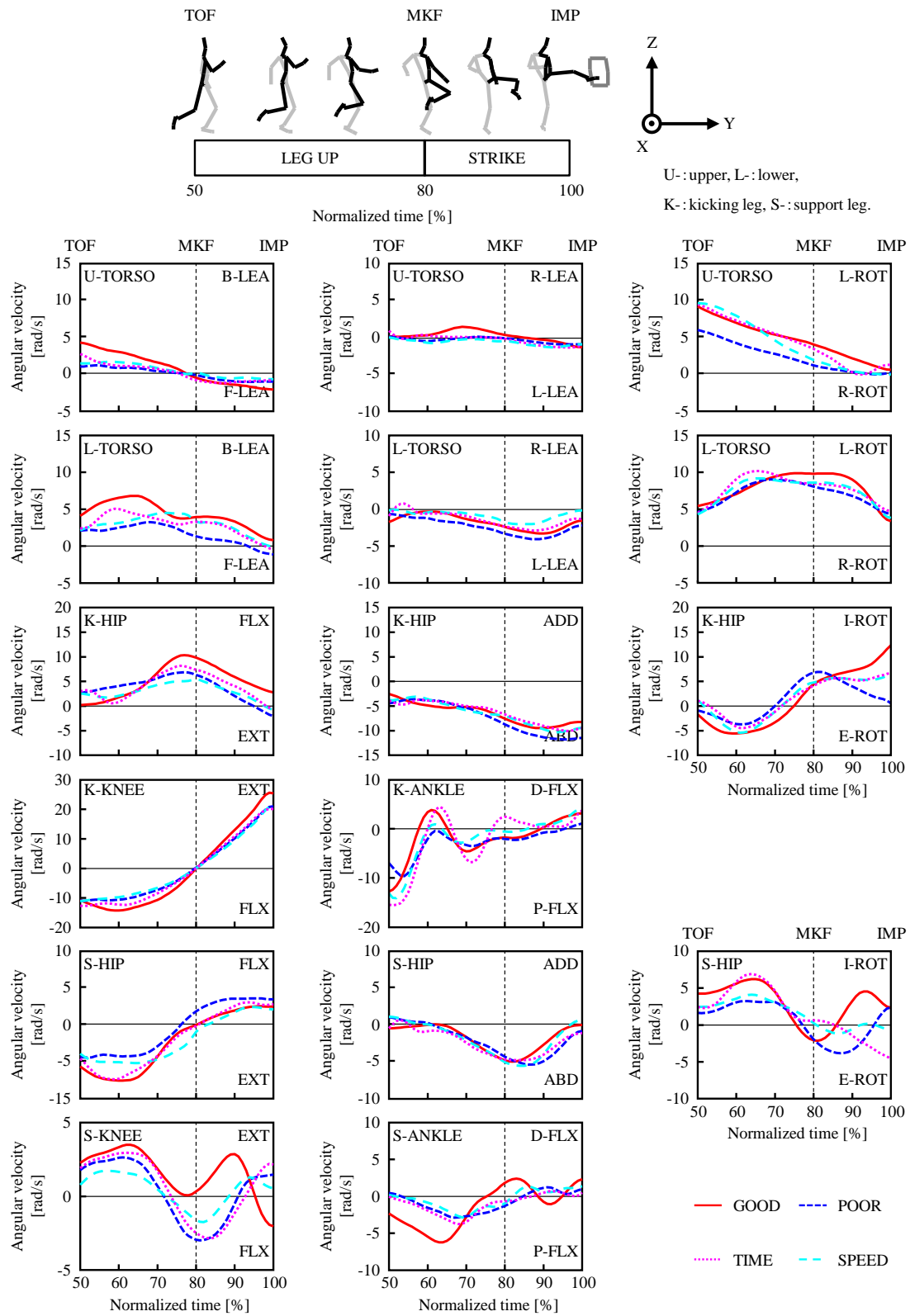
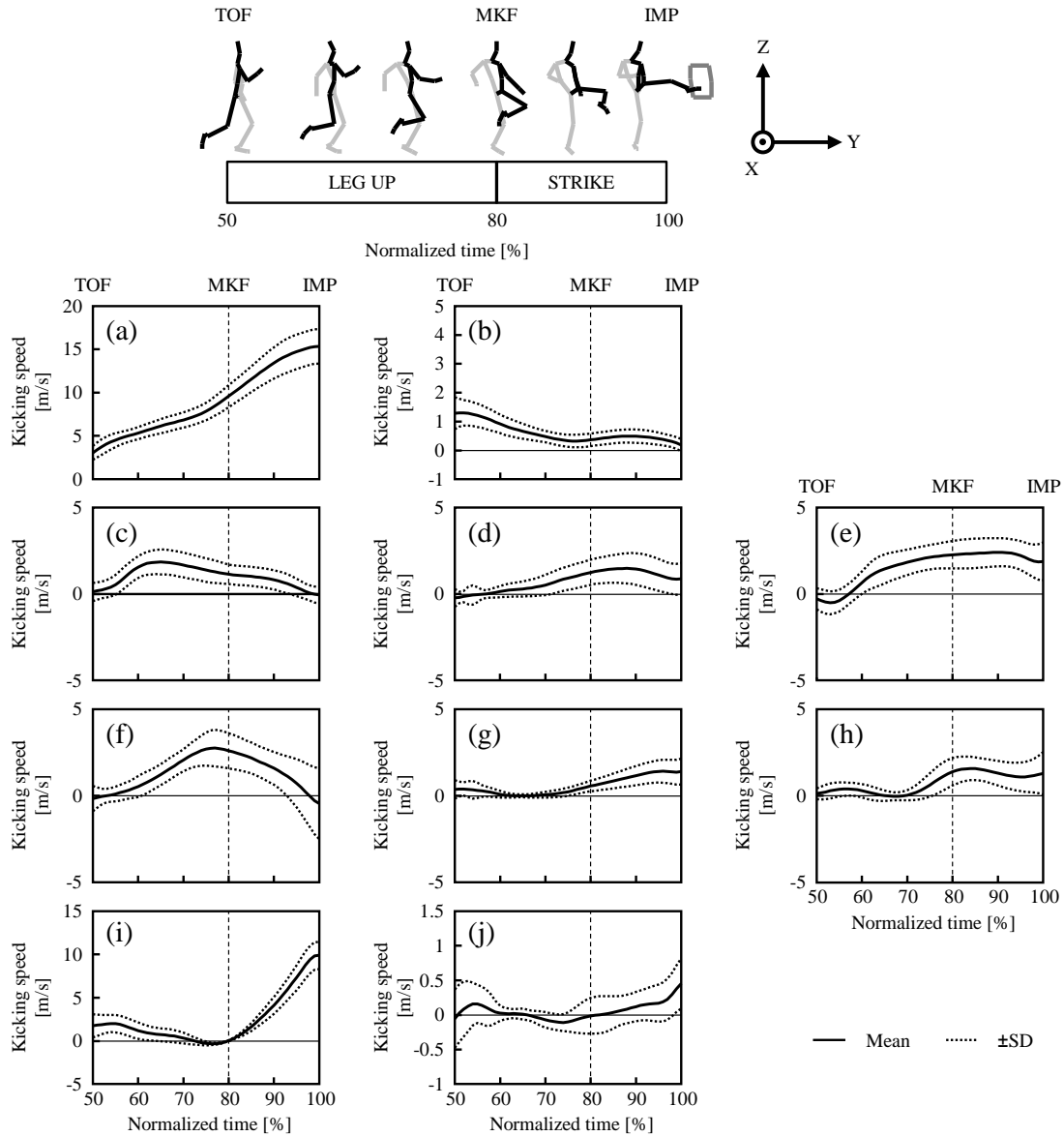
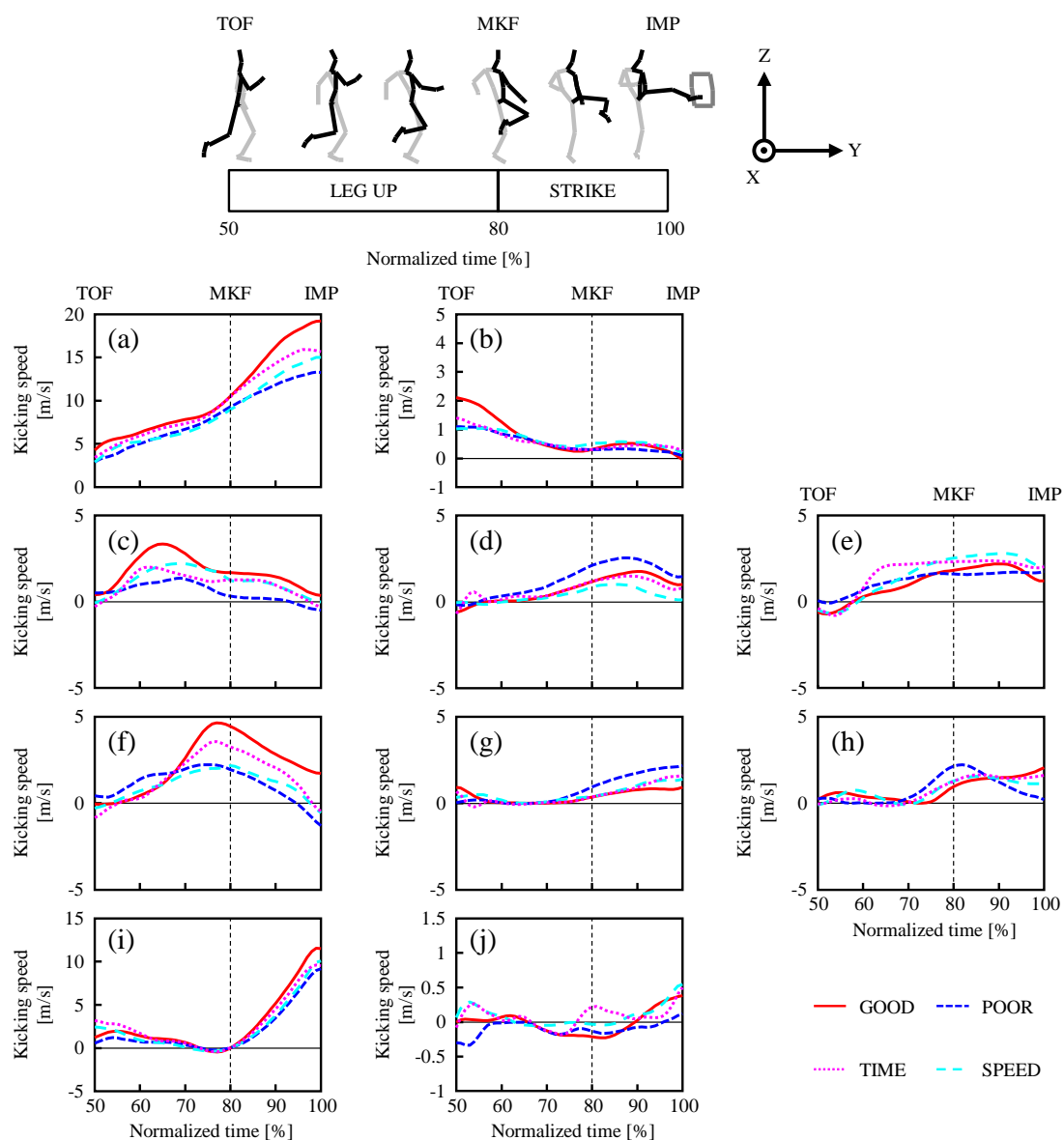


Figure 4-12 Time-series data of joint angular velocity divided into four groups.



- Contribution to kicking speed produced by
- (a): kicking speed, (b): translational motion by support leg,
 - (c): lower torso forward/backward lean, (d): lower torso left/right lean, (e): lower torso left/right rotation,
 - (f): hip joint flexion/extension of kicking leg, (g): hip joint adduction/abduction of kicking leg,
 - (h): hip joint internal/external rotation of kicking leg,
 - (i): knee joint flexion/extension of kicking leg, (j): ankle joint plantar/dorsi flexion of kicking leg.

Figure 4-13 Averaged time-series data of contribution to kicking speed.



Contribution to kicking speed produced by

- (a): kicking speed, (b): translational motion by support leg,
- (c): lower torso forward/backward lean, (d): lower torso left/right lean, (e): lower torso left/right rotation,
- (f): hip joint flexion/extension of kicking leg, (g): hip joint adduction/abduction of kicking leg,
- (h): hip joint internal/external rotation of kicking leg,
- (i): knee joint flexion/extension of kicking leg, (j): ankle joint plantar/dorsi flexion of kicking leg.

Figure 4-14 Time-series data of contribution to kicking speed divided into four groups.

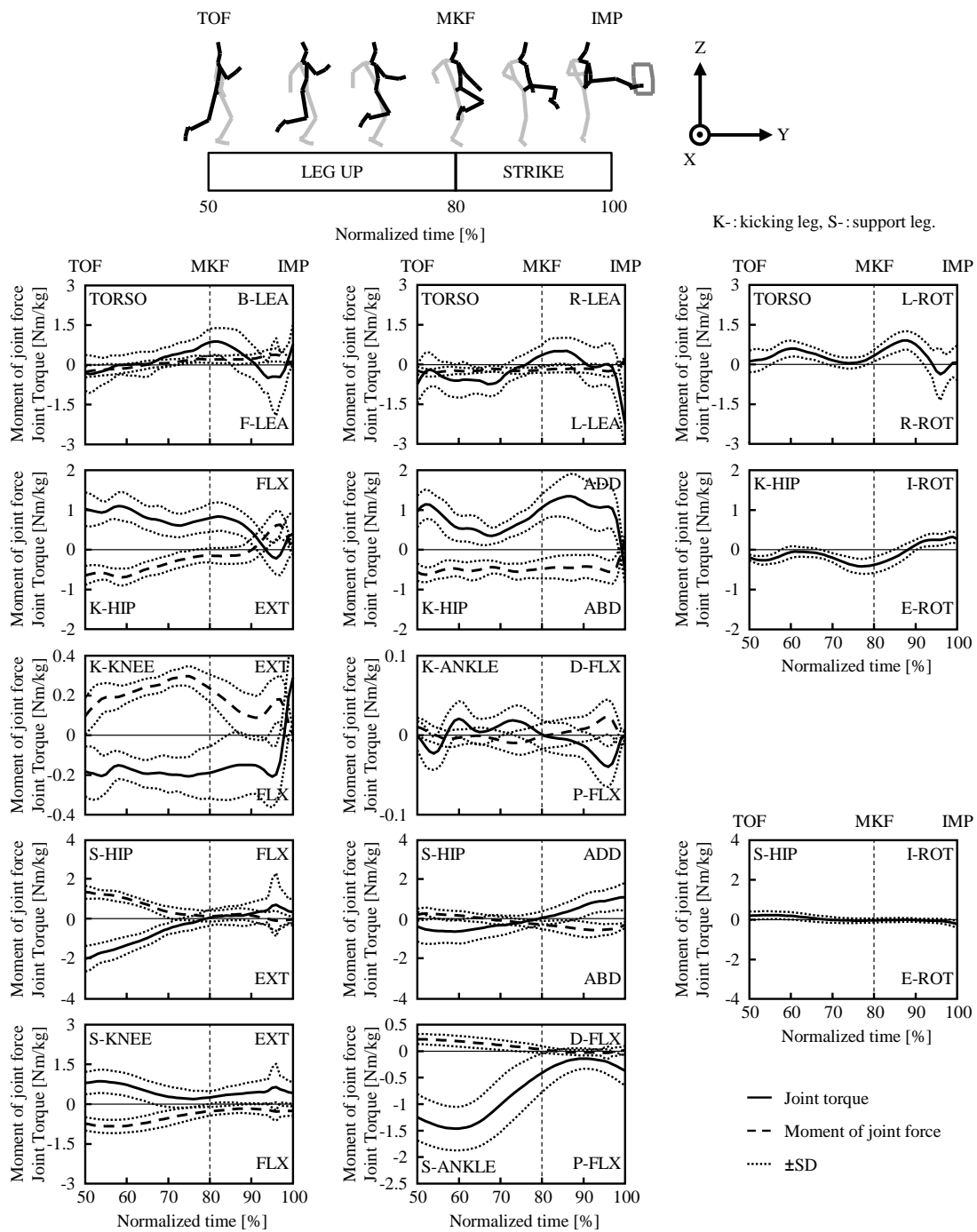


Figure 4-15 Averaged time-series data of joint torque and moment of joint force.

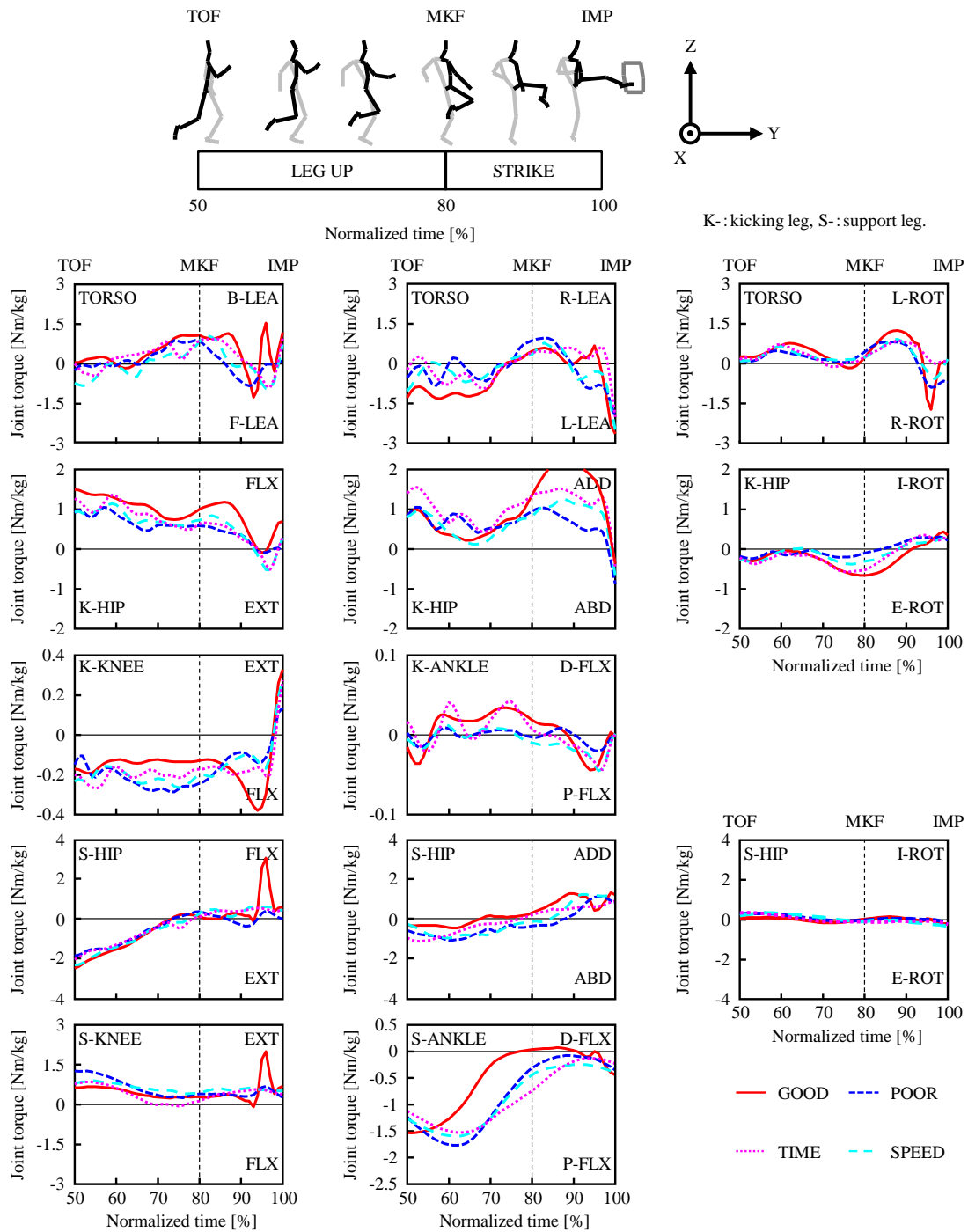


Figure 4-16 Time-series data of joint torque divided into four groups.

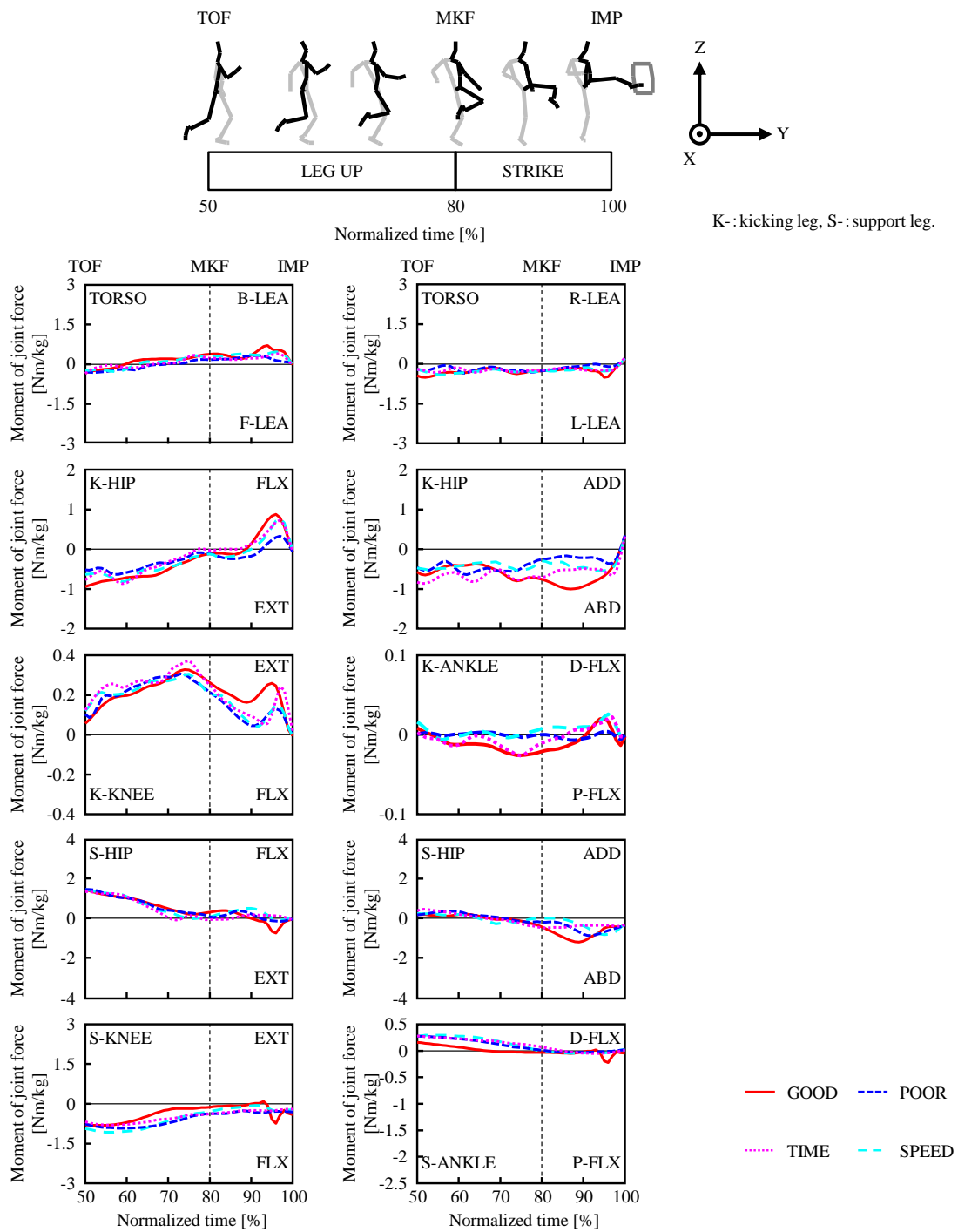


Figure 4-17 Time-series data of moment of joint force divided into four groups.

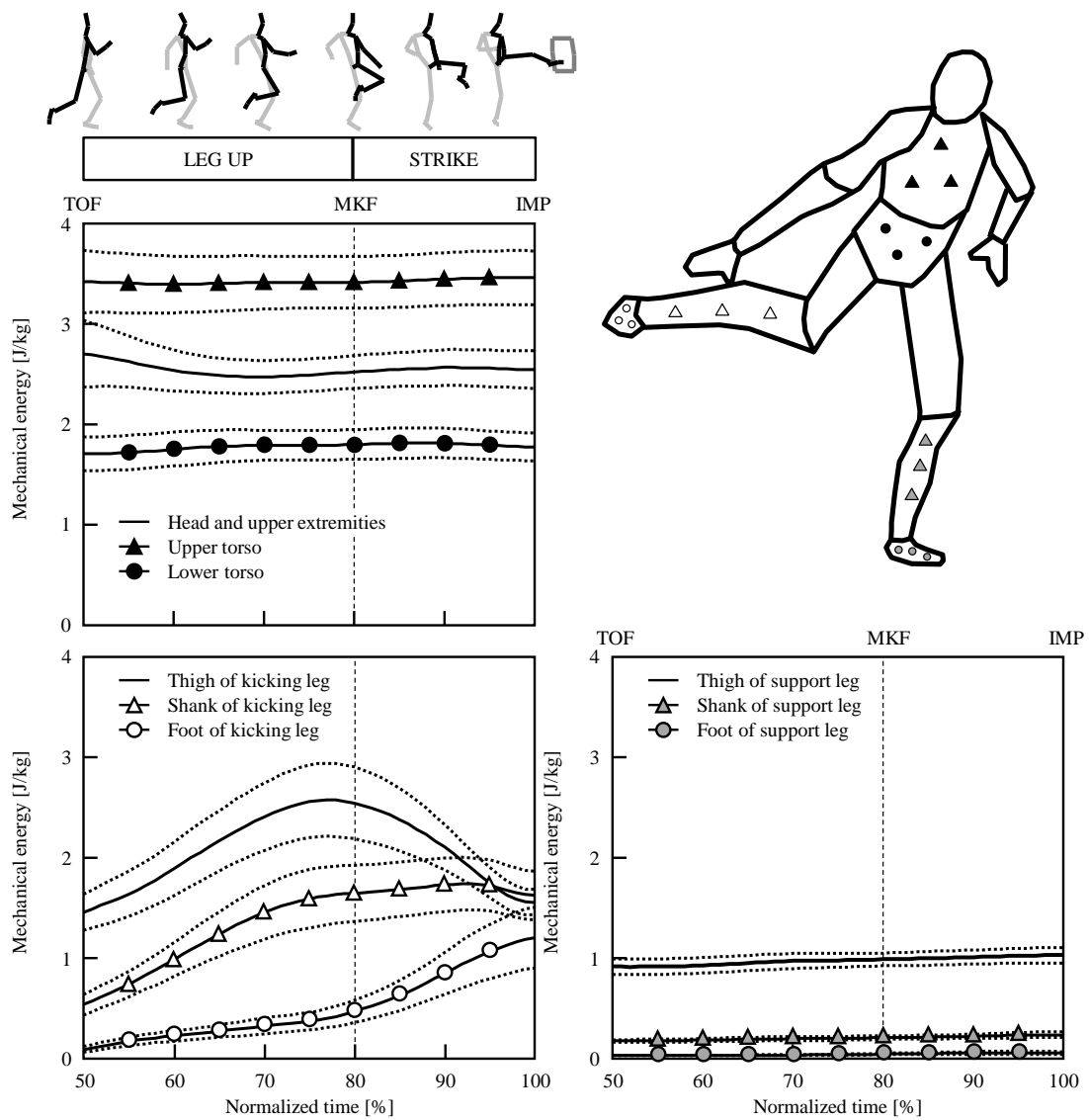


Figure 4-18 Averaged time-series data of mechanical energy.

Table 4-1 Averaged mechanical energy flow during LEGUP and STRIKE.

		(Mean \pm SD)						
Segment/joint		LEGUP			STRIKE			JTP
		JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	
Trunk			-0.24 \pm 0.18			0.32 \pm 0.07		
	Torso		0.22 \pm 0.14	-0.03 \pm 0.24		0.25 \pm 0.18	-0.03 \pm 0.07	$ 0.10 \leq$ \circ $< 0.30 $
	Pelvis			0.46 \pm 0.26			0.33 \pm 0.18	$ 0.30 \leq$ \circ $< 0.50 $
Kicking leg	Pelvis			-0.48 \pm 0.20			-0.39 \pm 0.19	$ 0.50 \leq$ \circ $< 0.80 $
	Hip		0.42 \pm 0.13	1.30 \pm 0.45		-0.19 \pm 0.13	-0.33 \pm 0.19	$ 0.80 \leq$ \circ
	Thigh			0.90 \pm 0.25			0.20 \pm 0.24	
	Thigh			0.32 \pm 0.10			0.04 \pm 0.14	
	Knee		0.23 \pm 0.06	1.50 \pm 0.32		-0.10 \pm 0.11	0.83 \pm 0.29	\swarrow $< 0.10 $
	Shank			-0.08 \pm 0.08			-0.15 \pm 0.24	$ 0.10 \leq$ \swarrow $< 0.40 $
	Shank			0.00 \pm 0.01			0.04 \pm 0.03	$ 0.40 \leq$ \swarrow $< 0.80 $
Support leg	Ankle		0.01 \pm 0.01	0.37 \pm 0.10		-0.01 \pm 0.01	0.76 \pm 0.25	$ 0.80 \leq$ \swarrow $< 1.20 $
	Foot			0.01 \pm 0.01			-0.04 \pm 0.03	$ 1.20 \leq$ \swarrow
	Pelvis			0.51 \pm 0.19			-0.1 \pm 0.09	
	Hip		0.79 \pm 0.25	-0.89 \pm 0.23		-0.11 \pm 0.10	0.17 \pm 0.12	
	Thigh			0.27 \pm 0.12			-0.01 \pm 0.08	
	Thigh			0.08 \pm 0.10			-0.08 \pm 0.06	
Support leg	Knee		0.14 \pm 0.11	-0.45 \pm 0.22		0.00 \pm 0.04	0.04 \pm 0.07	$ 0.20 \leq$ \downarrow $< 0.60 $
	Shank			0.05 \pm 0.08			0.07 \pm 0.06	$ 0.60 \leq$ \downarrow $< 1.00 $
	Shank			-0.02 \pm 0.10			-0.04 \pm 0.05	$ 1.00 \leq$ \downarrow $< 1.40 $
	Ankle		0.37 \pm 0.16	-0.41 \pm 0.18		0.00 \pm 0.05	0.04 \pm 0.09	$ 1.40 \leq$ \downarrow
	Foot			0.38 \pm 0.18			0.04 \pm 0.08	

● Generation ● Absorption ↓ Inflow ↑ Outflow Unit: [J/kg]

Table 4-2 Mechanical energy flow during LEGUP divided into four groups.

		(Mean)																	
Segment/joint		GOOD			POOR			TIME			SPEED			JTP					
		JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	•	○	○	○	○	
Trunk	Torso		-0.39			-0.15			-0.27			-0.16			0.10 ≤	< 0.30			
	Pelvis		0.17	0.23		0.25	-0.17		0.18	0.01		0.14	-0.09		0.30 ≤	< 0.50			
				0.56			0.39			0.45			0.30		0.50 ≤	< 0.80			
Kicking leg	Pelvis		-0.71			-0.30			-0.51			-0.53		0.80 ≤	○				
	Hip		0.49	1.74		0.45	1.07		0.39	1.33		0.39	0.99						
	Thigh			1.20			0.75			0.90			0.92						
	Thigh			0.21			0.35			0.40			0.29						
	Knee		0.19	1.79		0.25	1.32		0.26	1.58		0.24	1.26						
	Shank			-0.03			-0.09			-0.14			-0.06						
	Shank			-0.01			0.00			0.00			0.00						
Shank	Foot		0.01	0.40		0.00	0.36		0.01	0.39		0.01	0.32						
Shank	Foot			0.02			0.01			0.01			0.01						
Support leg	Pelvis		0.55			0.33			0.54			0.61							
	Hip		0.88	-0.97		0.67	-0.86		0.82	-0.82		0.86	-0.83						
	Thigh			0.33			0.34			0.28			0.25						
	Thigh			0.10			0.08			0.09			0.14						
	Knee		0.13	-0.49		0.18	-0.40		0.12	-0.38		0.09	-0.25						
	Shank			0.04			0.10			0.04			-0.05						
	Shank	Foot		0.02			-0.06			0.03			-0.10						
Shank	Foot		0.40	-0.43		0.33	-0.40		0.34	-0.33		0.28	-0.41						
Shank	Foot			0.38			0.39			0.31			0.38						

● Generation ● Absorption ↓ Inflow ↑ Outflow Unit: [J/kg]

JTP

- <|0.10|
- <|0.30|
- <|0.50|
- <|0.80|
- >|0.80|

STP

- ↘ <|0.10|
- ↘ <|0.40|
- ↘ <|0.80|
- ↘ <|1.20|
- ↘ >|1.20|

JFP

- ⇩ <|0.20|
- ⇩ <|0.60|
- ⇩ <|1.00|
- ⇩ <|1.40|
- ⇩ >|1.40|

Table 4-3 Mechanical energy flow during STRIKE divided into four groups.

		(Mean)																
Segment/joint		GOOD			POOR			TIME			SPEED			JTP				
		JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	•	○	○	○	
Trunk	Trunk																	
	Torso	0.23		0.03	0.12		-0.03	0.29		-0.05	0.20		-0.01	$0.10 \leq$	< 0.30			
	Pelvis		0.36			0.21			0.33			0.27		$0.30 \leq$	< 0.50			
Kicking leg	Pelvis			-0.63			-0.26			-0.38			-0.38	$0.50 \leq$	< 0.80			
	Hip	-0.19		-0.60	-0.18		-0.18	-0.22		-0.04	-0.23		-0.35	$0.80 \leq$	< 1.20			
	Thigh		0.46			0.08			0.15			0.14						
	Thigh		0.12			0.01			0.03			0.05						
	Knee	-0.15		1.30	-0.08		0.56	-0.12		0.79	-0.06		0.70	< 0.10				
	Shank		-0.26			-0.09			-0.14			-0.12		$0.10 \leq$	< 0.40			
	Shank		0.02			0.02			0.04			0.05		$0.40 \leq$	< 0.80			
	Foot	-0.01		1.20	0.00		0.47	-0.01		0.79	0.00		0.69	$0.80 \leq$	< 1.20			
Support leg	Pelvis			-0.08			0.02			-0.16			-0.09	$1.20 \leq$				
	Hip	-0.21		0.29	-0.03		0.18	-0.09		0.12	-0.04		0.17					
	Thigh		-0.13			-0.05			0.07			0.06						
	Thigh		0.00			-0.05			-0.13			-0.13						
	Knee	0.01		0.09	0.00		0.01	-0.02		0.02	-0.02		0.07	$0.20 \leq$	< 0.60			
	Shank		0.00			0.06			0.11			0.11		$0.60 \leq$	< 1.00			
	Shank		-0.02			-0.02			-0.05			-0.07		$1.00 \leq$	< 1.40			
	Foot	-0.02		0.03	0.00		0.03	0.01		0.03	0.00		0.05	$1.40 \leq$				

● Generation ● Absorption ↓ Inflow ↑ Outflow Unit: [J/kg]

4.4 考察

4.4.1 テコンドーの前回し蹴り動作のダイナミックな動作局面における基本メカニズム

テコンドーの前回し蹴り動作は以下のような動作によって特徴づけられていた。

LEGUP 局面において、kinematics 的観点 (Figure 4-9, Figure 4-11, Figure 4-13) から、上胴の左回旋角速度は漸減し、下胴の左回旋角速度は 60% でピークになり、その後、MKF まで値を保持した。また、蹴り脚股関節屈曲角速度は 60% 以降 MKF まで急増し、軸脚股関節伸展角速度は、60% まで漸増した。それに伴い、軸脚股関節内転角速度は、60% で外転角速度に変化した。kinetics 的観点 (Figure 4-15, Figure 4-16) から、上胴から下胴に作用する体幹関節トルクは、左回旋方向に作用し、下胴から蹴り脚大腿に作用する蹴り脚股関節トルクは屈曲方向および内転方向に作用していた。それに伴い、下胴から蹴り脚大腿に作用する蹴り脚股関節力によるモーメントは外転方向に作用していた。また、下胴から軸脚大腿に作用する軸脚股関節トルクは大きく伸展方向に作用していた。energetics 的観点 (Figure 4-18, Table 4-1) から、蹴り脚大腿の力学的エネルギーは漸増したが、蹴り脚下腿の力学的エネルギーは MKF 前にピークになった。また、蹴り脚セグメント以外に大きな力学的エネルギーの変動はみられなかった。

STRIKE 局面において、kinematics 的観点 (Figure 4-11) から、上胴の左屈角速度が増加し、上胴の左回旋角速度は LEGUP 局面に続いて漸減し、IMP で概ねゼロであった。下胴の左屈角速度が増加し、下胴の左回旋角速度は 90% 以降で急激に減少した。また、蹴り脚股関節屈曲角速度は漸減し、蹴り脚股関節外転角速度は増加した。また蹴り脚股関節内旋角速度は IMP 直前に増加した。蹴り脚膝関節伸展角速度は、急増した。また、軸脚股関節外転角速度が増加した。kinetics 的観点 (Figure 4-15) から、上胴から下胴に作用する体幹関節トルクは、左回旋方向に作用していたが IMP 直前で右回旋方向に作用していた。蹴り脚大腿から下腿に作用する蹴り脚膝関節力によるモーメントは伸展方向に作用していた。energetics 的観点 (Figure 4-18, Table 4-1) から、蹴り脚大腿の力学的エネルギーは MKF 以

降急減し、それに伴い蹴り脚足部の力学的エネルギーが急増した。主に JFP により、蹴り脚セグメントに力学的エネルギーが伝達されていた。また、蹴り脚セグメント以外に大きな力学的エネルギーの変動はみられなかった。

上述した動作特徴は、以下に挙げるテコンドーにおける中段の前回し蹴り動作を行う際の制約条件 (Figure 4-20) を満たすために発現すると考えられる。(i) 限られた間合い (試技距離) の中で蹴る。(ii) 相手選手の体幹部の高さまで蹴り脚を上げて蹴る。(iii) 蹴り脚足部、足の甲でターゲットを蹴る。(iv) 蹴りスピードを獲得する。(v) 同時に、動作全体の時間を短くする。(vi) 連続して蹴ることができるように姿勢を維持する。特に (i) 間合い、(ii) 脚拳上、(v) 動作時間、(vi) 姿勢維持の制約条件があることで、バイオメカニクス分野で研究対象とされるような「助走をつける」ことができ、「地面に置いてある」ボールを蹴り、「動作時間」に規定がなく、「連続して」蹴ることがないサッカーのフリーキック動作とは動作メカニズムが異なると予想される。また (iii) インパクト部位および (v) 動作時間の制約条件があることで同様な蹴りの格闘技である「下腿」で相手を蹴り、「動作時間」に規定がないキックボクシングにみられる前回し蹴り動作とも動作メカニズムが異なると予想される。

具体的には、本章で着目したダイナミックな局面において (i) 間合いの制約条件を満たすためには、蹴り脚の離地時 (TOF) 以降の並進運動による並進距離の獲得および回転運動による並進距離の獲得の組み合わせを調節する必要がある。(ii) 脚拳上の制約条件を満たすためには、TOF の姿勢を考慮すると、下胴の左屈動作および蹴り脚股関節の屈曲、内外転動作によって蹴り脚を拳上することができる。(iii) インパクト部位の制約条件を満たすためには、蹴り脚のインパクト時 (IMP) の姿勢によるが、股関節の内旋動作や外転動作、下胴の左回旋動作によって足の甲でターゲットにインパクトすることができる。(iv) 蹴りスピードの制約条件を満たすためには、前回し蹴り動作はスウィング動作であることを考慮すると、「運動の連鎖」を用いる必要がある。(v) 動作時間の制約条件を満

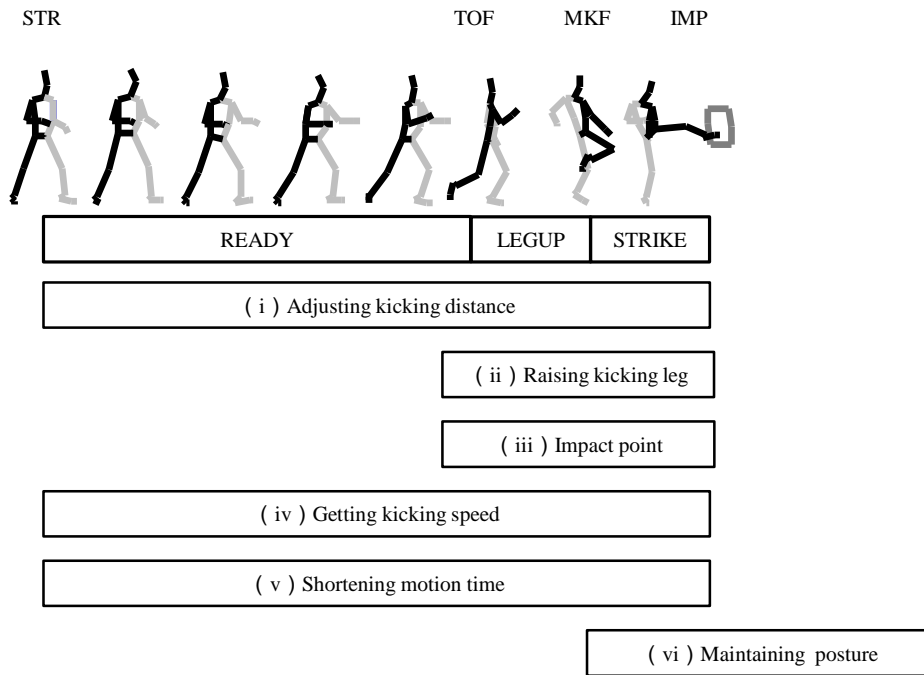


Figure 4-20 Conceptual diagram of constraint condition in Taekwondo roundhouse kick.

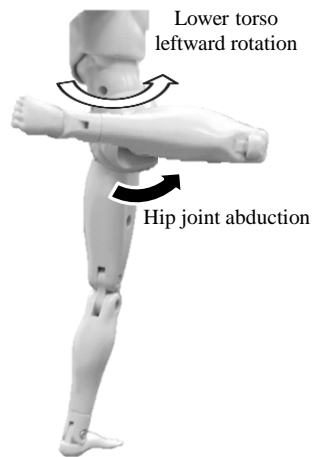
たすためには、蹴り脚足部の移動距離を短くすることが必要である。(vi) 姿勢維持の制約条件を満たすためには、IMP で慣性の大きな部位の運動をなるべく抑えておき身体の操作性をまた、蹴り脚の操作性を高める必要がある。ただし、(i) 間合い、(ii) 脚拳上、(iii) インパクト部位の制約条件は、テコンドーの前回し蹴り動作達成における必要十分条件であるが、(iv) 蹴りスピード、(v) 動作時間、(vi) 姿勢維持の制約条件は、テコンドーの前回し蹴り動作達成における十分条件であると捉えることができる。

ここで、テコンドーの前回し蹴り動作における力学特性について詳細に述べる。

LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせたダイナミックな動作局面において、蹴り脚以外を大きく動かすことはしない。そのため、頭部と上肢、上胴、下胴、軸脚大腿、下腿、足部の力学的エネルギーは並進および回転の運動エネルギーに比べて、位置エネルギーに大きく依存し、特に軸脚足部は位置エネルギーが小さいため身体セグメントの力学的エネルギーがその他の身体セグメントに比べて小さかったと考えられる。これらの力学的エネルギーの変化パターンは (i) 間合いの制約条件を満たすために発現する。また、軸脚股関節伸展角速度の漸増は、並進運動による並進距離の獲得を示している。

LEGUP 局面での蹴り脚股関節の屈曲動作や、STRIKE 局面での、蹴り脚股関節外転動作および下胴の左屈動作は、(ii) 脚拳上の制約条件を満たすことを可能にする。また、軸脚股関節内転角速度から外転角速度への変化も下胴の左屈動作に起因し、下胴が軸脚股関節を支点にし、持ち上げられていることを示している。ここで、LEGUP 局面では蹴り脚股関節トルクは内転方向に大きく作用していたが、下胴左回旋によって生じる運動依存力モーメント (Feltner, 1989; Feltner and Dapena, 1989) が、蹴り脚股関節の外転方向に大きく作用する。したがって、蹴り脚股関節トルクを内転方向に作用させなければ、蹴り脚股関節が適切な局面以外に外転位になり、大きく外側を通りながら、高さを獲得していくことになる (Figure 4-21)。また、大きな下胴の左回旋動作は、後述するように蹴りスピードを獲得するために必要であるため、蹴り脚股関節の内転トルク発揮は (ii) 脚拳上のみ

(a) Without hip joint torque of adduction



(b) With hip joint torque of adduction

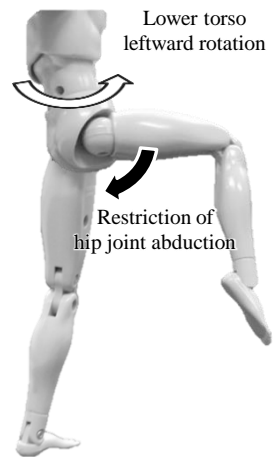


Figure 4-21 Function of hip joint torque of adduction.

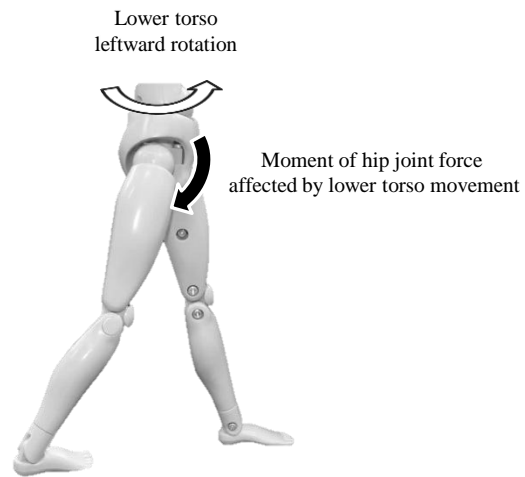


Figure 4-22 Pattern diagram of moment of hip joint force produced by lower torso movement.

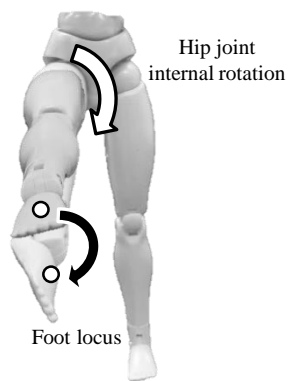
らず、同時に (v) 動作時間および (iv) 蹴りスピードの制約条件を満たすことも可能にしている。また、蹴り脚足部の動きが蹴り脚下腿に与える影響は小さいことを考慮すると、**STRIKE** 局面で大きな下胴左回旋角速度が急激に抑制されることや、蹴り脚下腿の遠心力成分によって、蹴り脚股関節屈曲角速度が抑制されることで生成される蹴り脚膝関節力によるモーメントの伸展させる作用が蹴り脚膝関節トルクの伸展作用に比べて、大きく蹴り脚下腿を蹴りだし方向に回転させ、主に蹴り脚膝関節伸展に寄与し (iv) 蹴りスピードの制約条件を満たすことを可能にしている。ここで、**LEGUP** 局面において、大きな下胴の左回旋角速度を生成することが大きな蹴りスピード獲得に繋がると述べたが、**LEGUP** 局面の蹴り脚股関節角度を考慮すると、下胴の左回旋角速度を増加させることで、蹴り脚股関節伸展方向に大きな運動依存モーメントが作用し、蹴り脚股関節を屈曲させるために大きな股関節トルクの屈曲作用を発揮する必要がある (Figure 4-22)。上述したように、蹴り脚股関節屈曲角速度も蹴りスピード生成の主な要因であり、下胴左回旋角速度を大きくすることで、蹴り脚股関節屈曲角速度の増加の妨げになり、蹴りスピードの増加が頭打ちになる恐れがあることを考える必要がある。

Robertson and Mosher (1985) は、サッカーにおける蹴り動作について、支持足着地後インパクトに向けて右足の膝関節伸展動作開始前から膝関節伸展トルクを発揮し、インパクト直前には膝関節屈曲トルクを発揮していると報告している。布目 (1999) も、サッカーのインステップキックとインサイドキックに共通して、膝関節伸展の顕著な関節トルクが右つま先の離地からインパクトまで発揮されていたと報告している。実験試技として用いられるサッカーのフリーキックでは、支持足着地後からインパクトまでの時間に制限がなく、大きく右股関節を伸展させた姿勢から右足部を最大限に加速させボールを蹴ることが可能である。そのため、右膝関節トルクの伸展作用を最大限に利用した蹴り動作を行っていると考えられる。一方、テコンドーにおいて、次の蹴り動作へと繋げるためにインパクト直後は蹴り脚膝関節を素早く屈曲させ、操作性を高める必要がある。そこで、蹴り脚膝

関節トルクの伸展作用を大きく発揮して蹴り動作を行うのではなく、蹴り脚膝関節力によるモーメントで伸展動作を行い、蹴り脚膝関節トルクの伸展作用を抑える方が、インパクト後に蹴り脚膝関節トルクを伸展から屈曲へと作用させることが容易になると推察される。したがって、より大きな蹴り脚膝関節力によるモーメントで膝関節伸展動作を行い、膝関節伸展トルクの発揮を抑えることが、テコンドーにおける特有かつ合理的な膝関節伸展方法であると推察され (iv) 蹴りスピードのみならず、(vi) 姿勢維持の制約条件を満たすことも可能にしている。また、IMP 直前に蹴り脚股関節内旋角速度が大きくなることは、(iii) インパクト部位の制約条件を満たすことを可能にするが、同時に STRIKE 局面を通して蹴り膝関節が完全伸展位になることはないために、蹴りスピードの獲得に繋がり、(iv) 蹴りスピードの制約条件を満たすことも可能にしている (Figure 4-23)。

蹴り脚セグメントにおいて、近位セグメントである蹴り脚大腿の力学的エネルギーの減少とともに遠位セグメントである蹴り脚足部の力学的エネルギーが増加する傾向は、投球におけるスウィング動作の先行研究文献と一致しており、スウィング動作に特徴的な力学的エネルギーの変化パターンである「運動の連鎖」が行われていたと考えられる。しかし、ここで、サッカーのインステップキック動作や野球のピッチング動作とテコンドーの前回し蹴り動作を比較する (Figure 4-24) と、インステップ蹴り脚のスウィング動作のように、大腿、下腿、足部の順に、投球腕のスウィング動作のように、上腕、前腕、手部の順に力学的エネルギーのピーク値が出現するのではなく、テコンドーでは蹴り脚下腿、大腿、足部の順で出現し、蹴り脚下腿の力学的エネルギーは約 70% で増加率が小さくなると IMP までその値を維持していた。このことは、蹴りスピード獲得のための蹴り脚足関節の可動域が手関節に比べ狭く、投球腕上肢のスウィング動作ほど遠位セグメントの役割が大きくないことを示していると考えられる。また、テコンドーの前回し蹴りでは、サッカーのインステップキックとは異なり、上述したような STRIKE 局面において (iii) インパクト部位の制約条件を満たすために、蹴り脚股関節内旋角速度が大きくなることで、蹴り脚下腿

(a) Extend position of knee joint



(b) Flex position of knee joint

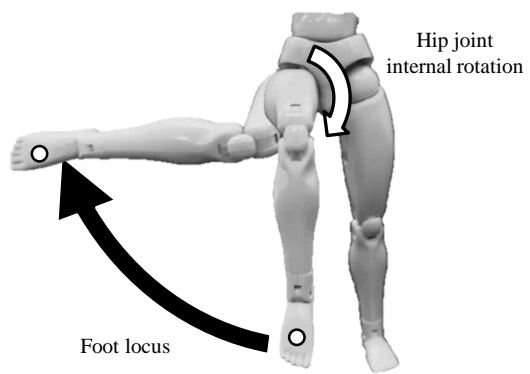
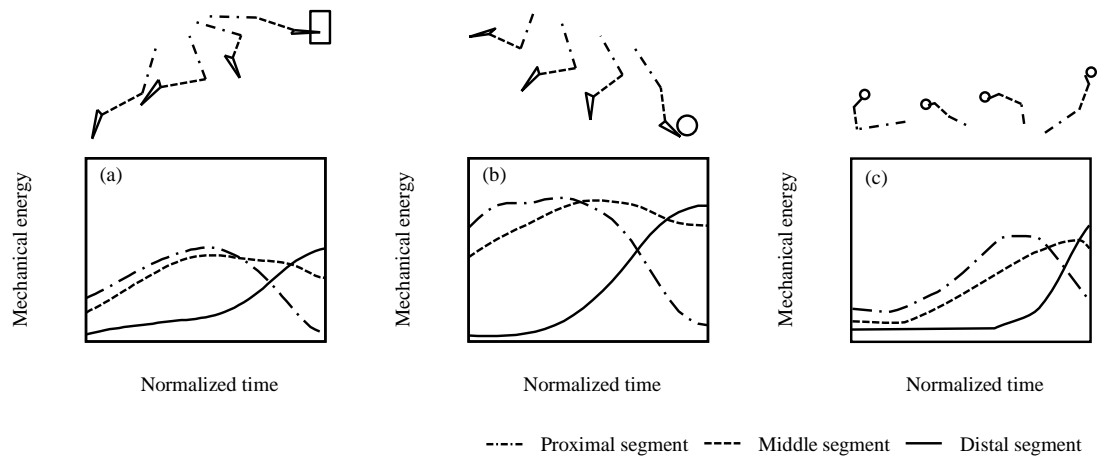


Figure 4-23 Kicking speed produced by internal rotation of kicking hip joint.



Mechanical energy flow by

(a): roundhouse kick in Taekwondo, (b): instep kick in soccer,

(c): pitching in baseball based on Miyanishi et al., 1997.

Figure 4-24 Pattern diagram of mechanical energy flow during swing motions.

の重心位置を大きく変化させることなく蹴り脚足部重心の位置を大きく変化させることができるため、約 70%以降に蹴り脚下腿の力学的エネルギーを一定に維持しながら、蹴り脚足部の力学的エネルギーを急激に増加させることができたためと推察される。また、LEGUP 局面において、最も大きな力学的エネルギーの生成源は大きなトルクを発揮することのできる軸脚股関節であった。蹴り動作を行う際に、蹴り脚足部は TOF から IMP まで物体と接触することはないため、蹴り脚足部には外力は作用しない。一方、軸脚は前回し蹴り動作中に常に地面と接触し、軸脚足部を介して外力を得ることができる。また下肢関節の中でも股関節は、慣性の大きな下胴と大腿で構成され、動かすための筋群も大きい。したがって、軸脚股関節が最も大きな力学的エネルギーの生成源となり得たと考えられる。STRIKE 局面においては、力学的エネルギーの生成はほとんどなく、JFP によって大きな力学的エネルギーが蹴り脚大腿から下腿、足部の順に伝達されていることも投球におけるスウィング動作の特徴と一致していた。

テコンドーの前回し蹴り動作は、(i) 限られた間合い（試技距離）の中で蹴る。(ii) 相手選手の体幹部の高さまで蹴り脚を上げて蹴る。(iii) 蹴り脚足部、足の甲でターゲットを蹴る。(iv) 蹴りスピードを獲得する。(v) 同時に、動作全体の時間を短くする。(vi) 連続して蹴ることができるように姿勢を維持する。特に (i) 間合い、(ii) 脚拳上、(v) 動作時間、(vi) 姿勢維持の制約条件を有することで、以上のような力学的動作特徴を示す。

4.4.2 ダイナミックな動作局面における速度的、時間的な「素早さ」の決定要因

TOF における POOR の上胴左回旋角度、TOF、MKF、IMP における POOR の下胴左回旋角度および IMP における軸脚股関節屈曲角度を除いて、全てのグループで、TOF、MKF、IMP の各イベント時の関節角度変位が概ね同程度である (Figure 4-10) ため速度的、時間的に「素早い」前回し蹴り動作には、瞬間の姿勢に比べて TOF から IMP までの関節角速度の時系列的な変化パターンが大きく関係している (Figure 4-12) と考えられる。また、GOOD

は、他のグループに比べて、**STRIKE** 局面での蹴りスピードの増加率が大きいいため、**IMP** での蹴りスピードが最も大きくなった (Figure 4-8)。しかし、**STRIKE** 局面での蹴りスピードの増加率は、上述した、力学特性を考慮すると **LEGUP** 局面の動きにも依存する。本章では、**READY** 局面を含む全ての局面の動作時間と **IMP** の蹴りスピードによって、4つのグループ分けを行った (Figure 4-3 (c)) が、本章で対象としているダイナミックな動作局面中の動作時間とインパクト時の蹴りスピードには、負の相関が認められた (Figure 4-3 (b))。すなわち、時間的な「素早さ」により影響を及ぼしているのは、本章で対象にしているダイナミックな動作局面ではなく、**READY** 局面である準スタティックな動作局面である。また、蹴りスピードの大きさに関わらず、蹴り脚は同様な軌跡を描くことで、同様な道のり距離を獲得している (Figure 4-5) ため、前回蹴り動作における蹴り脚の軌道は、蹴りスピードの有無に寄らないことが明らかとなった。したがって、本節では、**GOOD** と **POOR** の速度的な「素早さ」について主に言及することで、結果として、速度的、時間的な「素早さ」を明らかにすることに繋がると考えられる。

LEGUP 局面において、kinematics 的観点 (Figure 4-10, Figure 4-12, Figure 4-14) から、上胴の左回旋角速度の変化パターンは概ね同様であったが、**POOR** のみ値が小さかった。一方で、下胴の左回旋角速度の変化パターンは概ね同様であった。**GOOD** は他のグループに比べて、60%以降 **MKF** まで、**GOOD** の蹴り脚股関節屈曲角速度が急激に増加した。**GOOD** は **POOR** に比べて **TOF** 以降 70%まで軸脚股関節伸展角速度が大きく、同時に軸脚膝関節伸展角速度も大きい。kinetics 的観点 (Figure 4-16, Figure 4-17) から、**GOOD** の下胴から蹴り脚大腿に作用する蹴り脚股関節トルクの屈曲方向への作用が大きかった。**GOOD** の下胴から軸脚大腿に作用する軸脚股関節トルクの伸展方向への作用が大きかった。energetics 的観点 (Figure 4-19, Table 4-2) から、**GOOD** では **JFP** により、体幹関節を介して上胴から下胴に一方で、**POOR** では下胴から上胴に力学的エネルギーが伝達された。また **GOOD** では **STP** により、上胴から下胴に大きな力学的エネルギーが流入し、下胴から蹴り脚大腿に大き

な力学的エネルギーが流入出し, JFP により, 蹴り脚股関節を介して下胴から蹴り脚大腿に, 蹴り脚膝関節を介して蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に大きな力学的エネルギーが伝達された. GOOD では, 常に蹴り脚大腿および下腿の力学的エネルギーが大きかったが, 蹴り脚足部の力学的エネルギーは, 各グループで概ね同様の値であった. GOOD では JTP により, 軸脚股関節で大きな力学的エネルギーが生成され, STP により, 軸脚大腿から下胴に大きな力学的エネルギーが流入し, JFP により, 軸脚股関節を介して軸脚大腿から下胴に大きな力学的エネルギーが伝達された.

STRIKE 局面において, kinematics 的観点 (Figure 4-10, Figure 4-12, Figure 4-14) から, GOOD の下胴の左回旋角速度が 90%以降急激に減少した. また, GOOD の蹴り脚股関節屈曲角速度も急激に減少した. それに伴い, 蹴り脚膝関節の伸展角速度が急増した. kinetics 的観点 (Figure 4-16, Figure 4-17) から, IMP 直前の GOOD の上胴から下胴に作用する体幹関節トルクの右回旋方向への作用が大きかった. GOOD の蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に作用する蹴り脚膝関節トルクの屈曲方向への作用が大きく, 蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に作用する蹴り脚膝関節力による 伸展方向への作用が大きかった. energetics 的観点 (Figure 4-19, Table 4-3) から, GOOD では, STP により, 下胴から蹴り脚大腿に大きな力学的エネルギーが流入出し, JFP により, 蹴り脚股関節を介して蹴り脚大腿から下胴に大きな力学的エネルギーが伝達した. また, GOOD では, 蹴り脚膝関節を介して蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に, 蹴り脚足関節を介して蹴り脚下腿から蹴り脚足部に大きな力学的エネルギーが伝達した. GOOD では, 蹴り脚大腿の力学的エネルギーが MKF 以降で最も急減したが, IMP では各グループで同様であった. それに伴い GOOD の蹴り脚足部の力学的エネルギーが急増した.

上述したように蹴りスピードを高めるためには, (i) LEGUP 局面に大きな下胴の左回旋角速度および大きな蹴り脚股関節の屈曲角速度を生成すること, (ii) LEGUP 局面に大きな蹴り脚股関節伸展角速度を生成し, 下胴スピードを生成すること, (iii) 「運動の連鎖」を巧みに用いることであった. GOOD の動作特徴は, これらの力学特性をどのグループよりも

満たしていたために、より、速度的、時間的「素早さ」を高めることができたと考えられる。(iii)「運動の連鎖」を巧みに用いるためには、IMP直前に、下胴左回旋角速度や、股関節屈曲角速度を急減させる必要があるが、下胴左回旋角速度の減少メカニズムは、前述したように90%以降、体幹関節トルクの右回旋作用、蹴り脚股関節トルクの内転作用の影響を下胴が受け、蹴り脚下腿の遠心加速度成分により蹴り脚大腿が蹴り方向とは逆方向（紙面上で左から右に蹴る場合、右から左）に押し戻されることに起因している。また、GOODは、大きな逆向きの蹴り脚股関節加速度を発生させることで、蹴り脚膝関節力モーメントの伸展作用を増加させていたと考えられる。しかし、この蹴り脚股関節の加速度による成分は、蹴り脚下腿の回転運動の大きさにも依存するため、蹴り脚下腿の回転運動が大きくなっていることが前提条件である。

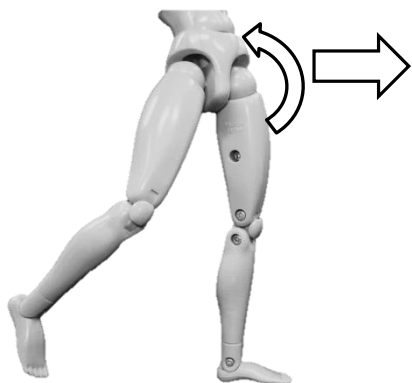
力学的エネルギーの生成に関しては、すべてのグループでLEG UP局面とSTRIKE局面において概ね同程度であるが、主に力学的エネルギーを生成しているLEG UP局面における生成量のGOODと他のグループの差に比べて、IMPにおける蹴り脚足部の力学的エネルギー量のGOODと他のグループの差が大きい。これらのことから、GOODとPOORの差は、力学的エネルギー生成の大きさではなく、力学的エネルギーを蹴り脚足部へ伝達する技術の差によって生じると考えられる。言い換えると、速度的、時間的に「素早い」前回し蹴り動作を行うために、エネルギーを蹴り脚足部に伝達するための身体の動かし方のタイミングを高める技術トレーニングをすることは筋力トレーニングをすることに比べて効果的であると考えられる。したがって、速度的、時間的に「素早い」前回し蹴り動作を行うための技術が存在すると推察され、以下では、力学的エネルギー伝達の技術について述べる。

GOODはLEGUP局面において蹴り脚大腿から蹴り脚下腿へとJFPによる力学的エネルギーの伝達が大きく、下胴から蹴り脚大腿へJFP、STPによってさらに大きな力学的エネルギーが伝達するため、蹴り脚大腿に大きな力学的エネルギーが保持される。ここで、JFPは、関節力ベクトルと関節速度ベクトルの内積で算出することができる。関節力ベクトルと関

節速度ベクトルの大きさが等しければ, JFP の大きさは2つのベクトルがなす角度に依存し, 2つのベクトルのなす角度が小さくなる(同じ方向に近づく)と, JFP は大きくなる. したがって, JFP を大きくするためには関節力または関節速度を大きくすることもしくは, 2つのベクトルのなす角度を小さくすることが必要である. 蹴り脚股関節に関して, GOOD は TOF において軸脚股関節伸展動作によって軸脚股関節を押し出しながら下胴の並進スピードを生成すること, MKF までに下胴の左傾を大きくすることで蹴り脚股関節速度の方向を蹴りだし方向に近づけ, 関節力ベクトルと速度ベクトルのなす角度を小さくすることができると推察される (Figure 4-25). TOF における下胴並進スピードを高めることは, 蹴りスピードに対する正の貢献が大きくなることにつながり, energetics 的観点からも, kinematics 的観点からも蹴りスピードを大きくするための大きな役割を担っていると考えられる.

これまでの kinematics, kinetics の分析のみでは, LEGUP 局面に比べて STRIKE 局面において GOOD と POOR の様々なパラメータの変化パターンが異なり, 分析に関して STRIKE 局面に着目することが多くなりがちである. また実際の指導に関しても, kinematics 的なパラメータの違いから変化を捉え指導するため, STRIKE 局面の重要性を指導する指導者も多い. しかし, energetics の観点から分析すると, LEGUP 局面における動作がその後の STRIKE 局面に大きく影響しているため, STRIKE 局面のみの変化を改善することは難しい. また, 蹴り脚に着目することが多く, 先行研究においても下肢を対象とした研究が多いが, 本章から, 特に, 蹴り脚下腿および足部の動かし方は軸脚や上胴, 下胴にも大きく影響を受けるものであることが明らかとなった. また, 上述したように, 時間的な「素早さ」により影響を及ぼしているのは, 本章で対象にしているダイナミックな動作局面で

(a) Push the left hip joint and get the lower torso speed of translation.



(b) Lean the lower torso and change the way of right hip passed.

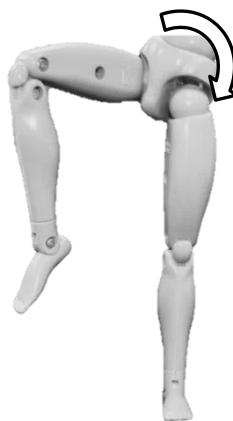


Figure 4-25 Pattern diagram of how to translate large mechanical energy by joint force power.

はなく、READY 局面である準スタティックな動作局面であったため、準スタティックな動作局面も含めて詳細に検討することで、前回し蹴り動作全体の速度的、時間的「素早さ」を明らかにすることができるだろう。

4.5 要約

本章の目的は、ダイナミックな動作局面に着目して前回し蹴り動作における「素早さ」のうち、測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の決定要因を kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにし、評価することであった。

本章の結果から、以下のことが明らかになった。

(1) テコンドーの前回し蹴り動作のダイナミックな動作局面における基本メカニズム

- ① 制約条件によって、テコンドーの前回し蹴り動作は、kinematics 的 kinetics 的観点から、他のスウィング動作とは異なった動作特徴を有していた。
- ② 一方、energetics 的観点から、他のスウィング動作と概ね同様の「運動の連鎖」がみられたが、蹴り脚股関節内旋動作により、蹴り脚下腿の力学的エネルギー変化パターンは異なっていた。

(2) ダイナミックな動作局面における速度的、時間的な「素早さ」の獲得

- ① LEGUP 局面において、大きな下胴の左回旋角速度と大きな蹴り脚股関節の屈曲角速度を生成する必要があった。
- ② LEGUP 局面において、軸脚股関節屈曲伸展動作および軸脚膝関節の屈曲伸展動作を巧みに用いることによって、下胴の並進運動を生成する必要があった。
- ③ STRIKE 局面において、LEGUP 局面で生成した大きな下胴の左回旋角速度と大きな蹴り脚股関節の屈曲角速度が急減し、蹴り脚膝関節伸展角速度が急増する必要があった。
- ④ 大きな力学的エネルギーの生成に比べて、蹴り脚足部へと力学的エネルギーを伝達

する技術を高めることが重要である.

以上のことから, ダイナミックな動作局面中におけるテコンドーの前回し蹴り動作の基本メカニズムを明らかにし, 前回し蹴り動作の「素早さ」のうち, 測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し, 前回し蹴り動作における速度的, 時間的な「素早さ」の決定要因を kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにし, 評価することができた.

5. 準スタティックな動作局面における前回し蹴り動作の「素早さ」

5.1 目的

第4章では、速度的、時間的な「素早さ」として「蹴りスピード」および「動作時間」の2要因を総合的に評価した。特に、大きな蹴りスピードを有するダイナミックな動作局面である蹴り脚の離地後からターゲットへのインパクトまで(LEGUP局面と STRIKE局面)を詳細に分析し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の獲得メカニズムを明らかにした。しかし、ダイナミックな動作局面は、軸脚のみで身体の挙動を制御する必要があることを考慮すると、両脚で身体に力を作用させることができる準スタティックな動作局面 (READY局面)、すなわち蹴り始めから蹴り脚の離地前の動作も、蹴りスピードの生成および動作時間の短縮に大きく関係すると考えられる。また、ダイナミックな動作局面の動作時間と IMP の蹴りスピードでは、有意な負の相関が認められた(Figure 4-2 (b))。しかし、ダイナミックな動作局面の動作時間 (mean=0.223±0.025 s) に比べて、準スタティックな動作局面の動作時間 (mean=0.318±0.079 s) の方が長い (Figure 4-2 (a))。また、身体運動の制御の側面から考えると、身体が高速で変位するダイナミックな動作局面に比べて、動きが遅い準スタティックな動作局面の方が、制御しやすい。したがって、前回し蹴り動作の速度的、時間的な「素早さ」の向上に対しては、ダイナミックな動作局面に比べて、準スタティックな動作局面に対する改善の余地が大きい。

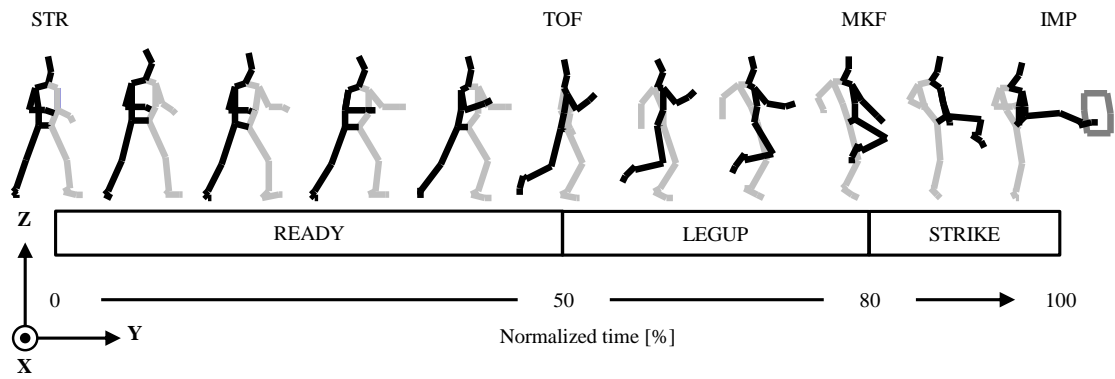
そこで、本章の目的は、準スタティックな動作局面である READY局面に着目して前回し蹴り動作における「素早さ」のうち、測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の獲得メカニズムを kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにすることである。

5.2 方法

本章の被験者，実験環境および試技，データ収集，データ処理は第 3 章において述べた実験 1 の通りである．また，分析基礎パラメータについても同様に，第 3 章において述べた．本章では，準スタティックな動作局面に着目して前回し蹴り動作における速度的，時間的な「素早さ」を kinematics, kinetics, energetics 的観点から明らかにするために，第 4 章で算出した kinematics 的貢献，関節トルク，関節力によるモーメント，エネルギーフローと蹴りスピードおよび動作時間の関係を検討する．

5.2.1 局面定義

第 4 章の局面定義と同様に，「蹴り動作開始」(Start to kick, 以下, STR)，「蹴り脚離地」(Toe rises off the floor, 以下, TOF)，「蹴り脚膝関節最大屈曲」(Maximum knee flexion, 以下, MKF)，「インパクト」(Impact, 以下, IMP) のイベントを設定し READY 局面, LEGUP 局面, STRIKE 局面を定義した (Figure 5-1)．



STR : Start to kick, TOF : Toe rises off the floor, MKF : Maximum knee flexion, IMP : Impact to target.

Figure 5-1 Phase definition of roundhouse kick.

5.2.2 被験者のグループ分け

第4章と同様にIMPの蹴りスピードと全ての局面の動作時間において、蹴りスピードが平均+SDよりも大きく、蹴り時間が平均-SDよりも小さい被験者3名をGOOD（蹴りスピード： 19.26 ± 0.32 m/s, 動作時間： 0.440 ± 0.011 s）、蹴りスピードが平均-SDよりも小さく、動作時間が平均+SDよりも大きい被験者3名をPOOR（蹴りスピード： 13.28 ± 0.56 m/s, 動作時間： 0.677 ± 0.035 s）、蹴りスピードが平均 $\pm 0.5SD$ 内であり、動作時間が平均-0.5SDよりも小さい被験者5名をTIME（蹴りスピード： 15.70 ± 0.43 m/s, 動作時間： 0.454 ± 0.015 s）、蹴りスピードが平均-0.5SD内であり、動作時間が平均+SDよりも大きい被験者3名をSPEED（蹴りスピード： 15.04 ± 0.39 m/s, 動作時間： 0.691 ± 0.026 s）とした（Figure 4-3 (c)）。

5.2.3 統計処理

第4章と同様に本章では、グループ間の差に関する統計処理を行っていない。なお、算出される事象はすべて物理法則により担保されているため、速度的、時間的な「素早さ」の基本メカニズムを検討することは十分に可能である。

5.3 結果

本節では、速度的、時間的「素早さ」の検討を行うために、全被験者35名のデータと前述した方法で選出した各グループの平均値を、必要に応じて標準偏差とともに示していく。

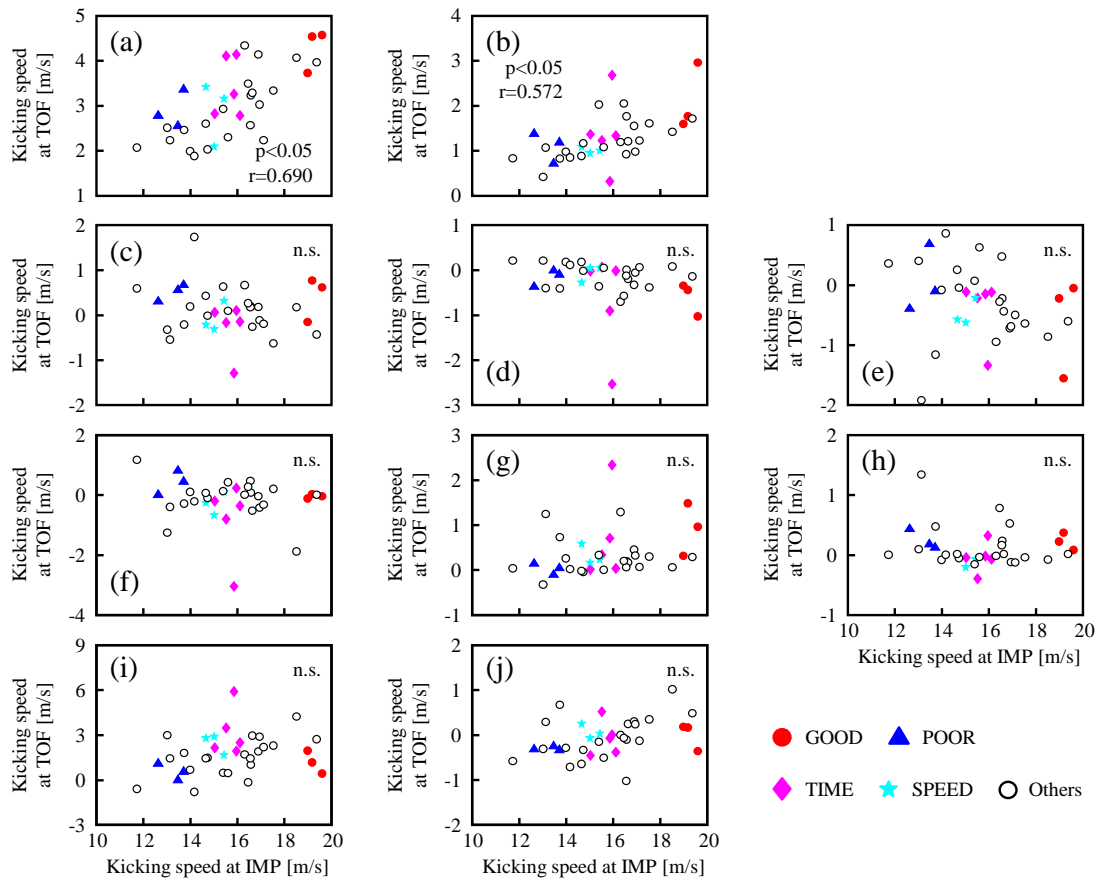
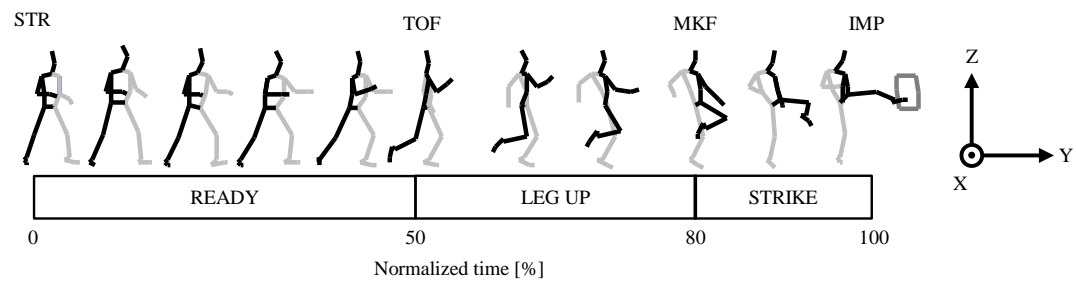
5.3.1 蹴り脚つま先離地時における蹴りスピードに対するkinematics的貢献

Figure 5-2は、全被験者35名のTOFの蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピード、下胴および蹴り脚の各関節運動によるkinematics的貢献とIMPの蹴りスピードを示している。Figure 5-3は、全被験者35名のTOFの蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピード、下胴および蹴り脚の各関節運動によるkinematics的貢献とSTRからIMPまでの動作時間を示している。Figure 5-4は、全被験者35名のTOFの蹴りスピード

に対する軸脚により生成された下胴スピード，下胴および蹴り脚の各関節運動による kinematics 的貢献と STR から TOF までの READY 局面の動作時間を示している。Figure 5-5 は，全被験者 35 名の TOF の下胴スピードと蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピードによる kinematics 的貢献，STR から IMP までの動作時間，STR から TOF までの READY 局面の動作時間を示している。Figure 5-6 は，各グループの TOF に蹴り速度が持つ方向成分（左右方向：X 軸，蹴り（前後）方向：Y 軸，上下方向：Z 軸）を示している。

以下，特徴的なデータについて述べていく。

TOF の軸脚各関節の動作により生成された下胴スピードの蹴りスピードへの貢献は，IMP の蹴りスピードおよび STR から IMP までの動作時間と有意な相関が認められた (Figure 5-2 (b)，Figure 5-3 (b)) が READY 局面中の動作時間との間には有意な相関が認められなかった (Figure 5-4 (b))。TOF の下胴スピードと蹴りスピードに対する軸脚により生成された下胴スピードによる kinematics 的貢献と TOF の下胴スピードには有意な相関が認められ，高い相関係数であった ($p < 0.05$, $r = 0.911$)。また，TOF の下胴スピードと IMP の蹴りスピードおよび STR から IMP までの動作時間，STR から TOF までの READY 局面の動作時間には有意な相関が認められた (Figure 5-5)。TIME の蹴り方向の TOF の蹴り速度が持つ単位ベクトル方向成分は，他のグループよりも小さく，上方向に大きかった (Figure 5-6)。一方で，GOOD は，蹴り方向の成分が 3 方向の中で最も大きかった (Figure 5-6)。



Plots between kicking speed at impact and contribution to kicking speed at toe-off produced by

(a): kicking speed, (b): translational motion by support leg,

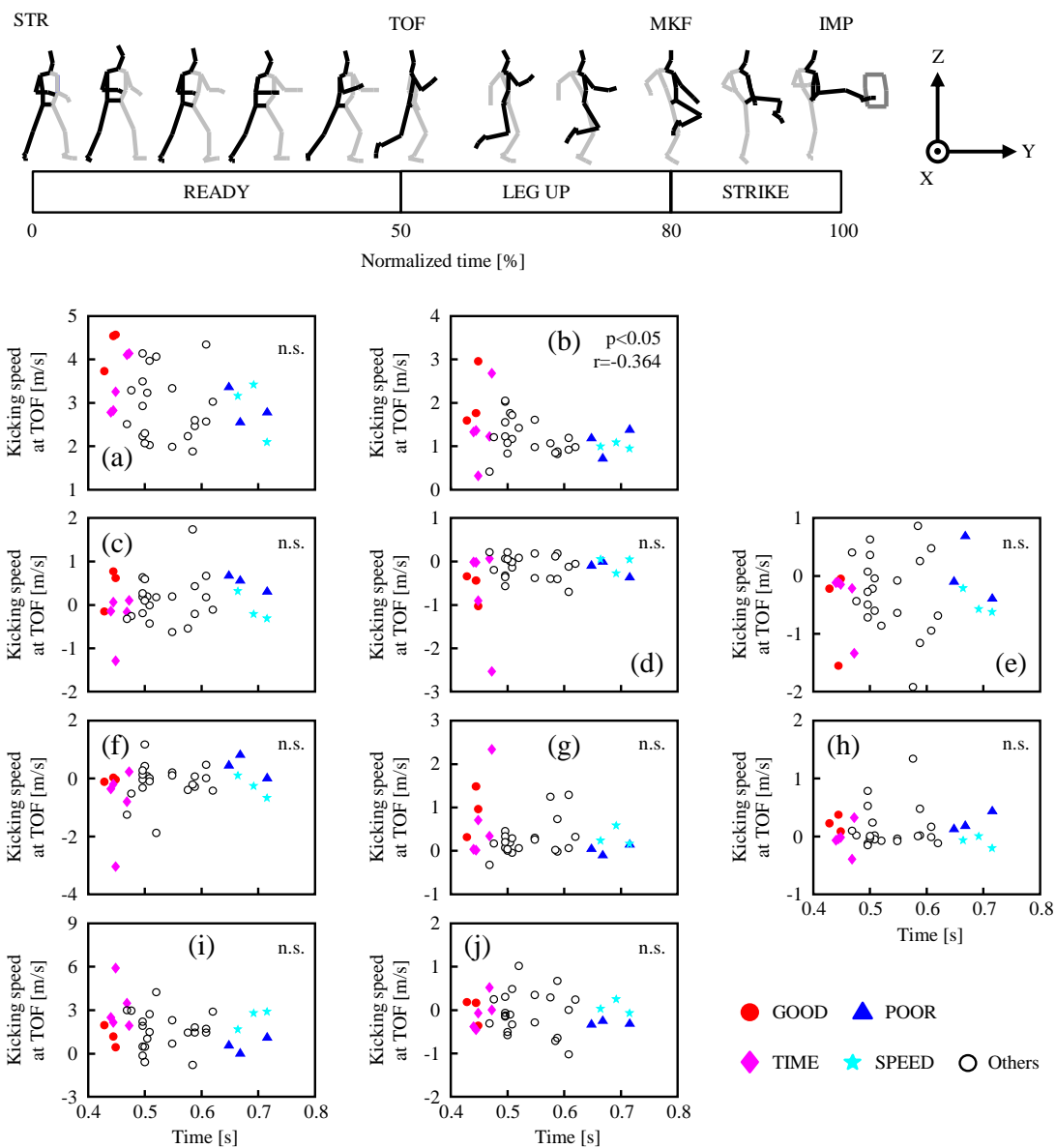
(c): lower torso forward/backward lean, (d): lower torso left/right lean, (e): lower torso left/right rotation,

(f): hip joint flexion/extension of kicking leg, (g): hip joint adduction/abduction of kicking leg,

(h): hip joint internal/external rotation of kicking leg,

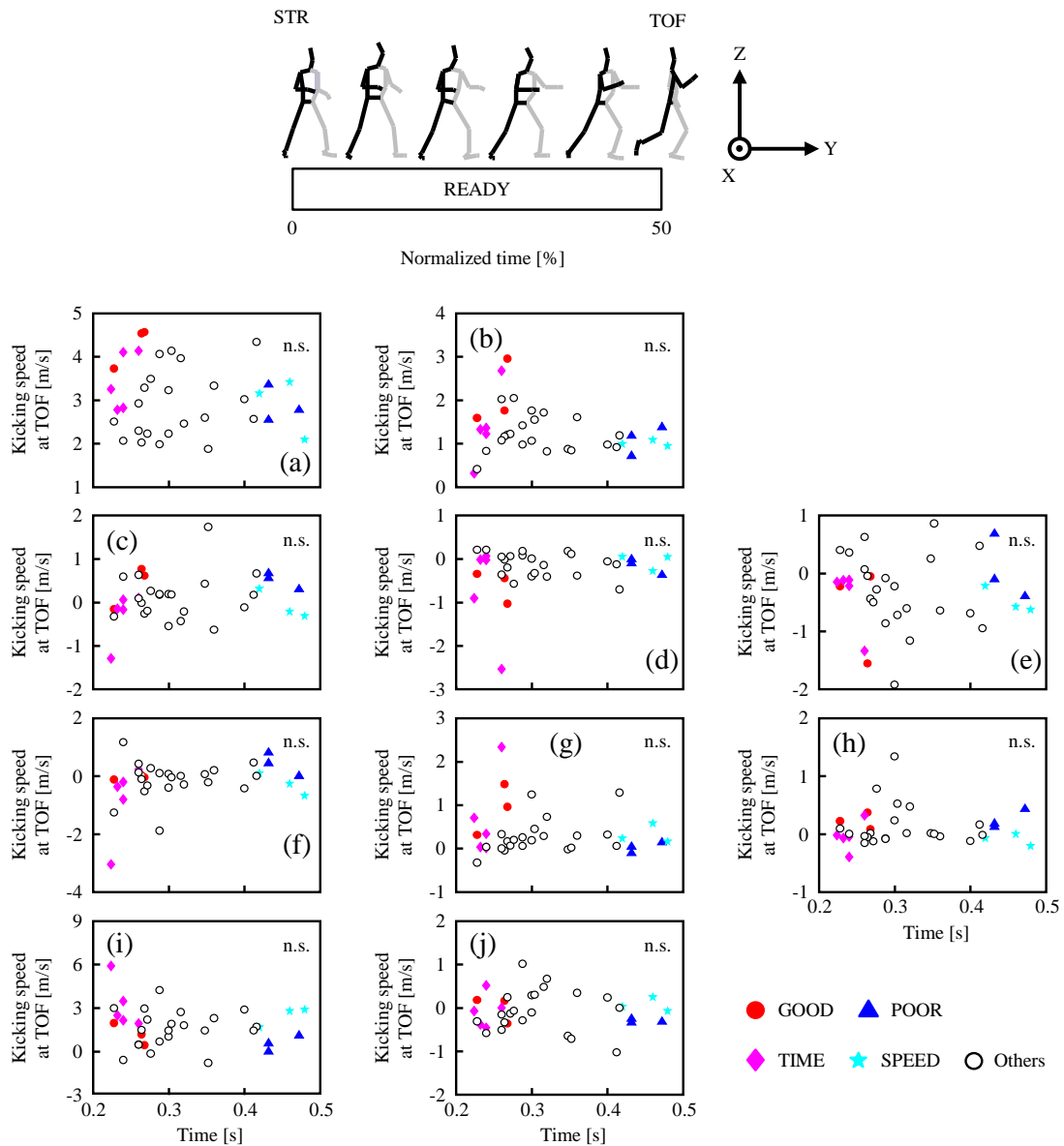
(i): knee joint flexion/extension of kicking leg, (j): ankle joint plantar/dorsi flexion of kicking leg

Figure 5-2 Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking speed at impact.



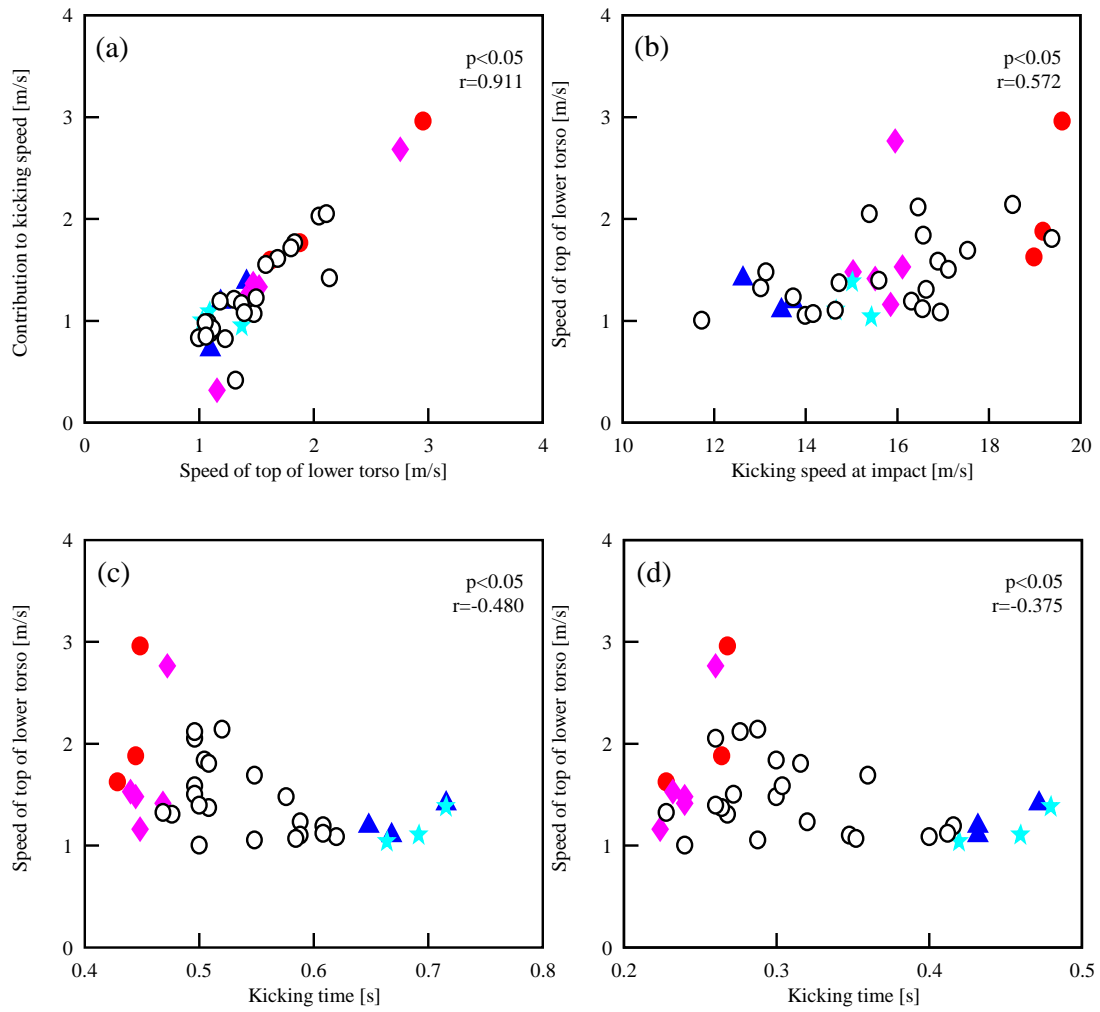
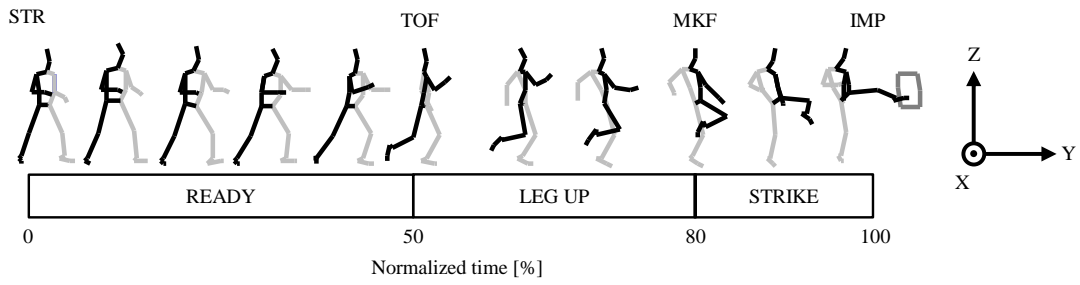
Plots between kicking time during all three phases and contribution to kicking speed at toe-off produced by
 (a): kicking speed, (b): translational motion by support leg,
 (c): lower torso forward/backward lean, (d): lower torso left/right lean, (e): lower torso left/right rotation,
 (f): hip joint flexion/extension of kicking leg, (g): hip joint adduction/abduction of kicking leg,
 (h): hip joint internal/external rotation of kicking leg,
 (i): knee joint flexion/extension of kicking leg, (j): ankle joint plantar/dorsi flexion of kicking leg

Figure 5-3 Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking time during all three phase.



Plots between kicking time during READY phases and contribution to kicking speed at toe-off produced by
 (a): kicking speed, (b): translational motion by support leg,
 (c): lower torso forward/backward lean, (d): lower torso left/right lean, (e): lower torso left/right rotation,
 (f): hip joint flexion/extension of kicking leg, (g): hip joint adduction/abduction of kicking leg,
 (h): hip joint internal/external rotation of kicking leg,
 (i): knee joint flexion/extension of kicking leg, (j): ankle joint plantar/dorsi flexion of kicking leg

Figure 5-4 Scatter plots of kinematics contribution to kicking speed at toe rises off the floor and kicking time during READY phase.



Plots between speed of top of lower torso at toe rises off the floor and

- (a): contribution of lower torso speed to kicking speed ,
- (b): kicking speed at impact,
- (c): kicking time during all three phases,
- (d): kicking time during READY phases.

● GOOD ▲ POOR
◆ TIME ★ SPEED ○ Others

Figure 5-5 Scatter plots of speed of lower torso and four parameters.

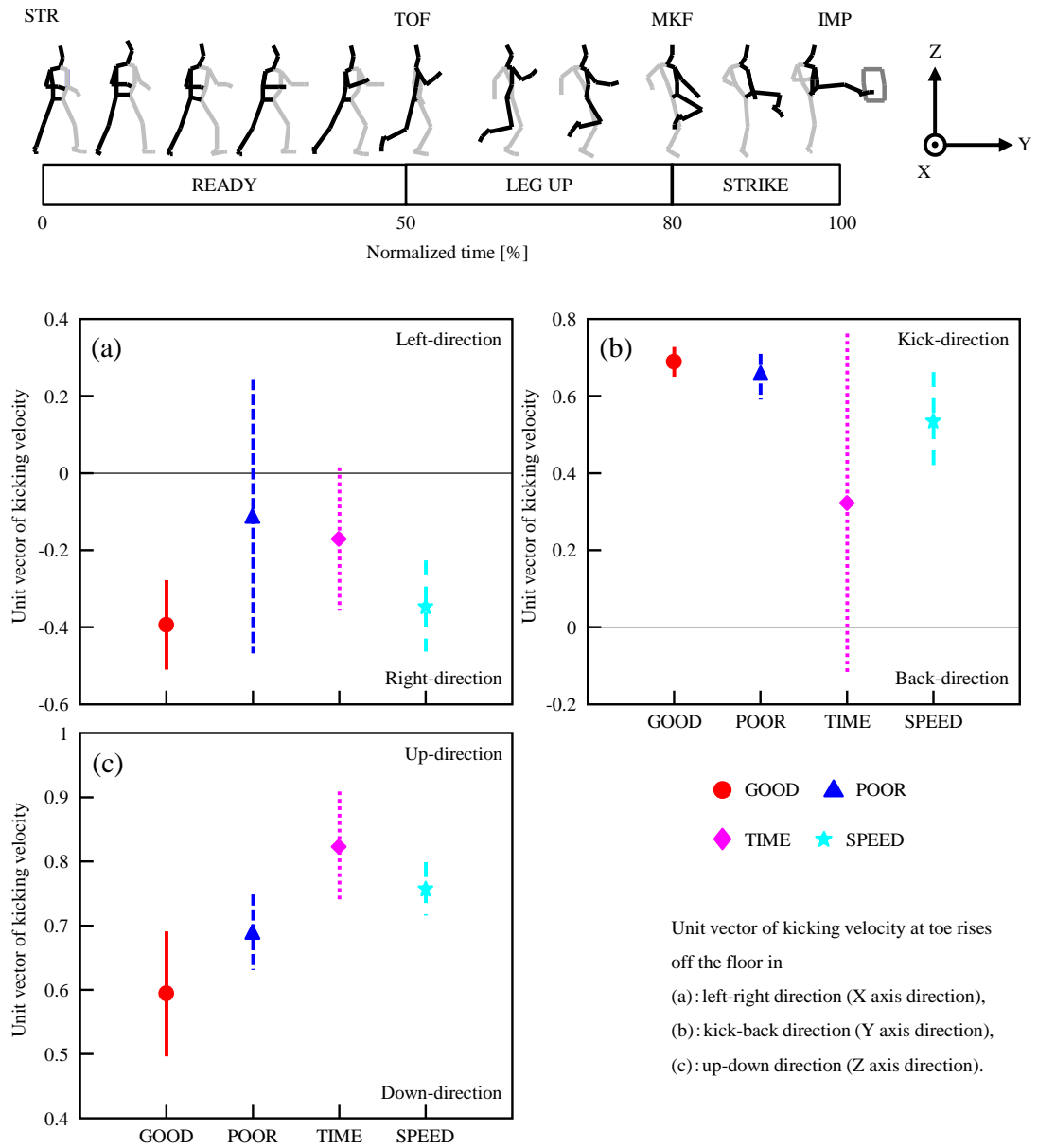


Figure 5-6 Plots of unit vector of kicking velocity at toe rises off the floor in all three directions.

5.3.2 READY 局面における kinematics と kinetics

Figure 5-7 は、各グループの上胴と下胴のセグメント角度（左右屈角度、左右回旋角度）、蹴り脚および軸脚の関節角度（股関節：屈曲伸展角度、内外転角度、内外旋角度、膝関節：屈曲伸展角度、足関節：底背屈角度）ならびにその標準偏差のイベントごと（STR, TOF）のデータを示している。Figure 5-8 は、各グループの上胴と下胴のセグメント角速度（左右屈角速度、左右回旋角速度）、蹴り脚および軸脚の関節角速度（股関節：屈曲伸展角速度、内外転角速度、内外旋角速度、膝関節：屈曲伸展角速度、足関節：底背屈角速度）の時系列データを示している。Figure 5-9 は、各グループの上胴から下胴に作用する体幹関節トルク、蹴り脚および軸脚の下胴から大腿に作用する股関節トルク、大腿から下腿に作用する膝関節トルクの時系列データを示している。Figure 5-10 は、各グループの上胴から下胴に作用する体幹関節力によるモーメント、下胴から大腿に作用する股関節力によるモーメント、大腿から下腿に作用する膝関節力によるモーメントの時系列データを示している。なお、図中の U-は上胴、L-は下胴、K-は蹴り脚、S-は軸脚を示している。以下に、特徴的なデータについて述べていく。

POOR のみ STR から TOF にかけて、上胴および下胴の左回旋方向への角度変化が大きかった (Figure 5-7)。TOF における上胴の左回旋角速度の大きさは、GOOD, TIME, SPEED で同程度であるが、STR から 40% まで変化パターンは、GOOD と TIME, POOR と SPEED に分かれていた (Figure 5-8)。GOOD のみ STR の蹴り脚股関節屈曲角度が大きく、TOF まで伸展角速度が屈曲角速度に移行することはなかった (Figure 5-7, Figure 5-8)。蹴り脚股関節屈曲伸展角速度変化パターンと値ともに、POOR と SPEED で概ね同様であった (Figure 5-8)。それに伴い、下胴から蹴り脚大腿に作用する股関節トルクおよび股関節力によるモーメントの屈曲伸展作用は POOR と SPEED で概ね同様であったが、変化パターンや値の大きさは、GOOD, TIME, POOR と SPEED で 3 パターンに分かれていた (Figure 5-9, Figure 5-10)。GOOD のみ STR の蹴り脚膝関節の伸展角度が小さく (Figure 5-7)、屈曲伸展角速度の変化

パターンも大きく異なっていたが、伸展角速度から屈曲角速度に移行するタイミングは、POOR と SPEED と同様であった (Figure 5-8)。一方で、TIME の伸展角速度から屈曲角速度に移行するタイミングは早く、TOF における値も大きかった (Figure 5-8)。蹴り脚膝関節 20% から蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に作用する膝関節力によるモーメントの変化パターンは、GOOD と TIME、POOR と SPEED の 2 パターンに分かれた (Figure 5-10) が、蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に作用する膝関節トルクの変化パターンは各グループで大きく異なっていた (Figure 5-9)。GOOD のみ STR の軸脚股関節の屈曲角度が大きかった (Figure 5-7)。軸脚股関節屈曲伸角速度、内外転角速度、内外旋角速度および下胴から軸脚大腿に作用する股関節トルクおよび股関節力によるモーメントは全ての方向に対して変化パターンおよび値が、GOOD と TIME、POOR と SPEED の 2 パターンで概ね同様であった (Figure 5-8, Figure 5-9, Figure 5-10)。GOOD と TIME は 25% 付近で軸脚股関節屈曲角速度から伸展角速度に変化したが、POOR と SPEED は、35% 付近で伸展角速度に変化し、GOOD と TIME より変化タイミングが遅かった (Figure 5-8)。それに伴い、股関節トルクの伸展方向への移行タイミングも異なり、POOR と SPEED の方が遅かった (Figure 5-8)。GOOD と TIME は、30% 付近で急激に、軸脚股関節内転角速度が大きくなったが、POOR と SPEED の軸脚股関節内転角速度が大きくなるタイミングは遅かった (Figure 5-8)。GOOD と TIME は 30% 付近で内旋角速度に変化したが、POOR と SPEED は、40% 付近で内旋角速度に変化し、GOOD と TIME より変化タイミングが遅かった (Figure 5-8)。また、GOOD のみ 20% まで軸脚膝関節角速度の変化パターンが異なった (Figure 5-8)。

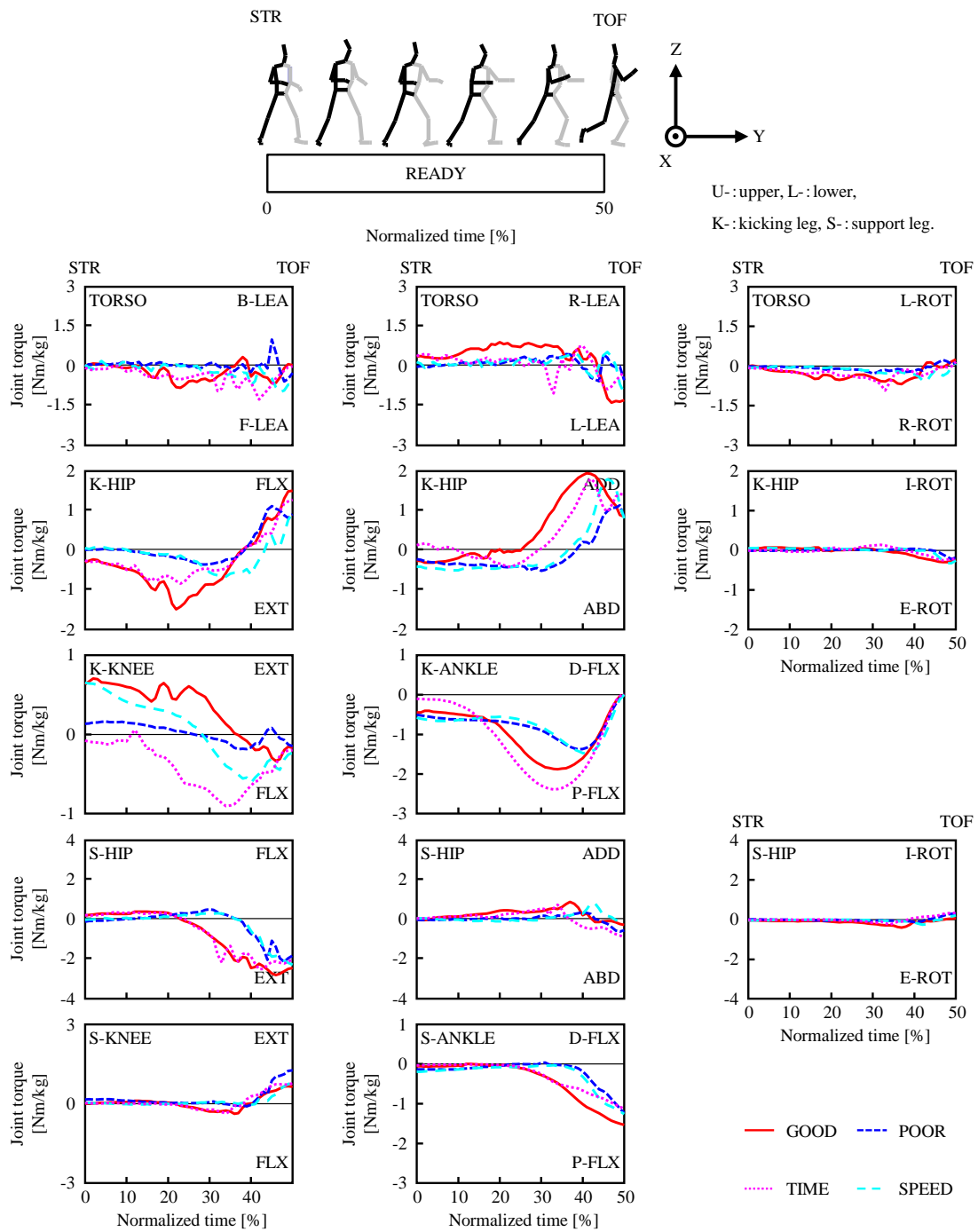


Figure 5-9 Time-series data of joint torque divided into four groups.

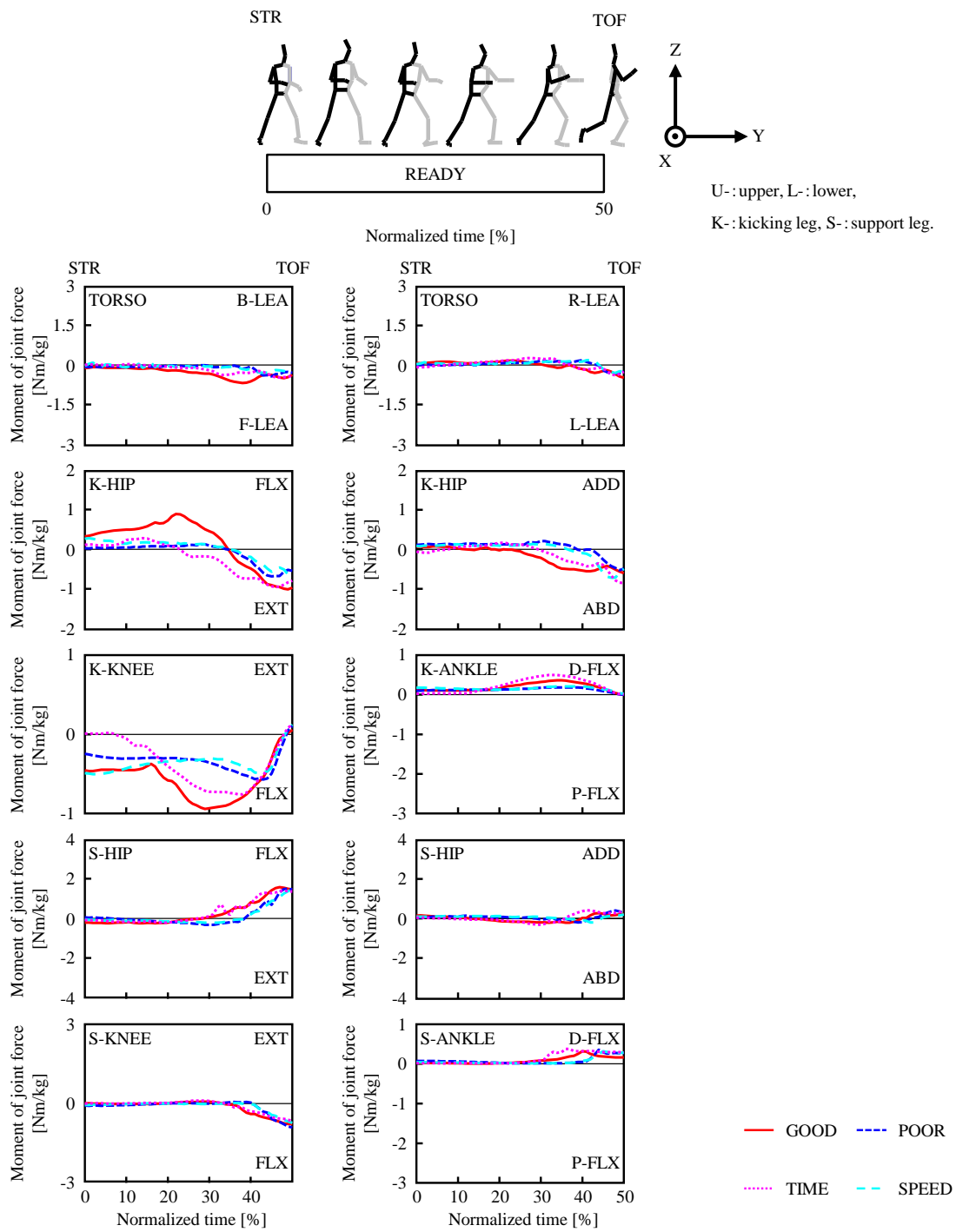


Figure 5-10 Time-series data of moment of joint force divided into four groups.

5.3.3 READY 局面における energetics

Table 5-1 は、READY 局面における各グループの JTP による体幹および下肢関節の力学的エネルギーの生成と吸収、JFP による上胴、下胴、下肢セグメント間の力学的エネルギーの伝達、および STP による上胴、下胴、下肢セグメント間の力学的エネルギーの流入出を示している。Figure 5-11 は、READY 局面における各グループの軸脚および蹴り脚の股関節で生成、吸収される JTP による力学的エネルギーの内訳を関節運動軸（屈曲伸展、内外転、内外旋）ごとに示している。以下に、特徴的なデータについて述べていく。

POOR 以外のグループでは、STP により大きな力学的エネルギーが下胴から上胴へと流入しており、TIME のみ JFP により、体幹関節を介して大きな力学的エネルギーが上胴から下胴へと伝達されていた (Table 5-1)。POOR 以外のグループは JTP により、大きな力学的エネルギーを蹴り脚股関節で生成していたが、GOOD の生成量が最も大きかった (Table 5-1)。また、その内訳としては、GOOD と TIME では蹴り脚股関節屈曲伸展動作による生成が大きく、POOR と SPEED は、蹴り脚股関節屈曲伸展動作による生成量と内外転動作による生成量が同程度であった (Figure 5-11)。TIME のみ JFP により蹴り脚股関節を介して、下胴から蹴り脚大腿に、蹴り脚膝関節を介して蹴り脚大腿から蹴り脚下腿に大きな力学的エネルギーが伝達されていた (Table 5-1)。GOOD と TIME は、JTP により大きな力学的エネルギーを軸脚股関節で生成していた (Table 5-1)。また、その内訳は、軸脚股関節の屈曲伸展動作による生成が大きく、この傾向は全てのグループで共通していた (Figure 5-11)。STP により、軸脚大腿から下胴に、下胴から蹴り脚大腿にそれぞれ力学的エネルギーが流入していた (Table 5-1)。また、JFP により、軸脚股関節を介して、軸脚大腿から下胴に大きな力学的エネルギーが伝達されていた (Table 5-1)。

Table 5-1 Mechanical energy flow during READY divided into four groups.

		(Mean)																
Segment/joint		GOOD			POOR			TIME			SPEED			JTP				
		JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	JTP	STP	JFP	•	○	○	○	
Trunk	Torso		0.44			0.08			0.42			0.43						
	Pelvis		0.21	-0.05		-0.01	0.02		0.17	0.43		0.19	-0.08					
				-0.22			-0.09			-0.25			-0.24					
Kicking leg	Pelvis			0.15			-0.02			0.06			0.12					
	Hip		0.44	0.27		0.14	0.26		0.29	0.72		0.30	0.04					
	Thigh			0.29			0.16			0.22			0.17					
	Thigh			0.21			0.05			0.08			0.10					
	Knee		0.21	-0.13		0.06	-0.01		0.27	0.38		0.21	-0.17					
	Shank			0.00			0.01			0.18			0.11					
	Shank			-0.06			-0.30			-0.48			-0.27					
Ankle		0.70	-0.62		0.40	-0.63		0.09	-0.35		0.53	-0.70						
Foot			0.76			0.70			0.57			0.80						
Support leg	Pelvis			0.32			0.19			0.33			0.21					
	Hip		0.91	-0.52		0.51	-0.24		0.67	-0.32		0.50	-0.16					
	Thigh			0.59			0.31			0.33			0.29					
	Thigh			-0.06			0.07			0.00			-0.02					
	Knee		0.04	0.03		0.04	0.17		0.06	0.16		0.00	0.13					
	Shank			0.11			-0.03			0.05			0.02					
	Shank			-0.20			-0.09			-0.11			-0.12					
Ankle		-0.07	-0.06		-0.09	0.06		-0.13	0.14		-0.09	0.05						
Foot			0.12			0.00			-0.02			0.02						

● Generation
 ● Absorption

⇩ Inflow
 ⇨ Outflow

Unit: [J/kg]

JTP

- <[0.10]
- <[0.30]
- <[0.50]
- <[0.80]
- <[1.20]

STP

- ↘ <[0.10]
- ↘ <[0.40]
- ↘ <[0.80]
- ↘ <[1.20]

JFP

- ⇩ <[0.20]
- ⇩ <[0.60]
- ⇩ <[1.00]
- ⇩ <[1.40]

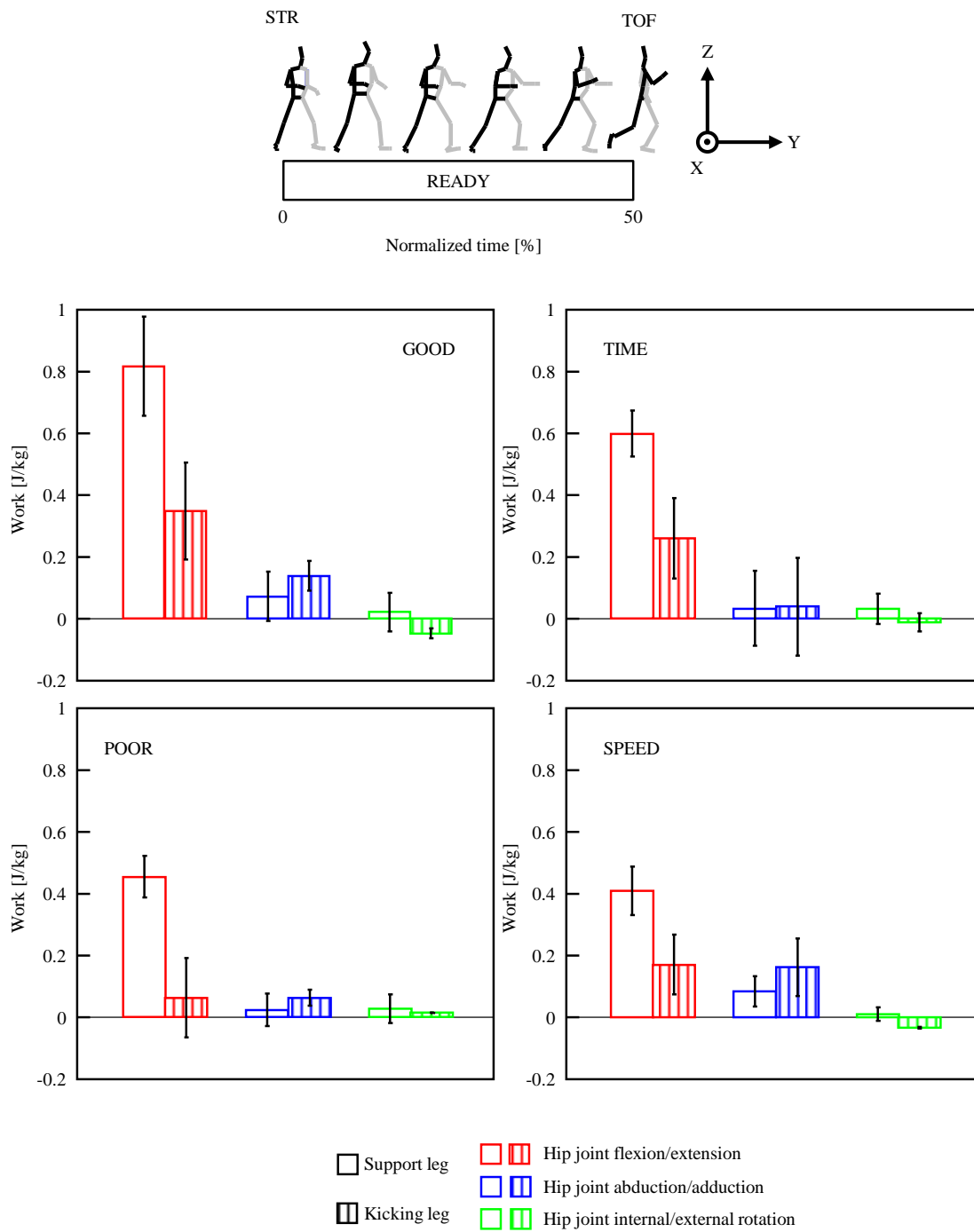


Figure 5-11 Bar graph of mechanical energy generated by both support and kicking legs data divided into four groups during READY phase.

5.4 考察

5.4.1 準スタティックな動作局面における速度的、時間的な「素早さ」の決定要因

本章においても第4章と同様に、READY局面を含む全ての局面の動作時間とIMPの蹴りスピードによって、4つのグループ分けを行った (Figure 4-3 (c)). 第4章4節でも述べた通り、ダイナミックな動作局面中の動作時間とインパクト時の蹴りスピードには、負の相関が認められた (Figure 4-3 (b)) ため、時間的な「素早さ」により影響を及ぼしているのは、ダイナミックな動作局面ではなく、準スタティックな動作局面であるREADY局面である。そこで、グループごとに比較することで、READY局面における時間的な「素早さ」の獲得、また続くLEGUP局面以降に向けて速度的「素早さ」を獲得するための準備動作について明らかにすることができると考えられる。

蹴り脚離地時であるTOFにおいて、軸脚の各関節運動により生成された下胴スピードの蹴りスピードに対する貢献（下胴速度ベクトルを蹴り速度ベクトルに射影した値）とIMPの蹴りスピード、および前回蹴り動作全体の動作時間に有意な相関が認められ (Figure 5-2, Figure 5-3), TOFの下胴スピード（下胴上端中心点位置座標の1階時間微分値）との間にも高い相関が認められた (Figure 5-5 (a)). また、TOFの下胴スピードは、IMPの蹴りスピード、および前回蹴り動作全体の動作時間のみならず、READY局面の動作時間とも有意な相関が認められた (Figure 5-5). これらのことから、下胴のスピードを大きくすることは、速度的、時間的な「素早さ」を高めることにつながると考えられる。

ここで、テコンドーにおける中段の前回蹴り動作を行う際の制約条件として、限られた間合い（試技距離）の中で蹴る必要があることを第4章4節で述べたが、限られた間合いにおいて、下胴のスピードを生成するためには、後述する軸脚の連鎖的なパターンが必要になる。ここで、時間的な「素早さ」を有するGOODとTIMEを比較すると、GOODは、蹴り方向のTOFの蹴り速度が持つ単位ベクトル方向成分が大きく、TIMEは上方向に大きかった (Figure 5-6). また、energetics的観点から、蹴り脚股関節、膝関節におけるJFPの力

学的エネルギーの伝達方法に違いがみられた (Table 5-1). これらのことは, GOOD に比べ, TIME は, STR から TOF にかけて蹴り脚股関節の屈曲動作と蹴り脚膝関節の屈曲動作を組み合わせるによって蹴り脚の離地を行っている (Figure 5-12) ため, 蹴り速度方向成分のうち蹴り方向成分が小さく, 上向きが大きかったことを示している. したがって, 時間的な「素早さ」を獲得するためには, STR 後にできるだけ早く蹴り脚を離地させることであり, その方法は 1 通りではないが, GOOD のみが速度的「素早さ」を有していることを考慮すると, 蹴り脚を離地させる方法がその後の蹴りスピードの獲得に大きく関係すると考えられる.

GOOD と TIME で蹴り脚の動かし方に違いがみられる一方, 軸脚股関節に関して, GOOD と TIME の STR における軸脚股関節屈曲伸展角度が異なっている (Figure 5-7) もの, READY 局面中の軸脚股関節屈曲伸角速度, 内外転角速度, 内外旋角速度および下胴から軸脚大腿に作用する股関節トルクおよび股関節力によるモーメントの変化パターンおよび値は, 全ての方向に対して, GOOD と TIME, POOR と SPEED の 2 パターンで概ね同様であった (Figure5-8, Figure5-9, Figure5-10). 下胴の運動方向は, 軸脚股関節の運動に依存する. したがって, GOOD と TIME では, POOR と SPEED に比べて, 軸脚股関節内旋角速度から外旋角速度に切り替わるタイミングが早かったため, 軸脚股関節伸展動作, 内転動作を行った際に蹴り出し方向に大きな下胴スピードを早いタイミングで生成することができたと考えられる. すなわち, 軸脚股関節外旋動作により, 軸脚股関節伸展動作および内転動作がより効果的に, 蹴り方向の下胴スピードを生成に作用するような軸脚股関節の連鎖的な動きが, GOOD と TIME にはみられた.

また, 下胴に直接影響を与える両脚股関節での力学的エネルギーの生成が大きかったことは, 股関節まわりには大きな筋群があるため, トルクを発揮しやすいことが挙げられる. 股関節の運動の中でも特に屈曲伸展動作での力学的エネルギーの生成が大きかった (Figure 5-11) ことは, 屈曲伸展筋群には大腿四頭筋や大臀筋など, 内外転, 内外旋動作に関わる筋

群に比べて大きな筋群があるためである。したがって、上述したように軸脚股関節外旋動作を用いて、軸脚股関節伸展動作がより効果的に下胴スピードを生成しやすい姿勢を作る (Figure 5-8) ことは、有効である。また、下胴に力学的エネルギーを保持するためには、股関節での生成だけではなく、生成した力学的エネルギーを下胴へと流入、伝達する必要がある。JFPにより軸脚股関節を介して軸脚大腿から下胴へと大きな力学的エネルギーが伝達されていた (Table 5-1)。これは、軸脚股関節の伸展動作に伴い軸脚大腿が前方に回転し起き上がることで、下胴を蹴り出し方向へ引っ張るために生じる軸脚股関節速度と軸脚股関節力に起因する (Figure 5-13)。したがって、力学的エネルギーの観点からも下胴のスピードを生成することの重要性が明らかとなった。

(a) Way to use support leg mainly at TOF.

(b) Way to use kicking leg mainly at TOF.

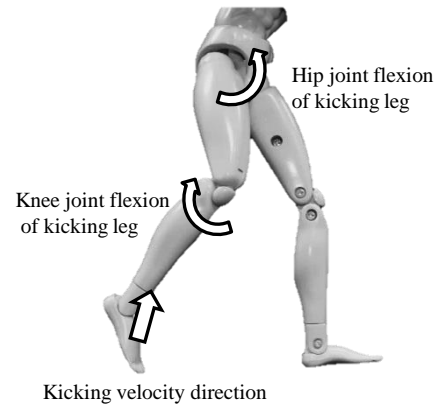
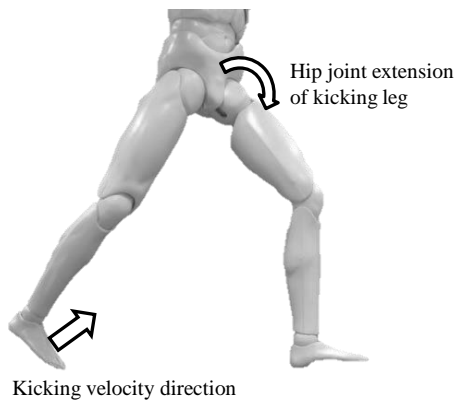


Figure 5-12 Pattern diagram of how to raises kicking leg by both legs.

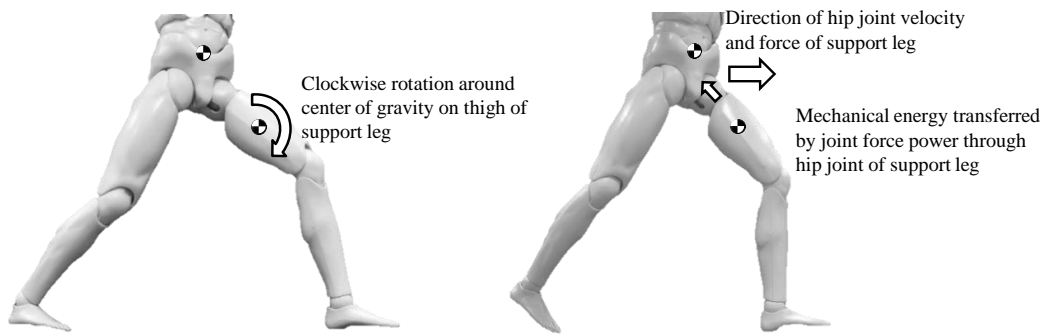


Figure 5-13 Pattern diagram of how to transfer the mechanical energy from thigh of support leg to pelvis by joint force power.

5.5 要約

本章の目的は、準スタティックな動作局面である **READY** 局面に着目して前回し蹴り動作における「素早さ」のうち、測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の獲得メカニズムを **kinematics**, **kinetics**, **energetics** 的観点から明らかにすることであった。

本章の結果から、以下のことが明らかになった。

- (1) 準スタティックな動作局面における速度的、時間的な「素早さ」の獲得
 - ① **TOF** において大きな下胴スピードを生成する必要があった。
 - ② **TOF** における下胴スピードを生成するために、軸脚股関節伸展動作により大きな力学的エネルギーを生成する必要があった。
 - ③ 軸脚股関節伸展動作により生成された大きな力学的エネルギーを有効に利用するために、軸脚股関節外転動作および外旋動作を巧みに用いる必要があった。

以上のことから、準スタティックな動作局面中におけるテコンドーの前回し蹴り動作の基本メカニズムを明らかにし、前回し蹴り動作の「素早さ」のうち、測定し易い絶対的パラメータとしての蹴りスピードおよび動作時間を総合的に評価し、前回し蹴り動作における速度的、時間的な「素早さ」の獲得メカニズムを **kinematics**, **kinetics**, **energetics** 的観点から明らかにすることができた。

6. 前回し蹴り動作の開始タイミングの相違による動作変化

6.1 目的

第 5 章では、前回し蹴り動作の準スタティックな動作局面である READY 局面で、軸脚股関節の伸展動作を効率良く用いることで、速度的、時間的に「素早い」前回し蹴り動作が達成できることを明らかにした。これまでの先行研究で対象とされている実験試技は、被験者の任意のタイミングにより動作を始めた前回し蹴り動作であることが多く、第 4 章、第 5 章の試技も同様に、被験者が任意のタイミングで動作を始めた前回し蹴り動作が実験試技であった。しかし、テコンドーは対人種目であるため、相手選手の体勢によっても、蹴り動作開始のタイミングを変化させ、対応する必要がある。また、テコンドー選手は、相手選手と対峙した状況下で、主に、上下へのステップ動作を行った後、蹴り動作へと移行する (Figure 6-1)。Kim and Kim (2014) は、LED ライトの発光を動作開始の合図とした試技の研究を行っている。そして、蹴り出し前のステップ動作の有無や蹴り出し前のステップ動作からの蹴り出しタイミングの違いにより、インパクト時の蹴りスピードと LED ライト発光からインパクトまでの時間がどのように変化するかを検討しているが、動作の変化については報告していない。

そこで、本章の目的は、前回し蹴り動作の開始タイミングの相違と前回し蹴り動作の変化について、kinematics 的観点から検討することである。

6.2 方法

本章の被験者、実験環境および試技、データ収集、データ処理は第 3 章において述べた実験 2 の通りである。また、被験者固有のステップ動作の測定周波数は、第 3 章において述べた測定 1 の通りである。分析基礎パラメータについても同様に、第 3 章において述べ

た。本章では、前回し蹴り動作の開始タイミングの相違（条件 1, 2, 3）と前回し蹴り動作の変化について、kinematics 的観点から検討するために、後述するように被験者固有の上下ステップ動作の周波数や LED ライトによる光提示タイミングを算出した。

6.2.1 局面定義

第 4 章および第 5 章の局面定義と同様に、「蹴り動作開始」(Start to kick, 以下, STR), 「蹴り脚離地」(Toe rises off the floor, 以下, TOF), 「蹴り脚膝関節最大屈曲」(Maximum knee flexion, 以下, MKF), 「インパクト」(Impact, 以下, IMP) のイベントを設定し READY 局面, LEGUP 局面, STRIKE 局面を定義した (Figure 6-1)。また STEP 局面は STR 以前の重心高の変化 2 周期分とした (Figure 6-2)。なお, STEP 局面について, 時間の規格化は行っていない。また, STEP 局面のうち, 光提示瞬間を「LED ライトによる光提示」(Emission of light, 以下, EML) とした (Figure 6-3)。

6.2.2 被験者固有のステップ動作周波数

被験者が蹴りやすいタイミングで任意に動作を行う条件 1 においては, STR 前の 1 周期 (重心速度の鉛直方向成分のゼロからゼロまで) を抽出した。被験者の身体重心が上方向に速度を持っている時 (UP 局面) もしくは被験者の身体重心が下方向に速度を持っている時 (DOWN 局面) に光が提示される条件 2, 3 においては, EML 前の 1 周期を抽出し, 被験者固有のステップ動作の周波数を算出した (Figure 6-3)。

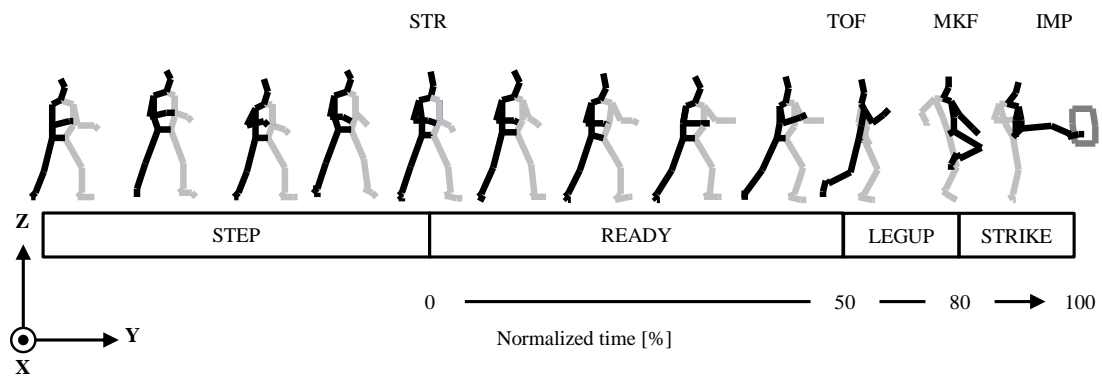
6.2.3 光提示タイミング

Kim and Kim (2014) と同様に, ステップ動作の 1 周期を 0-100 % とし, 光提示タイミングを算出した (Figure 6-4)。STR 前に UP 局面が出現する場合は, 0-50% が DOWN 局面, 50-100 % が UP 局面, STR 前に DOWN 局面が出現する場合は, 0-50% が UP 局面, 50-100 %

が DOWN 局面である。なお、光提示タイミングは、験者が被験者のステップ動作を目視で判断して操作したため、被験者間の統一性が完全とはいえない。

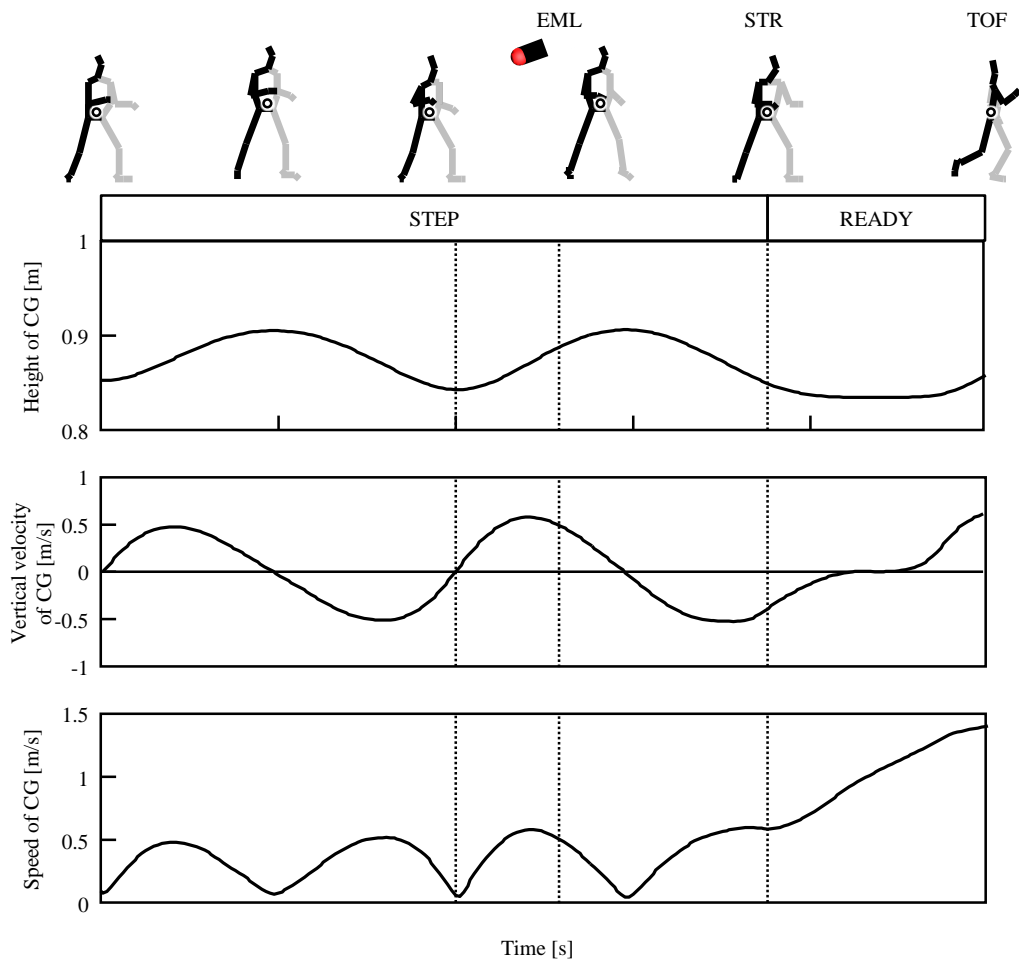
6.2.4 統計処理

各条件に対して、一元配置の分散分析を行い、有意差が認められた場合 ($p < 0.05$) には、Scheffe の方法を用いて多重比較を行った。



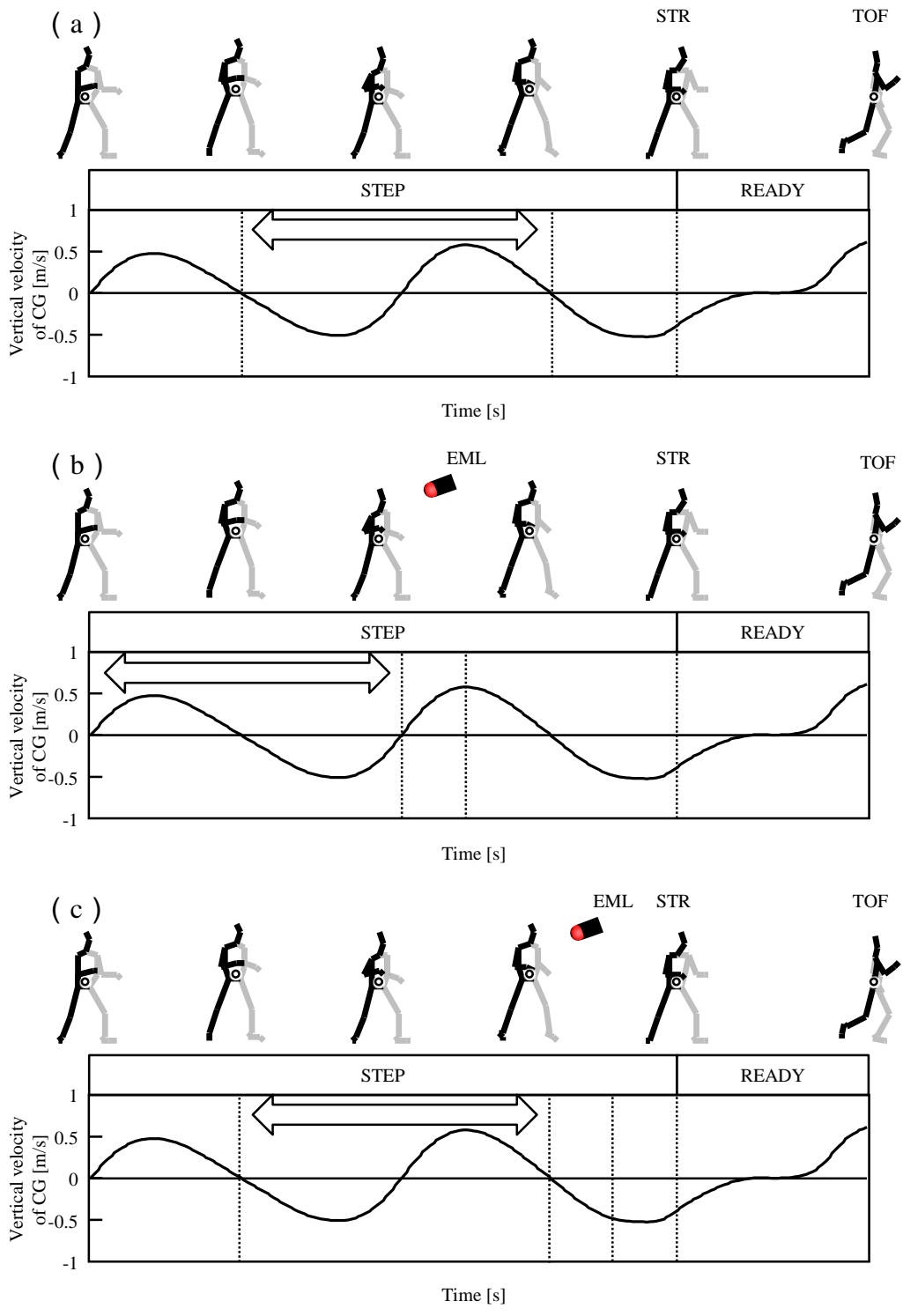
STR : Start to kick, TOF : Toe rises off the floor, MKF : Maximum knee flexion, IMP : Impact to target.

Figure 6-1 Stick pictures of roundhouse kick.



EML: Emission of light, STR: Start to kick, TOF: Toe rises off the floor.

Figure 6-2 Definition of STEP phase and event of EML.



(a): condition 1, (b): condition 2 (UP), (c): condition 3 (DOWN).

Figure 6-3 Definition of step frequencies.

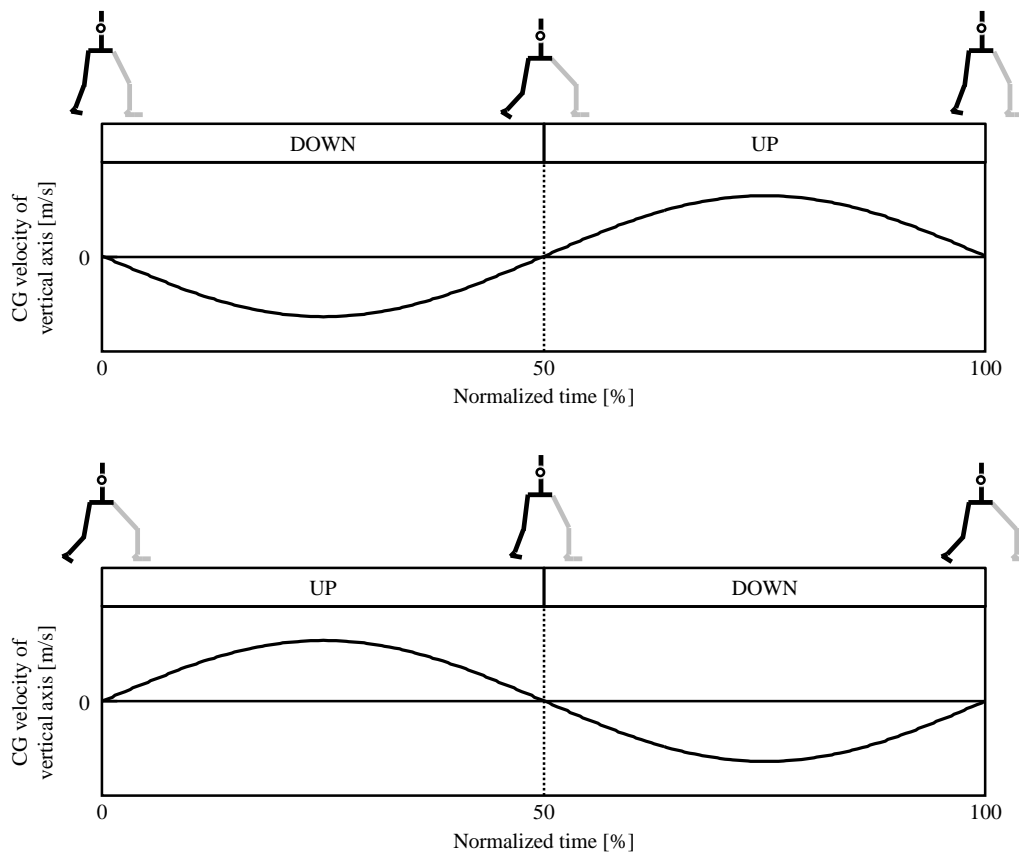


Figure 6-4 Normalized LED timing.

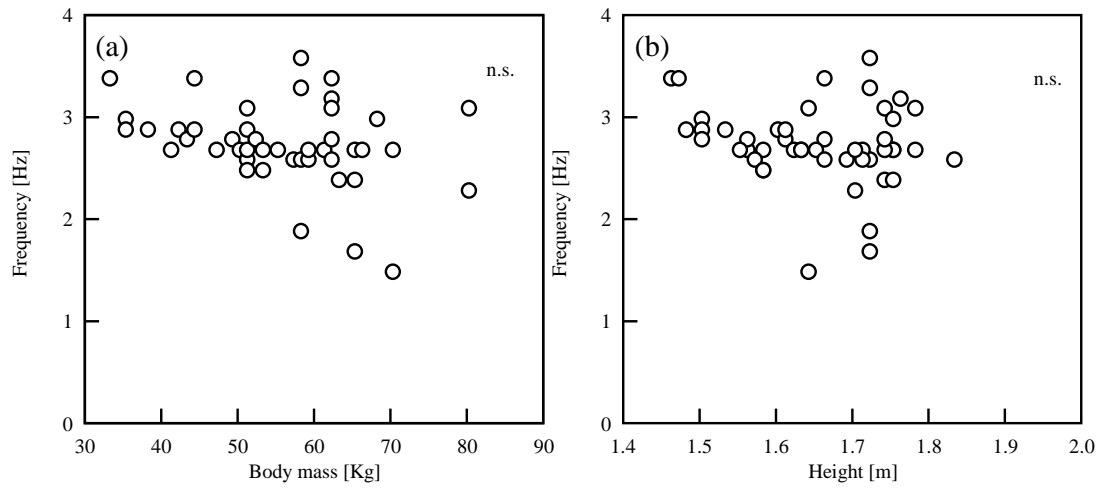
6.3 結果

6.3.1 被験者固有のステップ動作測定周波数

Figure 6-5 は、測定 1 で測定した被験者固有のステップ動作周波数と身体質量および身長について示している。ステップ動作周波数の平均は、 2.8 ± 0.4 Hz であり、概ね 2.5 Hz から 3.0 Hz の間に周波数が集中していた。また、ステップ動作周波数と身体質量および身長の間には有意な相関は認められなかった。

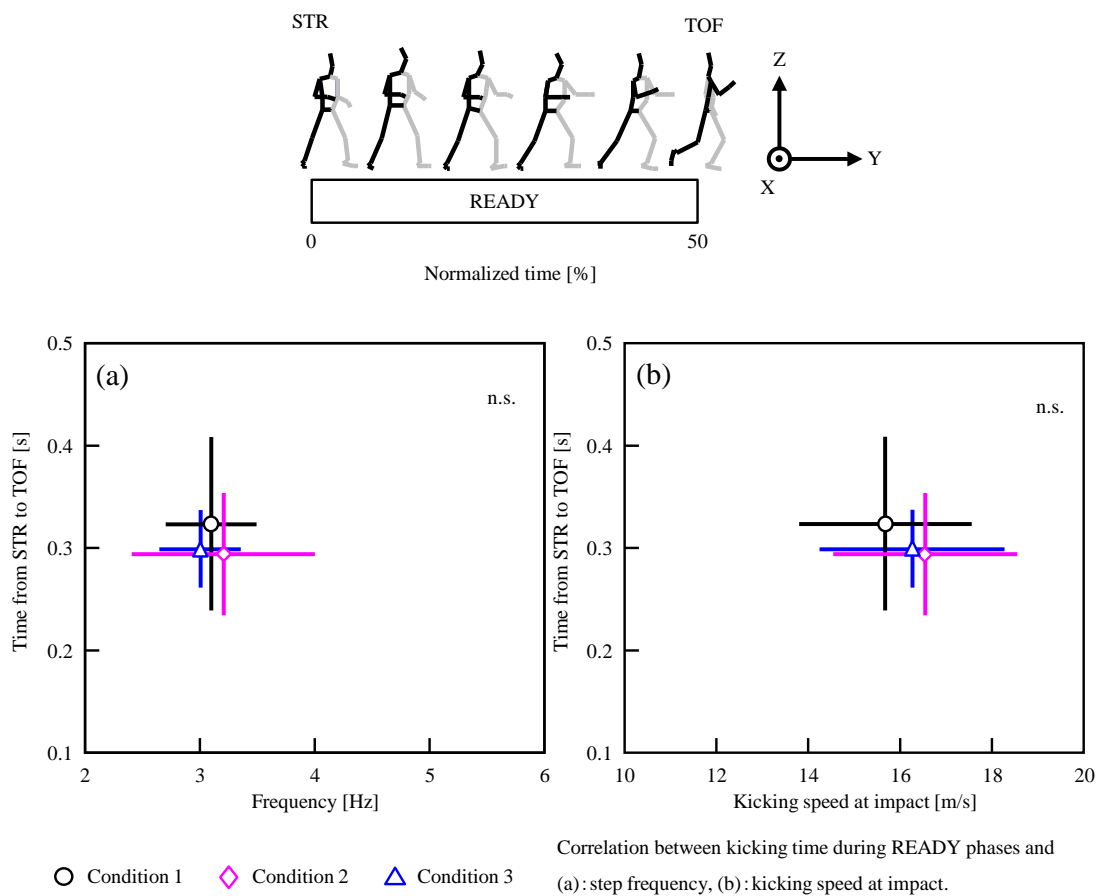
6.3.2 動作時間、蹴りスピードおよびステップ動作の周波数

Figure 6-6 は、条件 1, 2 および 3 におけるステップ動作の周波数と STR から TOF までの動作時間および条件 1, 2 および 3 における IMP の蹴りスピードと STR から TOF までの動作時間を示している。ステップ動作の周波数、動作時間ともに、条件間で有意な差は認められなかった。全ての条件でのステップ動作の周波数の平均は 3.1 ± 0.5 Hz であった。蹴りスピード、動作時間ともに、条件間で有意な差は認められなかった。全ての条件での蹴りスピードの平均は 14.93 ± 1.56 m/s、動作時間の平均は 0.305 ± 0.063 s であった。Figure 6-7 は、条件 2 および 3 におけるステップ動作の周波数と EML から STR までの動作時間、条件 2 および 3 における IMP の蹴りスピードと EML から STR までの動作時間、条件 2 および 3 における STR から TOF までの動作時間と EML から STR までの動作時間を示している。ステップ動作の周波数、動作時間ともに、条件間で有意な差は認められなかった。蹴りスピード、動作時間ともに、条件間で有意な差は認められなかった。また、それぞれの局面における動作時間にも条件間で有意な差は認められなかった。



Plots between step frequency and (a): body mass, (b): height.

Figure 6-5 Scatter plot of step frequency, body mass, and height.



Correlation between kicking time during READY phases and (a): step frequency, (b): kicking speed at impact.

Figure 6-6 Scatter plot of kicking time during READY phase, step frequency, and kicking speed at impact according to three conditions.

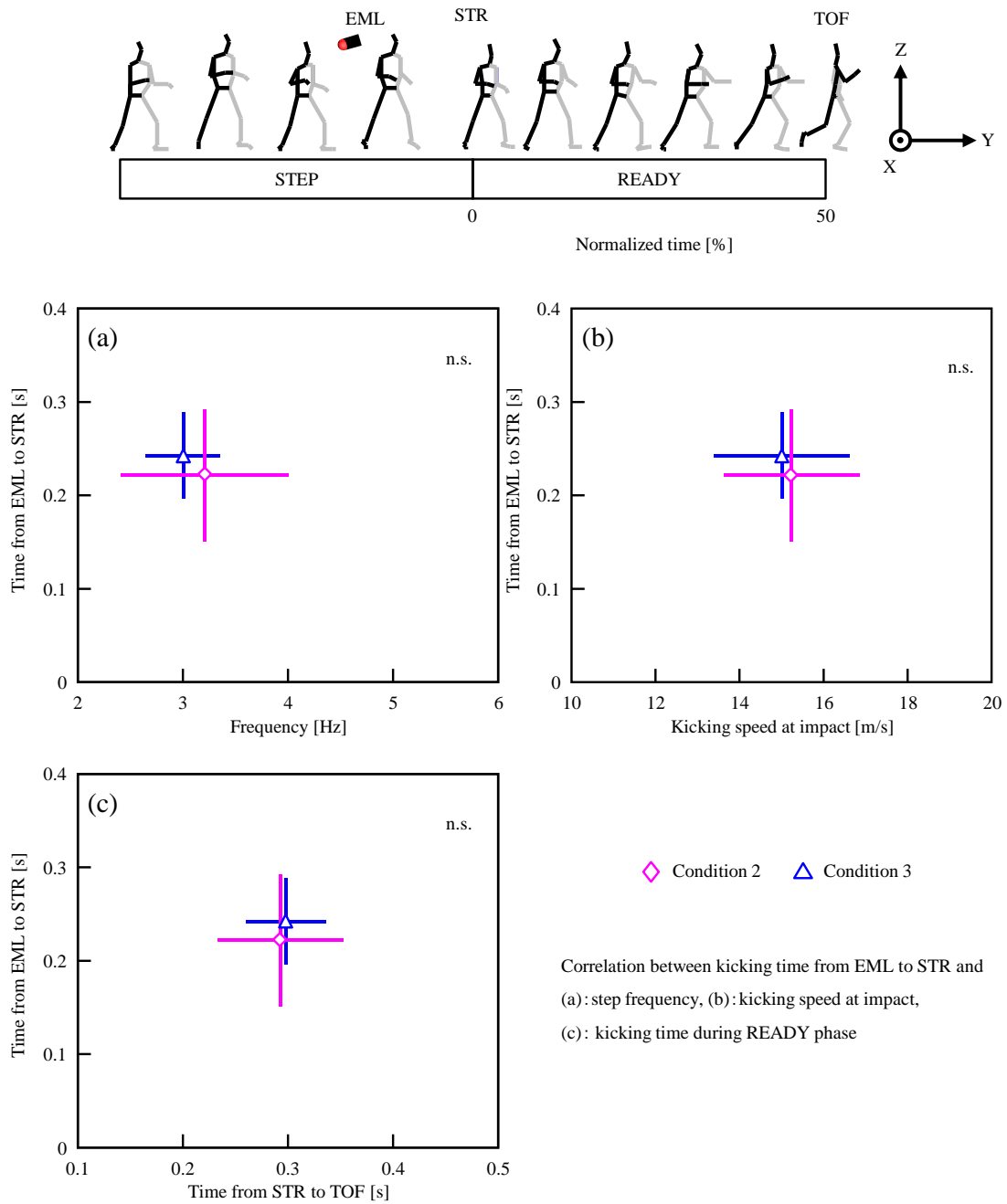


Figure 6-7 Scatter plot of kicking time from EML to STR, step frequency, kicking speed at impact, and time during READY phase according to two conditions.

6.3.3 蹴り動作開始時の身体重心速度と加速度

Figure 6-8 は、条件 1, 2 および 3 における STR の鉛直上下 (Z 軸) 方向の身体重心速度と身体重心加速度を示している。条件 1 の任意タイミングでの試技で STR の身体重心加速度が負の値を示した被験者は、12 名中 10 名であった。STR の身体重心加速度が負の値を示した被験者の条件 1 における身体重心速度は、概ねゼロであった。また、条件 2 (UP 局面), 3 (DOWN 局面) の身体重心加速度がともに、条件 1 と同様に負の値であった被験者は 5 名であった (以下, グループ A)。グループ A の条件 2, 3 の身体重心速度も条件 1 と同様に概ねゼロであった。一方、条件 1, 3 (DOWN 局面) とは異なり、条件 2 (UP 局面) の身体重心加速度が正の値であった被験者は 5 名であった (以下, グループ B)。グループ A と同様に条件 2, 3 の身体重心速度も概ねゼロである被験者は多かったが、異なる被験者もいた。以下, グループ A および B について結果を述べる。

6.3.4 光提示タイミングと蹴り動作開始時の身体重心加速度

Figure 6-9 は、グループ A および B の光提示タイミングと STR の身体重心加速度を示している。条件 3 である DOWN 局面での光提示タイミングは、グループにかかわらず被験者間で様々であった。また、条件 3 における STR の身体重心加速度も同様にグループにかかわらず被験者間で様々であった。条件 3 では、光提示タイミングと STR の身体重心加速度には、有意な相関が認められなかった。また、条件 2 である UP 局面での光提示タイミングも条件 3 同様、グループにかかわらず被験者間で様々であった。しかし、グループ A では、50-75 %以内に光提示タイミングがあったのに対し、グループ B では、75 %以降に光提示タイミングがあった被験者もいた。また、条件 3 における STR の身体重心加速度もグループにかかわらず被験者間で様々であった。条件 3 でも、光提示タイミングと STR の身体重心加速度には、有意な相関が認められなかった。

6.3.5 光提示タイミングと動作時間

Figure 6-10 は、グループ A および B の光提示タイミングと EML から STR までの動作時間を示している。条件 2 である UP 局面の光提示タイミングと動作時間には、有意な相関が認められなかった。一方で、条件 3 である DOWN 局面の光提示タイミングと動作時間には、有意な相関が認められた。また、条件 2 および条件 3 におけるグループ A のみの光提示タイミングと動作時間には、有意な相関が認められた。一方で、条件 2 におけるグループ B のみの光提示タイミングと動作時間には、有意な相関が認められた。したがって、条件 2 におけるグループ B のみの光提示タイミングと動作時間の関係は、条件 3 の光提示タイミングと動作時間の関係と同様であった。

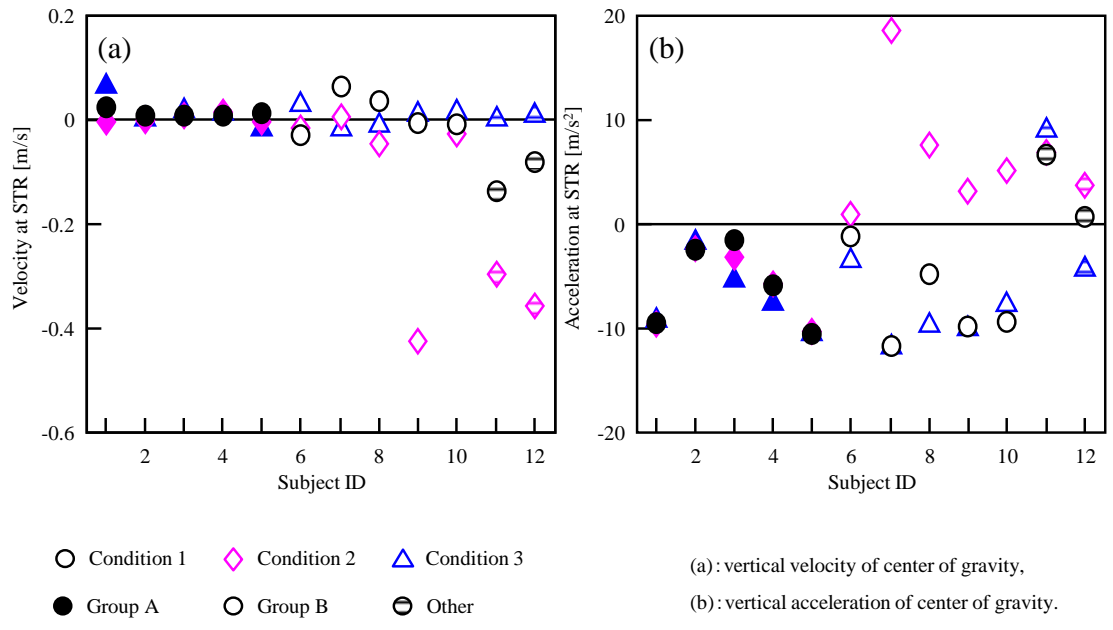
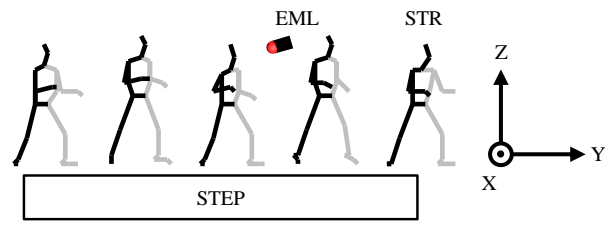


Figure 6-8 Plots of center of gravity velocity and acceleration of vertical axis at STR .

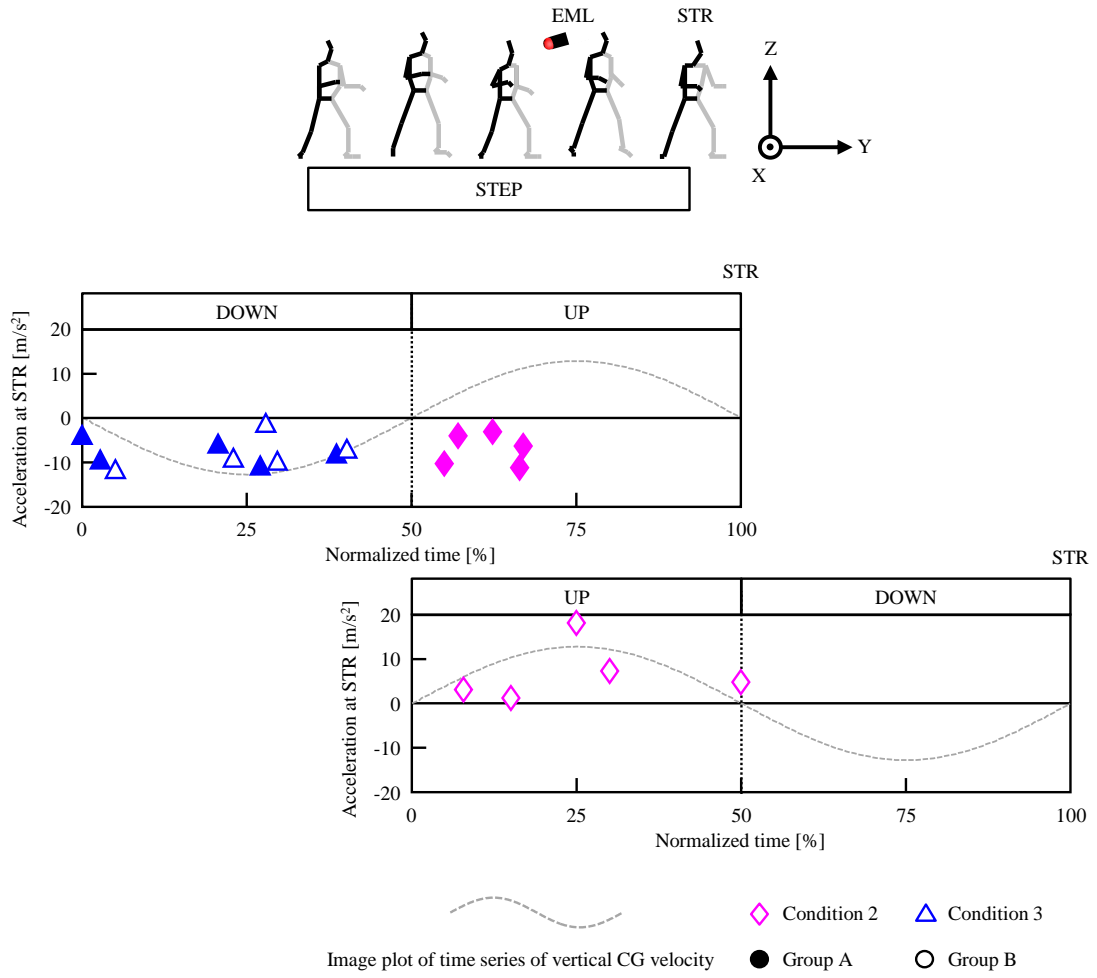


Figure 6-9 Scatter plots of center of gravity acceleration of vertical axis at STR and normalized LED timing in Group A and B.

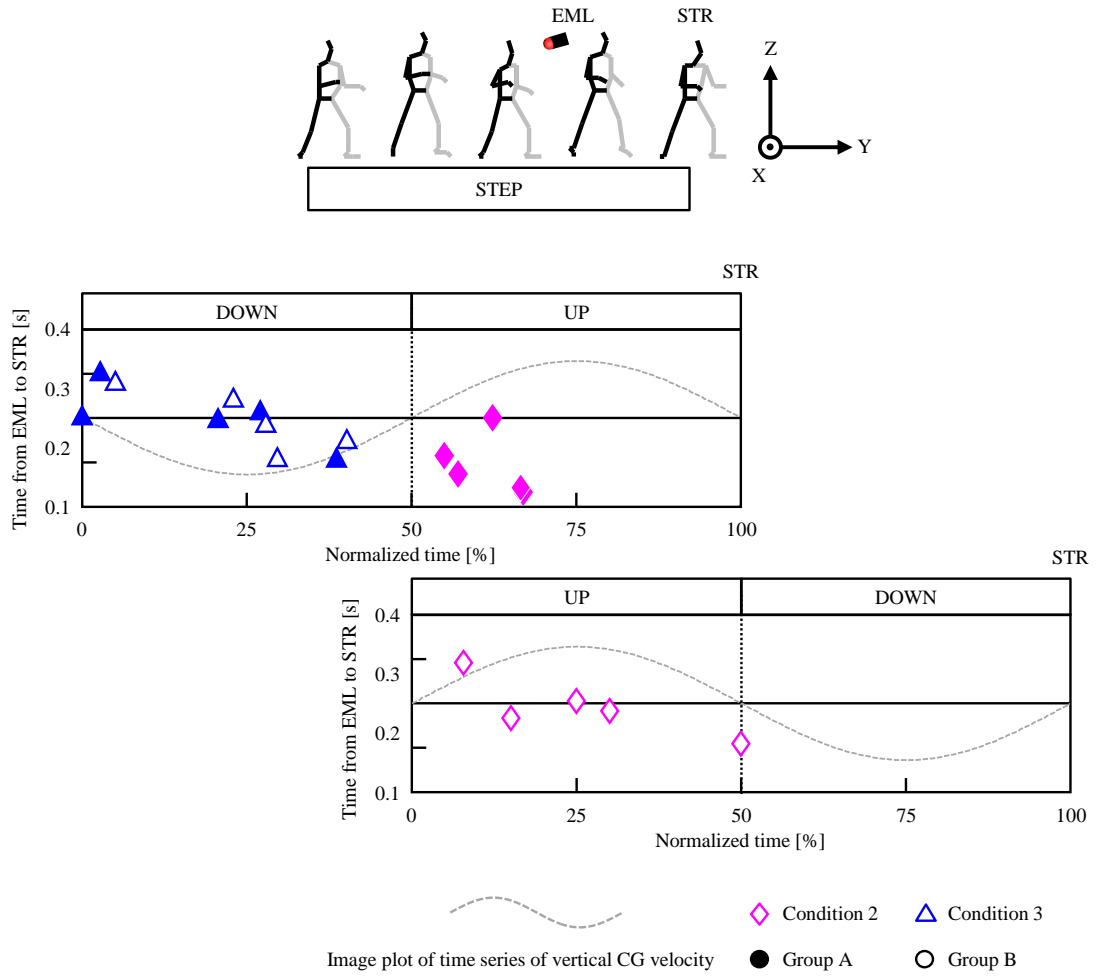


Figure 6-10 Scatter plots of time from EML to STR and normalized LED timing in Group A and B.

6.3.6 蹴り動作開始時の身体重心加速度と kinematics の関係

以下に示すデータは、STR の重心加速度が負であり、任意タイミングで蹴り出したとき（グループ A および B の任意タイミングで蹴り出す条件 1 の平均値）、条件 2 および 3 のうち STR の重心加速度が正であるとき（グループ B のみの条件 2）、条件 2 および 3 のうち STR の重心加速度が負であるとき（グループ A および B の条件 3 とグループ A の条件 2 の平均値）に群分けをした場合の kinematics データである。なお、ここでは、それぞれの群を 1 群、2 群、3 群と呼ぶ。

Figure 6-11 は、各群の上胴と下胴のセグメント角度（左右屈角度、左右回旋角度）、蹴り脚および軸脚の関節角度（股関節：屈曲伸展角度、内外転角度、内外旋角度、膝関節：屈曲伸展角度、足関節：底背屈角度）ならびにその標準偏差のイベントごと（STR、TOF、MKF、IMP）のデータを示している。Figure 6-12 は、各グループの上胴と下胴のセグメント角速度（左右屈角速度、左右回旋角速度）、蹴り脚および軸脚の関節角速度（股関節：屈曲伸展角速度、内外転角速度、内外旋角速度、膝関節：屈曲伸展角速度、足関節：底背屈角速度）の時系列データを示している。

STR における蹴り脚膝関節屈曲伸展角度、軸脚膝関節屈曲伸展角度、軸脚足関節底背屈角度で、STR の重心加速度が負であった群（1 群と 3 群）と正であった群（2 群）の間に有意な差が認められた。有意な差は認められなかったが、STR における軸脚股関節屈曲伸展角度も STR の重心加速度が負であった群（1 群と 3 群）と正であった群（2 群）で平均値が異なる。その他、STR において、蹴り脚足関節底背屈角度で 2 群と 3 群に有意な差が認められた以外に、全てのイベント、群間において有意な差は認められず、概ね同様の値であった。

角速度の変化パターンは、それぞれの群で、概ね同様であったが、READY 局面の前半で、軸脚膝関節の屈曲角速度のパターンは、1 群 3 群と 2 群でパターンが異なっていた。

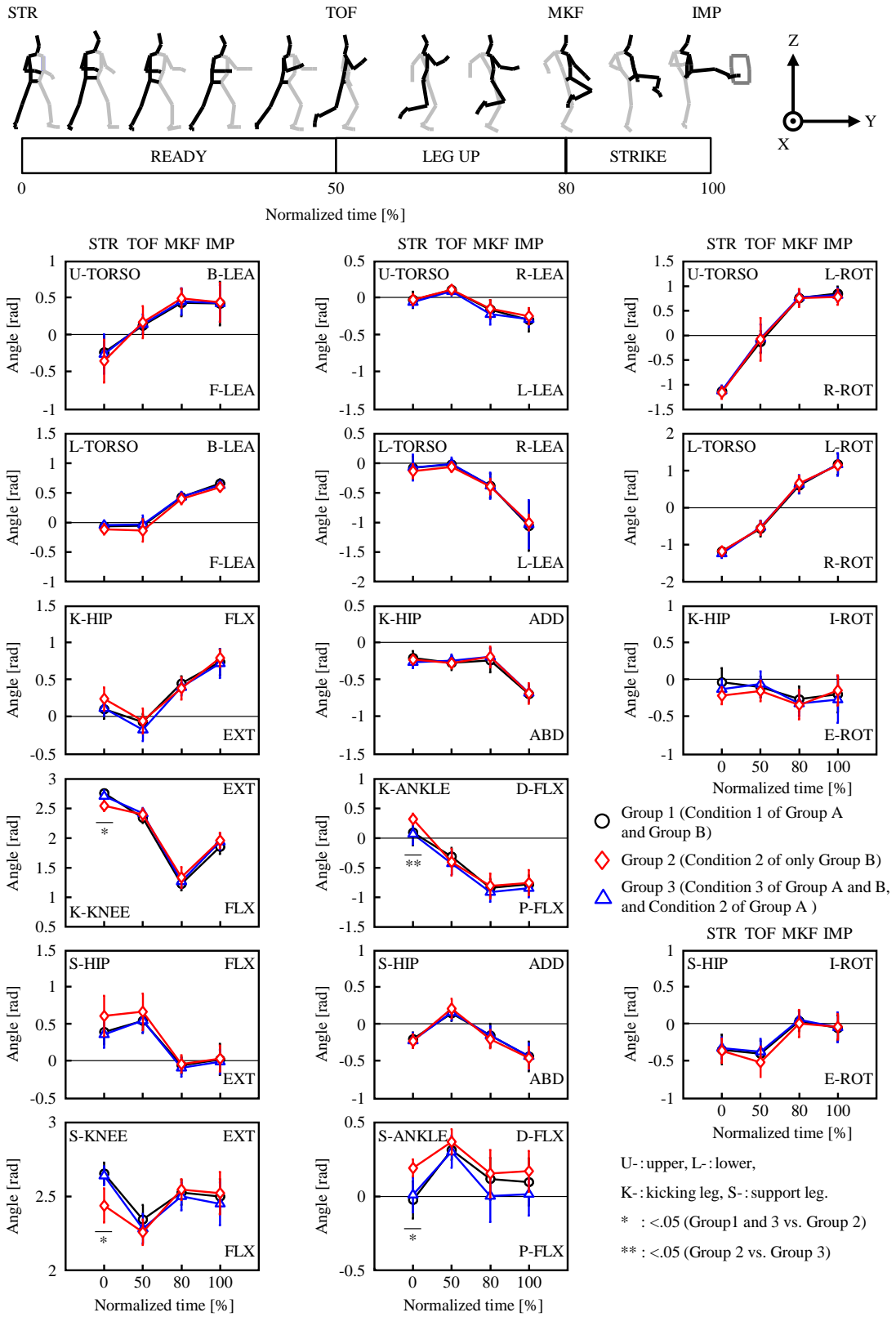


Figure 6-11 Joint angle data at four motion in every groups.

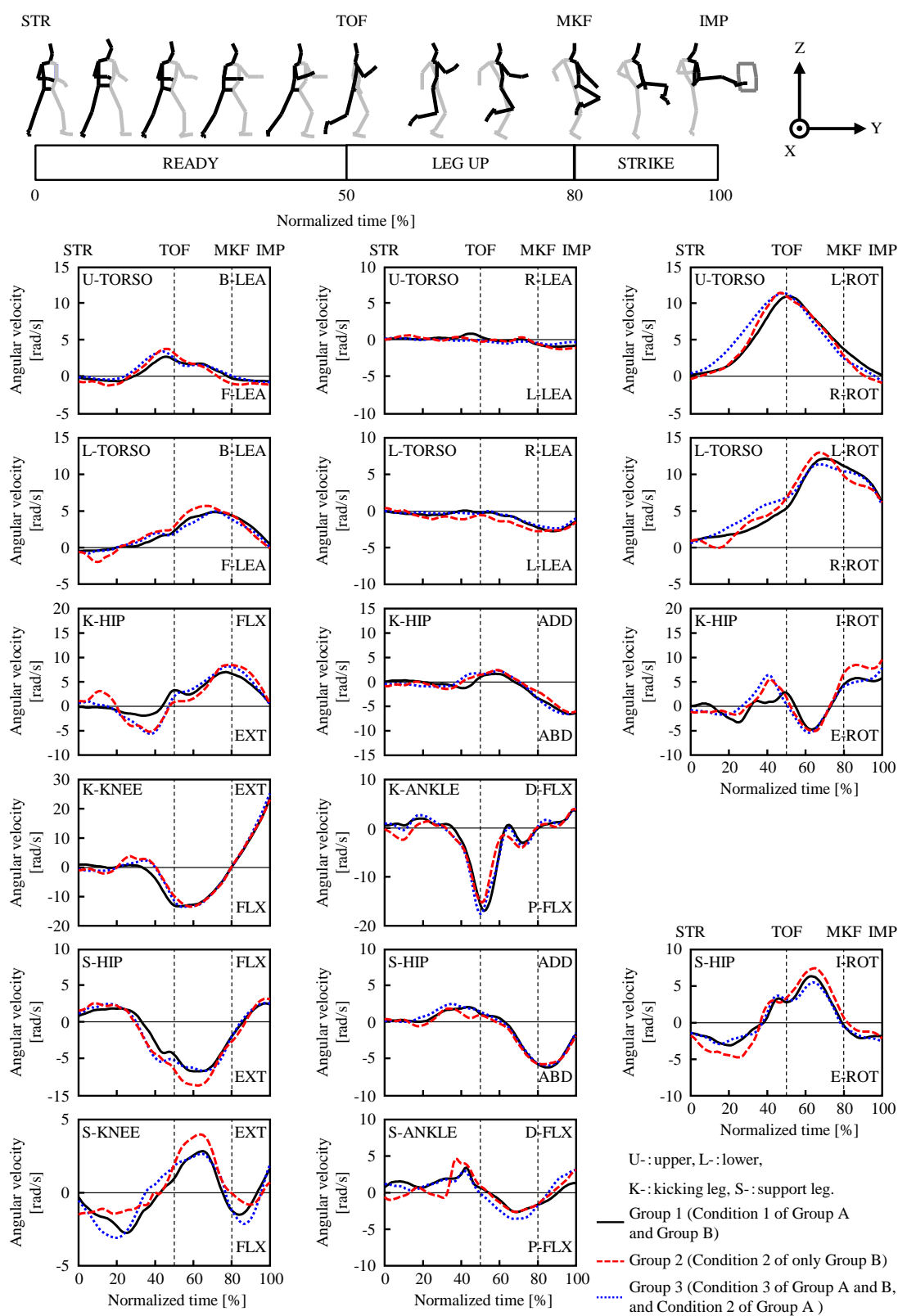


Figure 6-12 Time-series data of joint angular velocity in every groups.

6.4 考察

6.4.1 ステップ動作周波数と前回し蹴り動作の関係

測定した被験者固有のステップ動作周波数と身体質量や身長といった身体特性との間に有意な相関は認められず、概ね 2.5 Hz から 3 Hz の間に周波数が集中していた (Figure 6-5)、また蹴り出しタイミングを制限された実験条件であっても前回し蹴り動作を行う前のステップ動作周波数は、概ね 3.1 Hz であった (Figure 6-6, Figure 6-7)。これらのことから、被験者固有のステップ動作周波数は、身体特性によって決定される可能性が低いことが推察される。したがって、技術練習を行うことで、ステップ動作の周波数は、容易に変更することが可能であると考えられる。また、試合において、選手同士が対峙しステップ動作を行う時間は数秒間であるため、2.5 Hz でステップ動作を行う選手と 3.0 Hz で行う選手の周波数が逆位相になる回数は、3 回程度である。後述するが、ステップ動作は主に、足関節の底背屈動作および膝関節の屈曲伸張動作の組み合わせにより行われている。したがって、ステップ動作中の身体重心位置が鉛直上向きに増加していく局面では、足関節の底屈および、膝関節の伸張動作が出現する。また、前回し蹴りを行うためには、第 5 章で述べたように、軸脚股関節の伸張動作が必要である。そこで、ステップ動作における上下動のズレ（逆位相になるタイミング）を利用すると、相手選手の重心位置が鉛直上向きに増加し、地面反力が小さくなる状態では、前回し蹴りを避けるための方向に十分な地面反力を獲得することができない。一方、蹴り動作を始める選手は、軸脚股関節を伸張するために適した姿勢を取ることができる。相手選手は力学的に避けられないようなタイミングで前回し蹴り動作を行うことで相手選手に前回し蹴りを当てる可能性がある。

6.4.2 LED 発光タイミングの相違による動作時間、蹴りスピードおよび身体重心加速度

Kim and Kim (2014) は、前回し蹴り動作における蹴りスピードは、ステップ動作を用いない場合に比べて、ステップ動作を用いることにより有意に大きくなるが、EML から IMP

までの動作時間は、ステップ動作の有無による違いはなかったことを明らかにした。また、ステップ動作中の UP 局面、DOWN 局面のどちらに LED ライトが発光しても蹴りスピードおよび動作時間は変化しなかったと述べている。本実験でも、EML から STR までの動作時間、STR から TOF までの動作時間、蹴りスピードには、条件間で有意差は認められなかった (Figure 6-6, Figure 6-7)。しかし、任意のタイミングで蹴りを行う条件 1 および DOWN 局面において LED が発光する条件 3 において STR の身体重心加速度が負であった被験者 10 名のうち 5 名 (グループ B) は、UP 局面において LED が発光する条件 2 においてのみ STR の身体重心加速度が正であり、STR における姿勢を変化させ、前回蹴り動作を行っていた (Figure 6-8, Figure 6-9)。また、DOWN 局面において LED ライトが発光する条件 3 において、グループ A およびグループ B の EML から STR までの動作時間と LED 発光タイミングの間に有意な相関が認められた (Figure 6-10)。本章では、他の章と同様に、STR の定義を全身の重心の合成速度 (速さ) を重心スピードとし、その重心スピードが急激に上昇する前の極小値としている。また、本結果では、条件 3 において、STR の身体重心加速度が負である被験者 10 名 (グループ A および B) を対象としているため、STR までの身体重心の時系列データパターンは概ね Figure 6-10 上段の破線のようになる。したがって、条件 3 において、LED 発光タイミングが遅くなればなるほど、EML から STR までの動作時間が短くなることは明らかである。また、LED 発光タイミングは、験者が被験者のステップ動作を目視で判断して操作したため、被験者間の統一性が完全とはいえない。したがって、LED 発光タイミングにばらつきはあるが、DOWN 局面の後半になればなるほど、EML から STR までの動作時間が短くなる。一方で、UP 局面において LED ライトが発光する条件 2 において、グループ A およびグループ B の EML から STR までの動作時間と LED 発光タイミングの間に有意な相関が認められなかった (Figure 6-10)。先行研究 (Welford, 1980) において青年の光単純刺激による反応時間は、およそ 0.19 s であったことが報告されている。ここで、1 周期がおおよそ 3.1 Hz (約 0.32 s) であったことを考慮すると、半周期分の DOWN

局面、およびUP局面に要する時間はおよそ0.16sずつである。上述したように、条件3においてはグループAおよびBの被験者全員がDOWN局面の後にUP局面を迎えSTRになるため、光提示タイミングに関わらず、反応するのに半周期(約0.16s)以上の十分な時間がある。また、競技レベルは異なるが、前回し蹴り動作を習得した被験者を対象に実験を行ったため、動作の再現性が高いとすると、任意のタイミングで蹴り動作と概ね同様の動作を行うことができたと予想される。しかし、グループBのように、UP局面の後半に光提示タイミングがあった場合、反応する時間が短く、条件1のような被験者固有の適切なタイミングで蹴り出す対応ができない可能性が大きい。しかし、条件1と同様なタイミングで蹴り出すためには、さらに1周期分の約0.32sを待つ必要がある。しかし、本研究では被験者に「素早い」前回し蹴りを行うことを指示していた。したがって、グループBは条件1の蹴り出しタイミングとは、半周期分異なるタイミングで蹴り出すことにより、多くの動作時間をかけることなく前回し蹴りを行うことができた。また、後述するが、READY局面における対応動作により、任意タイミングと蹴り始めのタイミングが異なっていたとしても蹴りスピードを落とすことなく前回し蹴りを行うことができた推察される。

6.4.3 光提示タイミングの相違による蹴り動作の変容

光提示タイミングの相違により、任意タイミングと蹴り始めのタイミングが異なっていたとしても動作を変更し蹴り出すことにより、多くの動作時間をかけることなく、また蹴りスピードを落とすことなく、前回し蹴り動作を達成できていた。

STR前のステップ動作は主に、膝関節屈曲伸張動作および足関節底背屈動作によって生成されている。したがって、STRで身体重心加速度が負の値を持つとき、主に身体重心は、鉛直下向きに速度を持ち始めるあたりである(Figure 6-4 上段)。一方で、STRで身体重心加速度が正の値を持つとき、主に身体重心は、鉛直上向きに速度を持ち始めるあたりである(Figure 6-4 下段)。したがって、STRで身体重心加速度が正の値を持つときは、STRで

身体重心加速度が負の値を持つときに比べて、STRにおいて、膝関節がより屈曲位、足関節が背屈位の状態であることは明らかである。しかし、本結果から、両脚の膝関節屈曲伸展角度および足関節の底背屈角度以外にその他のセグメント角度および関節角度、全てのイベントで、群間に有意な差はなかった。したがって、READY局面中に両脚でタイミングの変化に対応することができ、その結果、蹴り脚の離地以降の動作を大きく変更することなく、前回し蹴り動作を行うことで、各々の被験者が発揮できる蹴りスピードを最大限に利用することができていたと推察される。

蹴りスピードや、動作時間に関しては、最大のパフォーマンスが発揮されている一方で、READY局面において、軸脚膝関節の動作を急変化させることで、相手選手に違和感を与え、反応されやすい蹴り動作になる可能性があるため、対応動作が「素早い」動作であるかどうかは提言できず、これまで第4章、第5章で述べてきたような速度的、時間的「素早さ」のみならず、「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータを抽出し、分析する必要がある。

6.5 要約

本章の目的は、前回し蹴り動作の開始タイミングの相違と前回し蹴り動作の変化について、kinematics的観点から検討することであった。

本章の結果から、以下のことが明らかになった。

(1) ステップ動作周波数と前回し蹴り動作の関係

- ① 選手の身体特性によってステップ動作周波数が決定されるわけではない。
- ② ステップ動作によって生じる、相手選手と運動のズレを利用すると、相手選手の姿勢が不利な条件で攻撃することができる。

(2) 光提示タイミングの相違による動作時間、蹴りスピードおよび身体重心加速度

- ① 光提示タイミングの相違による動作時間は、条件間で概ね同様であったが、STRの

身体重心加速度が負である場合、DOWN 局面で光提示が行われる条件 3 では光提示タイミングに動作時間は依存する。

② 光提示タイミングの相違による蹴りスピードは、光提示タイミングによらず、条件間で概ね同様であった。

③ 任意タイミングである条件 1 で STR の身体重心加速度が負である場合、UP 局面で光提示が行われる条件 2 では、局面内での光提示タイミングが遅いと、STR の重心加速度を正に変化させて、対応した。

(3) 光提示タイミングの相違による蹴り動作の変容

① STR の重心加速度が正と負で異なるとき、STR において、軸脚膝関節屈曲伸展角度および、軸脚足関節角度に有意な差が認められた。

② READY 局面中に姿勢を変化させることで、TOF にはどの条件であったとしても同じ姿勢を取り前回し蹴りを行うことができるため、同程度の蹴りスピードを獲得していた。

③ READY 局面において、軸脚膝関節の動作を急変化させることで、相手選手に違和感を与え、反応されやすい蹴り動作になる可能性がある。

以上のことから、ステップ動作周波数と前回し蹴り動作の関係を明らかにし、前回し蹴り動作の開始タイミングの相違と前回し蹴り動作の変化について、kinematics 的観点から明らかにすることができた。

7. 前回し蹴り動作の感覚的な「素早さ」の検討

7.1 目的

これまでのテコンドーでは、試合に勝利するためのポイント獲得において威力のある蹴り動作が求められていた。そして、威力のある蹴り動作を行うために、蹴り脚が大きな運動量を持つ、すなわち、インパクト時に大きな蹴りスピードを獲得する必要があった。インパクト時の蹴りスピードを大きくするためには、力学的エネルギー伝達の観点から相手選手に「反応され易い」蹴り動作になる可能性がある（木下と藤井，2015）。しかし、近年のルール変更に伴い、威力のある蹴り動作に比べて、相手選手に当てることのできるような「素早く」「正確な」蹴り動作が重要とされている。したがって、近年は相手選手により「反応され難い」蹴り動作が求められているといえる。

テコンドーの「素早さ」における先行研究では、主に蹴りスピード、試技時間、反応時間といった測定が容易である絶対的パラメータによって評価されている。しかし、テコンドーは対人競技であることを考慮すると、「素早さ」を評価する際には、一見すると測定が不可能である「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータも評価する必要がある。

第5章でも述べた通り、LEGUPとSTRIKE局面を合わせた動作時間（ $\text{mean}=0.223\pm 0.025$ s）に比べて、READY局面の動作時間（ $\text{mean}=0.318\pm 0.079$ s）の方が長い。また、身体の制御の側面から考えると、身体が高速で変位するダイナミックな動作局面に比べて、動きの少ないREADY局面の方が制御しやすい。また、第6章で述べた通り、テコンドー選手は、相手選手と対峙した状況下で、ステップ動作（主に上下へのリズム運動、以下リズム運動）を行った後、蹴り動作へと移行する。テコンドーでは、柔道やレスリングとは異なり、相手選手と組み合った状態から技をかけることは禁止されている。したがって、相手選手の

状態を把握する情報としては、視覚情報がすべてである。また、ヒトの視覚による知覚では、反復されるものには注意を向けやすい。そこで本章では、はやいと対戦相手に錯覚させる要素を、相手選手の反応を遅延させること、すなわち「上下へのステップ動作を有効に用いて相手選手が予想していないタイミングで前回し蹴り動作に移行すること」であり、「蹴り出し前の上下のステップ動作周期の類似性が高いことが、相手選手の反応を遅延させることに繋がる」こととした。そして、本章では、上下のステップ動作を行っているステップ局面に着目し、周波数分析と主観的観点を組み合わせて、「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的「素早さ」の評価法を提案、検討することを目的とした。

7.2 方法

本章の被験者は、第3章において述べた被験者のうち30名であった (Subject No. 1-12, 15-27, 29, 31-34)。データ収集およびデータ処理および分析基礎パラメータについては、第3章において述べた実験1の通りである。本章では、前回し蹴り動作における、ステップ動作の類似性について検討するために、後述する周期の類似性評価量、振幅の類似性評価量、さらにフーリエ級数展開を用いた類似性評価量および動作遷移開始タイミング、動作相違度を算出する。

7.2.1 局面定義

第4章の局面定義と同様に、「蹴り動作開始」(Start to kick, 以下, STR)、「蹴り脚離地」(Toe rises off the floor, 以下, TOF)、「蹴り脚膝関節最大屈曲」(Maximum knee flexion, 以下, MKF)、「インパクト」(Impact, 以下, IMP)のイベントを設定し、READY局面、LEGUP局面、STRIKE局面を定義した (Figure 6-1)。またSTEP局面はSTR以前の重心高の変化2周期分 (STEP1, STEP2) を対象とした。

7.2.2 評価量の算出

(1) 周期の類似性評価量および振幅の類似性評価量

Figure 7-1 に示すように、STEP 局面における、鉛直上下方向の身体重心速度 2 周期のデータを 1 周期ずつに分割し、周期ごとの特徴点（極大値時点、極小値時点、ゼロ時点および終了時点）出現タイミングの時間をそれぞれ算出した。以下の評価式 (7.1) のように特徴点ごとに、より大きな値で他方の値を除した。時点ごとに算出された値をすべて掛け合わせることで無次元化された周期の類似性評価量とした。

$$q = t_{as}/t_{al} \cdot t_{bs}/t_{bl} \cdot t_{cs}/t_{cl} \cdot t_{ds}/t_{dl} \quad (7.1)$$

ここで、 t_n は、周期ごとの特徴点出現タイミングの時間を示す。また、下付き数字の S は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が小さなものを示し、L は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が大きなものを示す。なお、評価量は 0 から 1 の間の値を取り、大きいほど評価が高いとする。

Figure 7-2 に示すように、周期の類似性評価量と同様、STEP 局面における、鉛直上下方向の身体重心速度 2 周期のデータをそれぞれ 1 周期ずつに分割し、周期ごとの極大値と極小値を求めた。以下の評価式 (7.2) より大きな極大値およびより小さな極小値で他方の極大値および極小値を除し算出した各時点における値を掛け合わせることで、無次元化された振幅の類似性評価量とした。

$$q = v_{as}/v_{al} \cdot v_{bs}/v_{bl} \quad (7.2)$$

ここで、 v_n は、周期ごとの極大値と極小値を示す。また、下付き数字の S は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が小さなものを示し、L は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が大きなものを示す。なお、周期の類似性評価量と同様に評価量は 0 から 1 の間の値を取り、大きいほど評価が高いとする。

(2) フーリエ級数展開を用いた類似性評価量

周期の類似性と振幅の類似性評価量と同様に、STEP 局面における、鉛直上下方向の身体重心速度 2 周期のデータをそれぞれ 1 周期ずつに分割し、フーリエ級数展開を用いて、周波数分析を行った。算出された直流成分および余弦成分、正弦成分の係数のうち、10Hz までの係数 (Figure 7-3) を用いて、以下の評価式 (7.2) で評価を行った。

$$q = a_s/a_L + \sum_{n=1}^{10} 1/n(d_{ns} / d_{nL}) \quad (7.3)$$

ここで、 a は、直流成分を示し、 d_n は余弦成分と正弦成分の係数を合成した合成成分係数を示す。また、下付き数字の S は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が小さなものを示し、 L は 2 周期のデータから算出された成分のうち値が大きなものを示す。なお評価量 q は 0 から 3.93 の値を取り、大きいほど評価が高いとする。

(3) フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度

周期の類似性と振幅の類似性評価量と同様に、STEP 局面における、鉛直上下方向の身体重心速度 2 周期のデータをそれぞれ 1 周期ずつに分割し、フーリエ級数展開を用いて、周波数分析を行った。算出された直流成分および余弦成分、正弦成分の係数のうち、10Hz までの係数を用いて、以下の評価式 (7.4) のように周期 1 および周期 2 の差の二乗和 (残差二乗和) を評価値とした (Figure 7-4)。

$$q = (a_1 - a_2)^2 + \sum_{n=1}^{10} (d_{n1} - d_{n2})^2 \quad (7.4)$$

ここで、 a は、直流成分を示し、 d_n は余弦成分と正弦成分の係数を合成した合成成分係数を示す。また、下付き数字の 1, 2 はそれぞれの周期を示す。また、周期 2 の終端条件を変更しながら評価値を求め、評価値が最小になる時点を動作遷移開始タイミングとし、その時点の最小評価値を動作相違度とした (Figure 7-4)。なお動作遷移開始タイミングは、10% から 100% の値を取り、大きいほど評価が高く、動作相違度は 0 よりも大きな値を取り、小さ

いほど評価が高いとする.

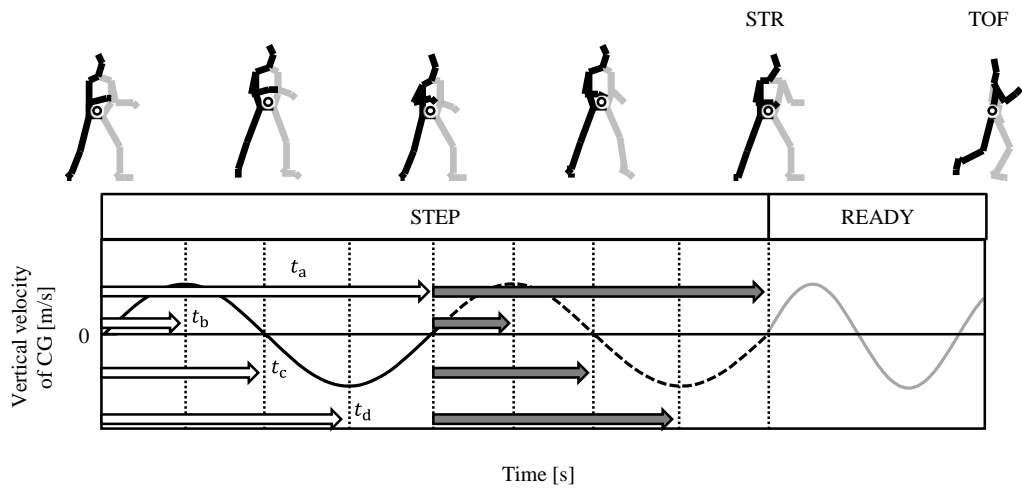


Figure 7-1 Calculation of affinity of period.

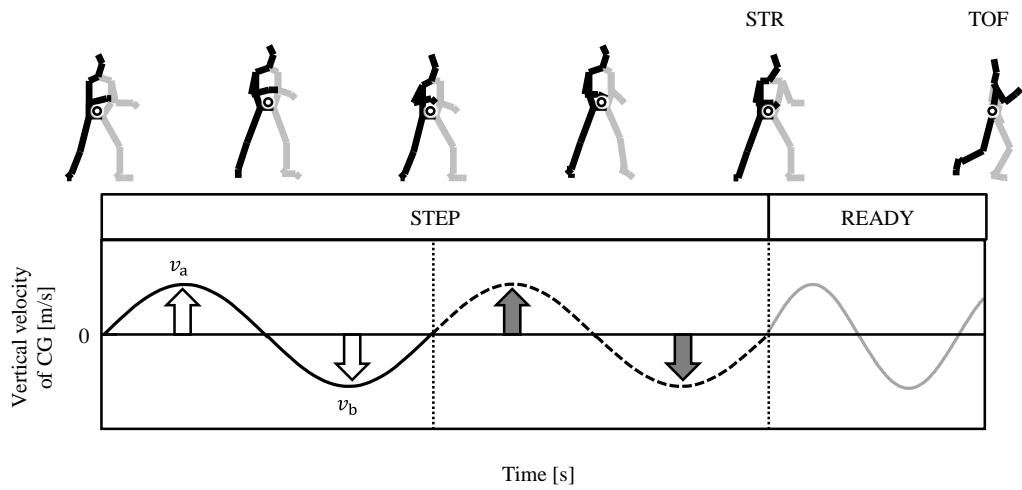


Figure 7-2 Calculation of affinity of amplitude.

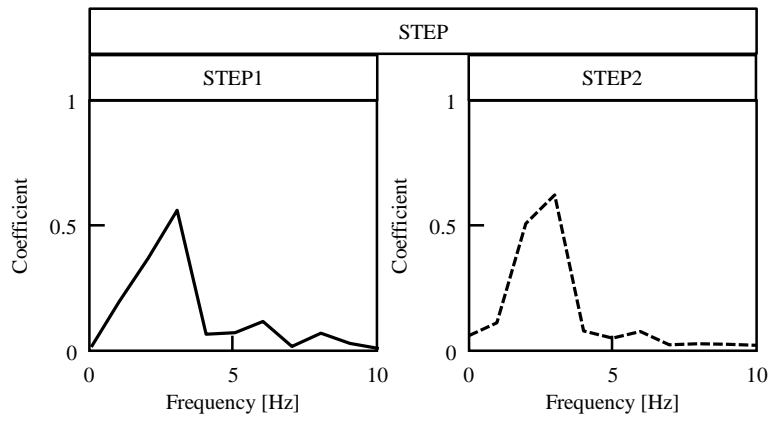
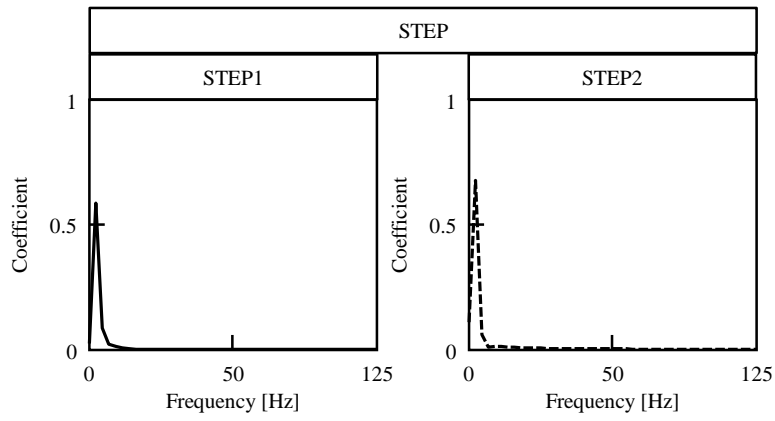
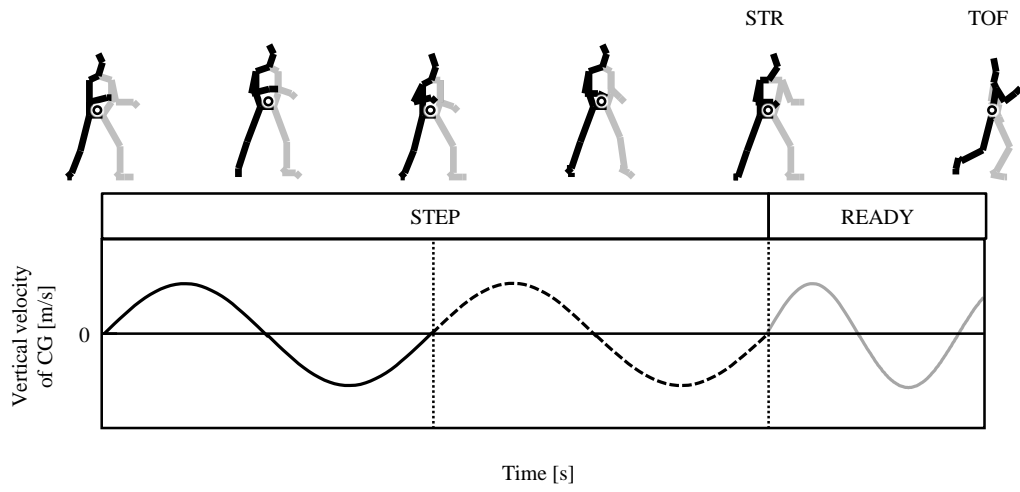


Figure 7-3 Example results of fourier series expansion.

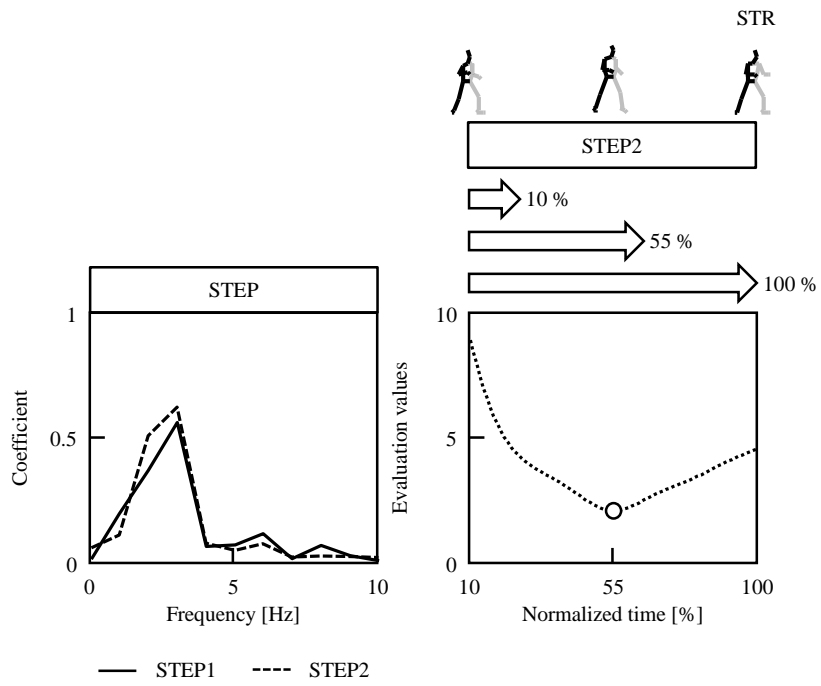


Figure 7-4 Calculation of timing and minimum differences.

7.3 結果

7.3.1 評価量の検討

(1) 周期の類似性評価量および振幅の類似性評価量

Figure 7-5 の (a) - (d) は、被験者 30 名の鉛直上下方向における身体重心速度変化パターン 2 周期の類似性評価量、振幅の類似性評価量、周期の類似性評価量と振幅の類似性評価量の関係、周期の類似性評価量と振幅の類似性評価量の全被験者平均と標準偏差をそれぞれ示している。中実の記号で示した 5 名は、主観的に「素早い」蹴り動作を行っているアンケート調査により評価された被験者を示している（以後の Figure 7-6-Figure 7-8 においても同様である）。各評価量は 0 から 1 以下の値を取り、大きいほど評価が高い。

周期の類似性評価量の全被験者平均は 0.662 であり、ばらつきは大きかった ($SD=0.234$)。また、主観的に「素早い」と評価された被験者 5 名中 3 名の評価値は約 0.8 を超えていた。一方で、他 2 名は平均値よりも評価量が小さかった。振幅の類似性評価量の全被験者平均は 0.643 であり、ばらつきは大きかった ($SD=0.254$)。また、主観的に「素早い」と評価された被験者 5 名全員の評価量は平均値よりも大きかった。周期の類似性評価量と振幅の類似性評価量の間には有意な正の相関関係 ($r=0.672$) が認められた。また、周期の類似性評価量の全被験者平均値と振幅の類似性評価量の全被験者平均値に有意差は認められなかった。

(2) フーリエ級数展開を用いた類似性評価量

Figure 7-6 は、被験者 30 名の鉛直上下方向における身体重心速度変化パターン 2 周期のフーリエ級数展開を用いた類似性評価量を示している。値は 0 から 3.93 の値を取り、大きいほど評価が高い。

類似性評価量の全被験者平均は 2.19 であり、ばらつきは大きかった ($SD=0.527$)。また、主観的に「素早い」と評価された被験者 5 名中 3 名の評価値は平均より大きかった。一方

で、他 2 名は平均値よりも評価量が小さかった。主観的に「素早い」と評価されかつ周期の類似性評価量が平均値より小さかった被験者 (▲) については、フーリエ級数展開を用いた類似性評価量も平均値より小さかった。

(3) フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度

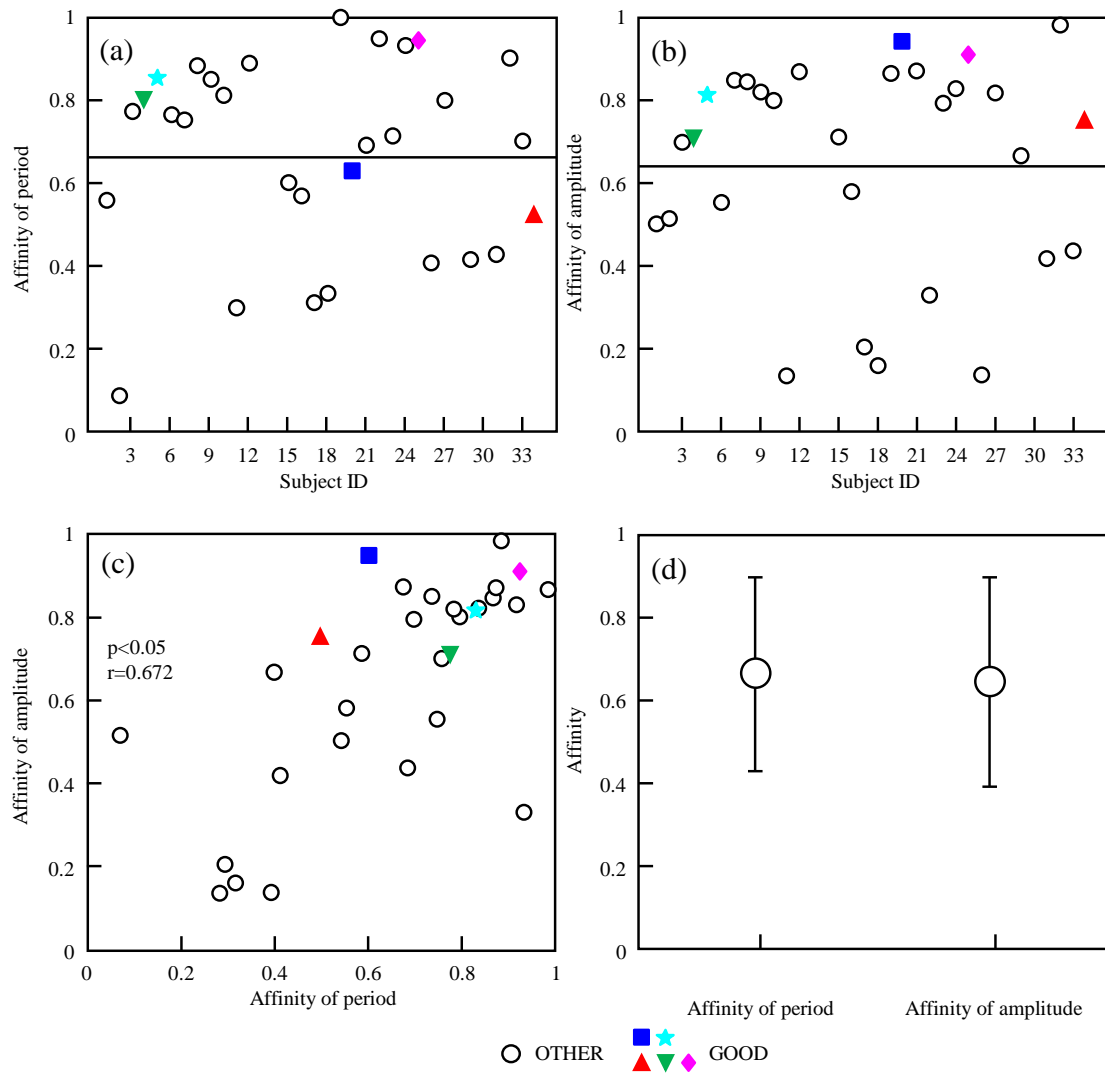
Figure 7-7 の (a) - (c) は、被験者 30 名の鉛直上下方向における身体重心速度変化パターン 2 周期の動作遷移開始タイミング、動作相違度、周期の動作遷移開始タイミングと動作相違度の関係をそれぞれ示している。周期の動作遷移開始タイミングは 0 % から 100 % までの値を取り、タイミングが遅いほど評価が高く、動作相違度は最小で 0 の値を取り、値が小さいほど評価が高い。

動作遷移開始タイミングの全被験者平均は、85.16 % であった。動作遷移開始タイミングが平均値を超えた被験者の動作遷移開始タイミングは、概ね 100 % に近かった。また、主観的に「素早い」と評価された被験者 5 名中 4 名の動作遷移開始タイミングは平均より遅く、概ね 100 % に近かった。また、主観的に「素早い」と評価され、かつ周期の類似性評価量、フーリエ級数展開を用いた類似性評価量が平均値より小さかった被験者 (▲) については、動作遷移開始タイミングも平均値より早かった。動作相違度の全被験者平均は、0.042 であった。また、主観的に「素早い」と評価された被験者 5 名中 4 名の動作相違度は平均値より大きく、低評価であった。動作相違度が平均値よりも小さく、高評価であった被験者は 1 名 (◆) のみであった。主観的に「素早い」と評価され、かつ周期の類似性評価量、フーリエ級数展開を用いた類似性評価量、動作遷移開始タイミングが平均値より早かった被験者 (▲) の動作相違度は平均値より大きく、低評価であった。

7.3.2 評価量間の検討

Figure 7-8 の (a) - (h) は、被験者 30 名の鉛直上下方向における身体重心速度変化パターン 2 周期の類似性評価量とフーリエ級数を用いた類似性評価量、身体重心速度変化パターン 2 周期の類似性評価量と動作遷移開始タイミング、身体重心速度変化パターン 2 周期の類似性評価量と動作相違度、被験者 30 名の鉛直上下方向における身体重心速度変化パターン 2 周期の振幅の類似性評価量とフーリエ級数を用いた類似性評価量、身体重心速度変化パターン 2 周期の振幅の類似性評価量と動作遷移開始タイミング、身体重心速度変化パターン 2 周期の振幅の類似性評価量と動作相違度、フーリエ級数を用いた類似性評価量と動作遷移開始タイミング、フーリエ級数を用いた類似性評価量と動作相違度の関係をそれぞれ示している。

評価量間では、(a) の周期の類似性評価量とフーリエ級数を用いた類似性評価量 ($r=0.644$)、(b) の周期の類似性評価量と動作遷移開始タイミング ($r=0.763$)、(d) の振幅の類似性評価量とフーリエ級数を用いた類似性評価量 ($r=0.680$)、(e) の振幅の類似性評価量と動作遷移開始タイミング ($r=0.545$)、(g) のフーリエ級数を用いた類似性評価量と動作遷移開始タイミング ($r=0.466$)、(h) のフーリエ級数を用いた類似性評価量と動作相違度 ($r=-0.644$) に有意な相関が認められた。



(a): Affinity of period, (b): affinity of amplitude, (c): plots between affinity of period and affinity of amplitude, (d): average of affinities.

Figure 7-5 Plots of affinity of period and amplitude.

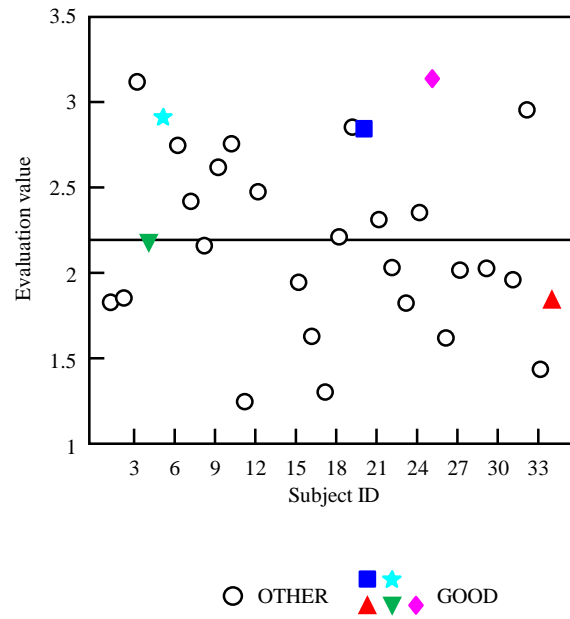


Figure 7-6 Plots of evaluation value based on the result of fourier series expansion.

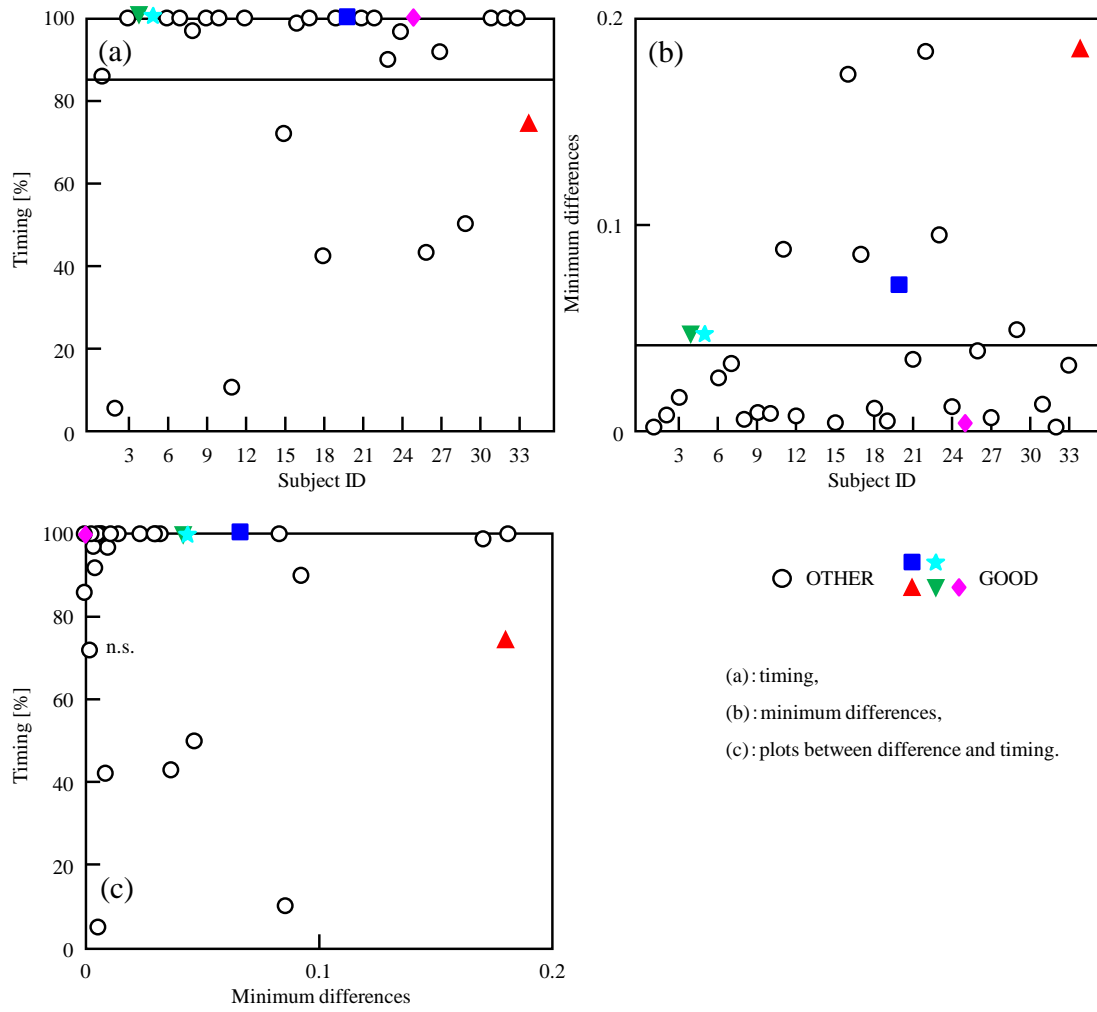
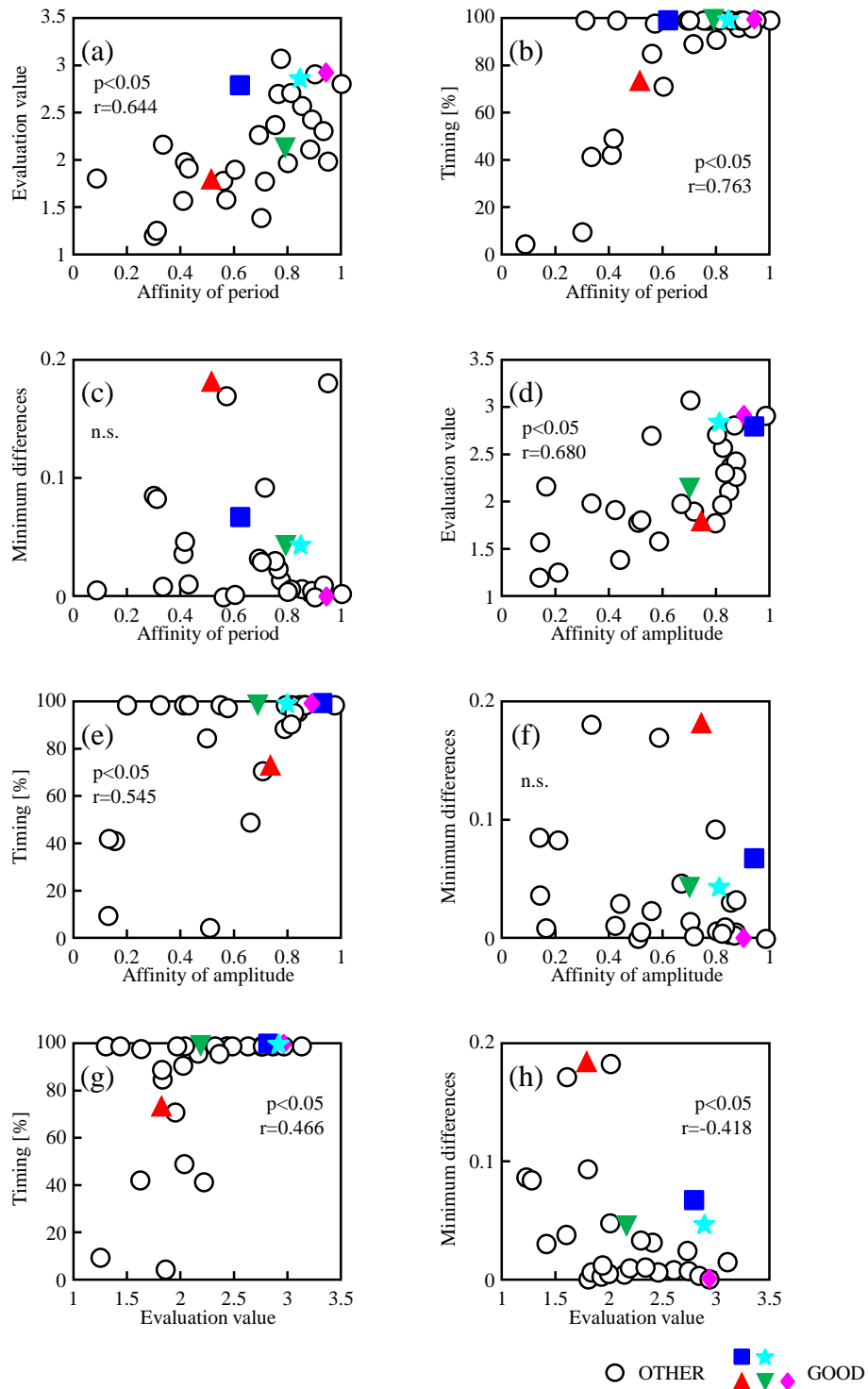


Figure 7-7 Plots of timing and affinity of cg velocity based on the result of fourier series expansion.



Plots between

- (a): affinity of period and evaluation value, (b): affinity of period and timing,
- (c): affinity of period and minimum differences, (d): affinity of amplitude and evaluation value,
- (e): affinity of amplitude and timing, (f): affinity of amplitude and minimum differences,
- (g): evaluation value and timing, (h): evaluation value and minimum differences.

Figure 7-8 Scatter plots of all parameters.

7.4 考察

7.4.1 各評価量の特徴

振幅の類似性評価量に比べ、周期の類似性評価量の方が評価項目（評価量算出に用いるパラメータ）が多いため、評価項目により依存して評価が行われると考えられたが、2つの評価量は、概ね同じ値を示した（Figure 7-5 (d)）。また、周期の類似性と振幅の類似性に正の相関が認められた（Figure 7-5 (c)）ことで、第6章でも述べた通り、連続的な上下のステップ動作を行っている場合、1周期は約0.3 s程度であり、周期もしくは振幅のどちらかだけを急激に変化させて蹴ってはいないことが示された。本研究で提案している上下のステップ動作の周期と振幅の類似性の算出方法では、極大値や極小値、また特徴的なイベントを用いて評価を行うため、単純な上下の重心速度関数の形そのものを評価する場合に有効であると考えられる。したがって、指導者が選手の動きを主観的に判断した場合であっても、評価量の大きさと指導者の評価が一致する可能性がある。

フーリエ級数展開を用いた類似性評価量では、速度関数の周波数分析を行うことが可能となった。余弦成分、正弦成分の係数を合成することで、主に振幅を評価することができるため、振幅の類似性評価量とフーリエ級数を用いた類似性評価量（ $r=0.680$ ）と有意な相関が認められた（Figure 7-8 (d)）。また、高周波成分に比べて低周波成分は、指導者や相手選手が見ても変化がわかりやすいとし、評価の際により大きく重みづけを行った。その結果として、より感覚的な素早さを表現できると考えている。また、周波数分析により、速度関数の形のみを評価するだけでなく、たとえば、どの周波数成分を変化させることにより、選手の動きがより「素早く」感じられるかといった評価方法、フィードバック方法に応用できると考えられる。

フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度では、類似性評価同様に余弦成分、正弦成分の係数を合成することで、主に振幅を評価することができると考えていたが、振幅の類似性評価量と動作相違度との有意な相関が認められなかった

(Figure 7-8 (f)). このことは、動作相違度が 2 周期の全ての時間の評価ではなく、値が最も小さくなったときの評価をしているためであると考えられる。しかし、評価値が最も小さくなるタイミングを算出することで、どのタイミングから、周波数の変化があるかを検討することが可能であった。主観的に「素早い」と評価された被験者ではなくても概ね 100% に近いタイミングで動作遷移開始タイミングが出現していた (Figure 7-7 (a)). フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度の算出方法も上述したように、周波分析により、速度関数の形のみを評価するだけでなく、評価方法、フィードバック方法に応用できると考えられる。

7.4.2 評価量間の検討

フーリエ級数を用いた類似性評価量と周期の類似性評価量や振幅の類似性評価量の間には正の相関関係が認められ (Figure 7-8 (a), Figure 7-8 (d)), 特に振幅の類似性評価量との間に有意な正の相関が認められた。このことは、いずれの評価量でも上下方向の速度関数の類似性を評価できることを示している。一方で、動作相違度と周期の類似性評価量や振幅の類似性評価量の間には有意な相関関係は認められず (Figure 7-8 (c), Figure 7-8 (f)), フーリエ級数を用いた類似性評価量との間の相関も低かった (Figure 7-8 (h)). このことは、動作相違度が、2 周期の全ての時間の評価ではなく、最も値が小さくなったときの評価をしているためである。どの評価式を用いても、主観的な「素早さ」を評価することができるが、それぞれの評価量の特徴を考慮して、評価に用いる必要があることが考えられる。

7.4.3 主観的な「素早さ」と評価量とのマッチング

主観的に「素早い」と評価された被験者のうち 1 名の被験者 (▲) を除く 4 名の被験者は、どの評価量においても概ね平均よりも高い評価であった (Figure 7-5, Figure 7-6, Figure 7-7). すなわち主観的に「素早い」と評価された被験者は概ね、「上下へのステップ動作を

有効に用いて相手選手が予想していないタイミングで前回し蹴り動作に移行すること」のうち、類似したステップ動作を行うことで、蹴り始めを相手選手に計らせないという方略により、「素早い」という印象を与えることができていたと考えられる。そして、これらの評価式を用いて、評価が可能であると考えられる。

主観的に「素早い」と評価された被験者（▲）は、振幅の類似性評価を除き、その他全ての評価量において、平均よりも低い評価であった（Figure 7-5, Figure 7-6, Figure 7-7）ため、被験者（▲）は、本章で仮定した「上下へのステップ動作を有効に用いて相手選手が予想していないタイミングで前回し蹴り動作に移行すること」のうち、ステップ動作を変えることなく、蹴り始めを相手選手に悟らせないという方略ではなく、他の方略を用いて「素早い」という印象を与えていたことが示された。したがって視覚情報は、それぞれの選手の立ち位置や、蹴り脚が床から離れた後の蹴り脚の軌道、また単純な蹴りスピードや蹴り時間にも依存するため、最終的な「素早さ」を評価するためには、これらの項目も含めた評価方法を考案する必要があるだろう。

7.5 要約

本章の目的は、上下のステップ動作を行っているステップ局面に着目し、はやいと対戦相手に錯覚させる要素の評価量を提案することであった。

本章の結果から、以下のことが明らかになった。

(1) 各評価量の特徴

- ① 上下のステップ動作の周期と振幅の類似性評価量は、単純な上下の重心速度関数の形そのものを評価する場合に有効であると考えられる。
- ② フーリエ級数を用いた類似性評価量では、評価の際に重みづけを行うことで、より感覚的な素早さを表現できる。
- ③ フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度の算出方法

では、周波数分析により、速度関数の形のみを評価するだけでなく、評価方法、およびフィードバック方法に応用ができる。

(2) 主観的な「素早さ」と評価量とのマッチング

- ① 本章で考案した評価式を用いて、感覚的な「素早さ」の評価が可能である。
- ② 視覚情報から得られる主観的な「素早さ」は、それぞれの選手の立ち位置や、蹴り脚が床から離れた後の蹴り脚の軌道、また単純な蹴りスピードや蹴り時間にも依存する。

以上のことから、上下のステップ動作を行っているステップ局面に着目し、「蹴りがはやく」と対戦相手に錯覚させる」感覚的「素早さ」を提案できたと考えられる。

8. 速度的, 時間的, 感覺的「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互評価

8.1 目的

第 4, 5, 6 章では, 前回し蹴り動作における速度的, 時間的な「素早さ」の獲得メカニズムの解明として, kinematics, kinetics, energetics 的観点から検討を行ってきた. また第 7 章では, 感覺的な「素早さ」の検討として, 3つの評価式を考案し, 主観的な「素早さ」と併せて検討を行ってきた. 第 1 章でも述べたように, 「素早さ」に含まれる評価指標を個別に評価しても対人競技の「素早さ」を評価できるとは言い難い. したがって, 対人競技であるテコンドーにおける試合に勝つための蹴り動作のパフォーマンスを評価するためには, 複数ある「素早さ」の評価指標を複合的に検討することが不可欠である. そこで, これまで検討を行ってきた速度的, 時間的, 感覺的な「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互評価を行い, どのように関連しているのかについて検討することを目的とする.

8.2 評価量の相互関連

Figure 8-1 の (a) - (g) は, 第 7 章と同様の被験者の IMP の蹴りスピード, READY 局面における動作時間, LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間, READY 局面, LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間, IMP の蹴りスピードと READY 局面における動作時間の関係, IMP の蹴りスピードと LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係, IMP の蹴りスピードと READY 局面, LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している. 中実の記号で示した 5 名は, 主観的に「素早い」蹴り動作を行っているとは評価された被験者を示している (以後の Figure 8-2-Figure 8-8 においても同様である). 主観的に「素早い」と評価された被験者のうち, 1 名の被験者■を除いて, 蹴りスピード (Figure 8-1 (a)) とダイナミックな動作局面の動作時間 (Figure 8-1 (c))

は平均値よりも高い評価であった。また、準スタティックな動作局面の動作時間 (Figure 8-1 (b)) および全体の動作時間 (Figure 8-1 (d)) では、5 名全員が平均値よりも高い評価であった。また蹴りスピードとダイナミックな動作局面の動作時間に有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = -0.723$) が認められた (Figure 8-1 (f))。これらのことは、第 4 章でも述べたように、蹴り脚が床面から離れた後インパクトまでの蹴り脚の道のり距離は概ね被験者間で同様であり、蹴りスピード獲得機序も概ね同様であることが考えられる。

Figure 8-2 の (a) - (d) は、ステップ局面 1 の時間と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。いずれの関係においても有意な相関は認められなかった。

Figure 8-3 の (a) - (d) は、ステップ局面 2 の時間と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。いずれの関係においても有意な相関は認められなかった。

Figure 8-4 の (a) - (d) は、周期の類似性評価量と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。周期の類似性と準スタティックな局面の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.565$) (Figure 8-4 (b)) および全体の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.561$) (Figure 8-4 (d)) との間に有意な負の相関が認められた。

Figure 8-5 の (a) - (d) は、振幅の類似性評価量と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。振幅の類似性と準スタティックな局面の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.539$) (Figure 8-5 (b)) および全体の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.514$) (Figure 8-5 (d)) との間に有意な負の相関が認められた。

Figure 8-6 の (a) - (d) は、フーリエ級数展開を用いた類似性評価量と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。いずれの関係においても有意な相関は認められなかった。

Figure 8-7 の (a) - (d) は、フーリエ級数展開を用いて算出した動作遷移開始タイミングと IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。動作遷移開始タイミングと準スタティックな局面の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.422$) (Figure 8-7 (b)) および全体の動作時間 ($p < 0.05$, $r = -0.441$) (Figure 8-7 (d)) との間に有意な負の相関が認められた。

Figure 8-8 の (a) - (d) は、フーリエ級数展開を用いて算出した動作相違度と IMP の蹴りスピード、READY 局面における動作時間、LEGUP 局面と STRIKE 局面を合わせた動作時間、READY 局面、LEGUP 局面および STRIKE 局面を合わせた動作時間の関係をそれぞれ示している。いずれの関係においても有意な相関は認められなかった。

8.3 「素早さ」の総合評価

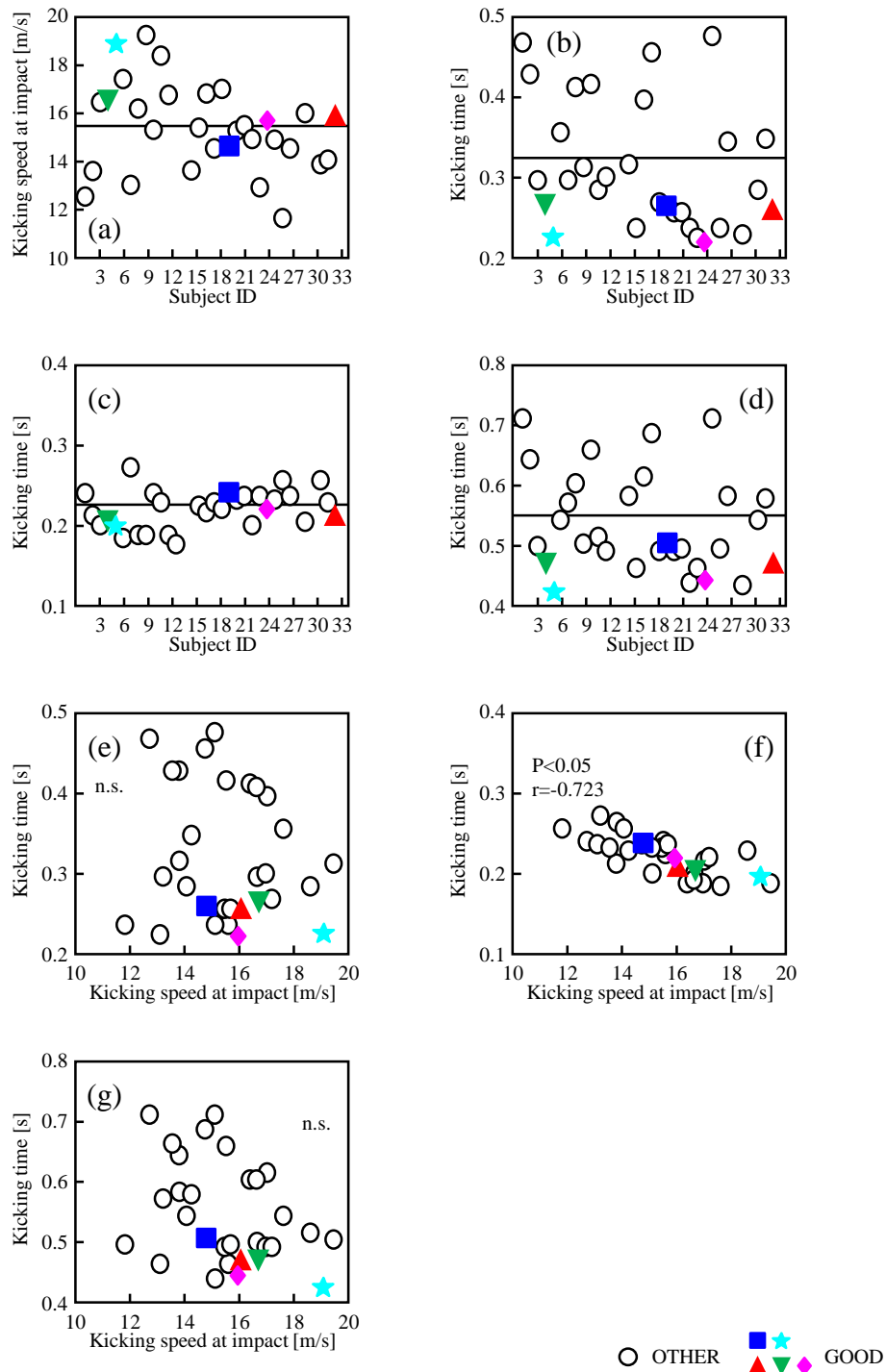
これまでのテコンドーのパフォーマンスを評価する研究の多くは、蹴りスピードが基準となり、蹴りスピードが大きい被験者ほど高い評価を受けていた。しかし、本研究の結果から、主観的に「素早い」と評価された被験者は、IMP の蹴りスピードだけで評価されているのではなく、感覚的な素早さを考慮し評価する必要があると考えられる。また、本研究で提案した手法を用いて感覚的な素早さの評価パラメータまで考慮することにより、IMP の蹴りスピードが小さな被験者であっても、「素早い」と評価することが可能であることが示された。

準スタティックな動作局面の動作時間と周期の類似性評価量、振幅の評価量、蹴り動作

遷移開始タイミングとの間に優位な相関が認められたが、相関係数は小さかった。また、それぞれの周期ごとの時間と蹴りスピードや各局面時間との間には有意な相関関係が認められない。準スタティックな動作局面の時間や IMP の蹴りスピードに関係する、TOF の身体重心速度は、準スタティックな動作局面の身体重心速度を加速させる能力によっても変化する。したがって、鉛直上下方向の身体重心速度の変化パターンの類似性を高める感覚的な「素早さ」の技術と、局面時間の短縮や蹴りスピードの増加といった、時間的、速度的な「素早さ」の技術は切り分けて考えるべきである。

指導現場で用いられる「素早さ」には、「速さ」「早さ」「はやいと感じる」が混在している。たとえば、木下と藤井（2015）が挙げているように、指導現場でよく用いられる「身体を上を持ち上げないように」や「身体を一枚の板のように」は、相手選手に蹴り動作のタイミングを計らせず、はやいという印象を与えるための前回し蹴り動作に対する指導用語であり、蹴りスピードの向上を阻害させる可能性を有している。相手選手に錯覚させる「はやさ」と蹴りスピードの「はやさ」を同一の指導用語で両立させることは難しいだろう。

各々の感覚的な「素早さ」のパラメータの評価が高い被験者には、主観的に素早いと評価されなかった被験者も多く含まれていたが、主観的に素早いと評価されなかった被験者は、評価された被験者に比べ、準スタティックな局面の動作時間が長い傾向にあった。先行研究（Welford, 1980）において、青年の光単純刺激による反応時間は、およそ 0.19 s であったことが報告されている。したがって、たとえ評価が高くとも、準スタティックな動作局面以降に時間がかかることで、相手選手に反応させる余裕を与えることになってしまうため、主観的に素早いと評価されなかったと考えられる。これらのことから、主観的な評価の際には、速度的な速さに比べ、時間的な短さが重視されると推察される。



- (a): Kicking speed at impact, (b): kicking time during READY phase,
(c): kicking time during LEGUP and STRIKE phases, (d): kicking time during all three phases,
plots between
(e): kicking speed at impact and kicking time during READY phase, (f): kicking speed at impact
and kicking time during LEGUP and STRIKE phases,
(g): kicking speed at impact and kicking time during all three phases.

Figure 8-1 Plots of kicking speed and kicking time parameters.

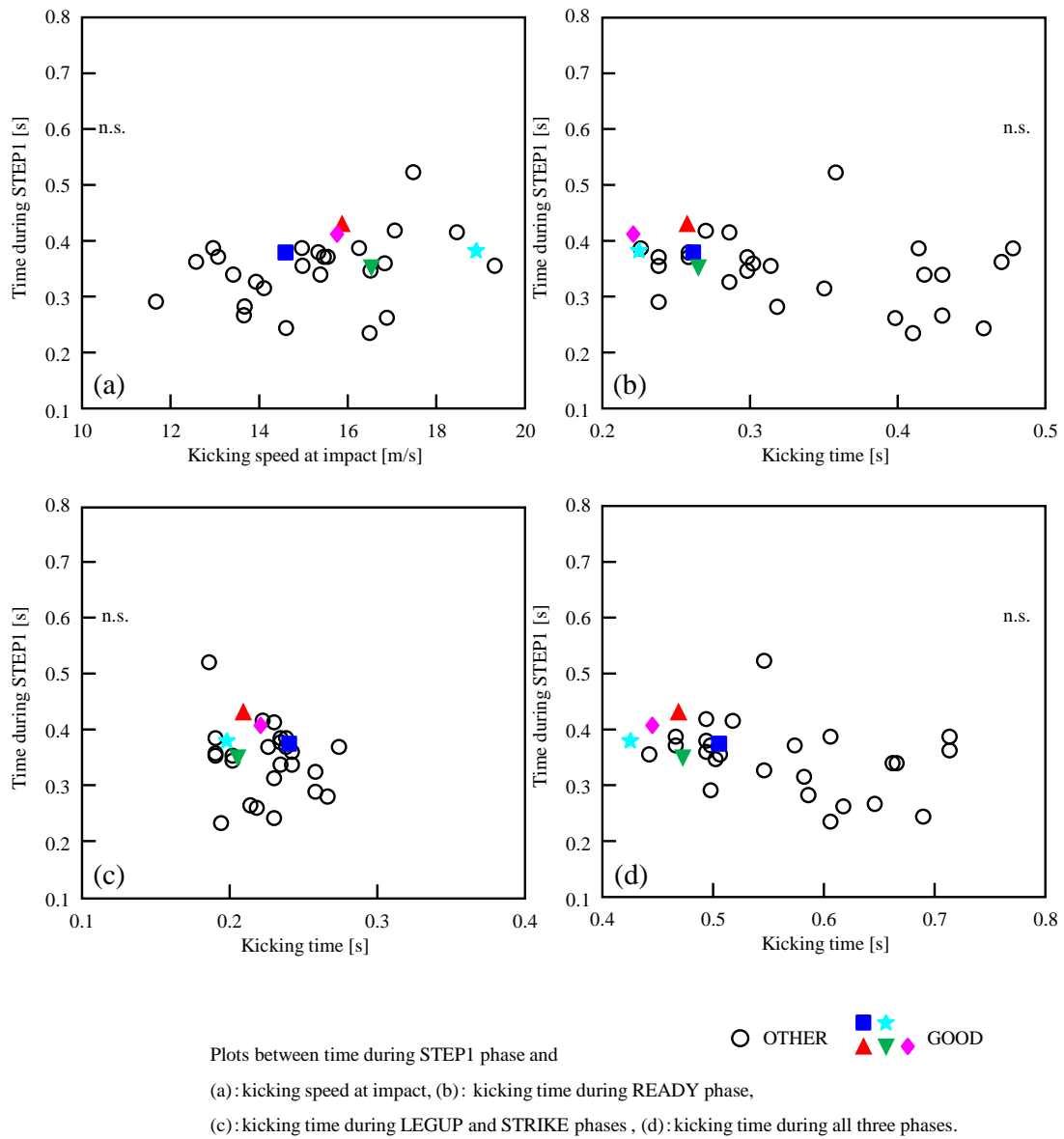


Figure 8-2 Scatter plots of time during STEP1 and other parameters.

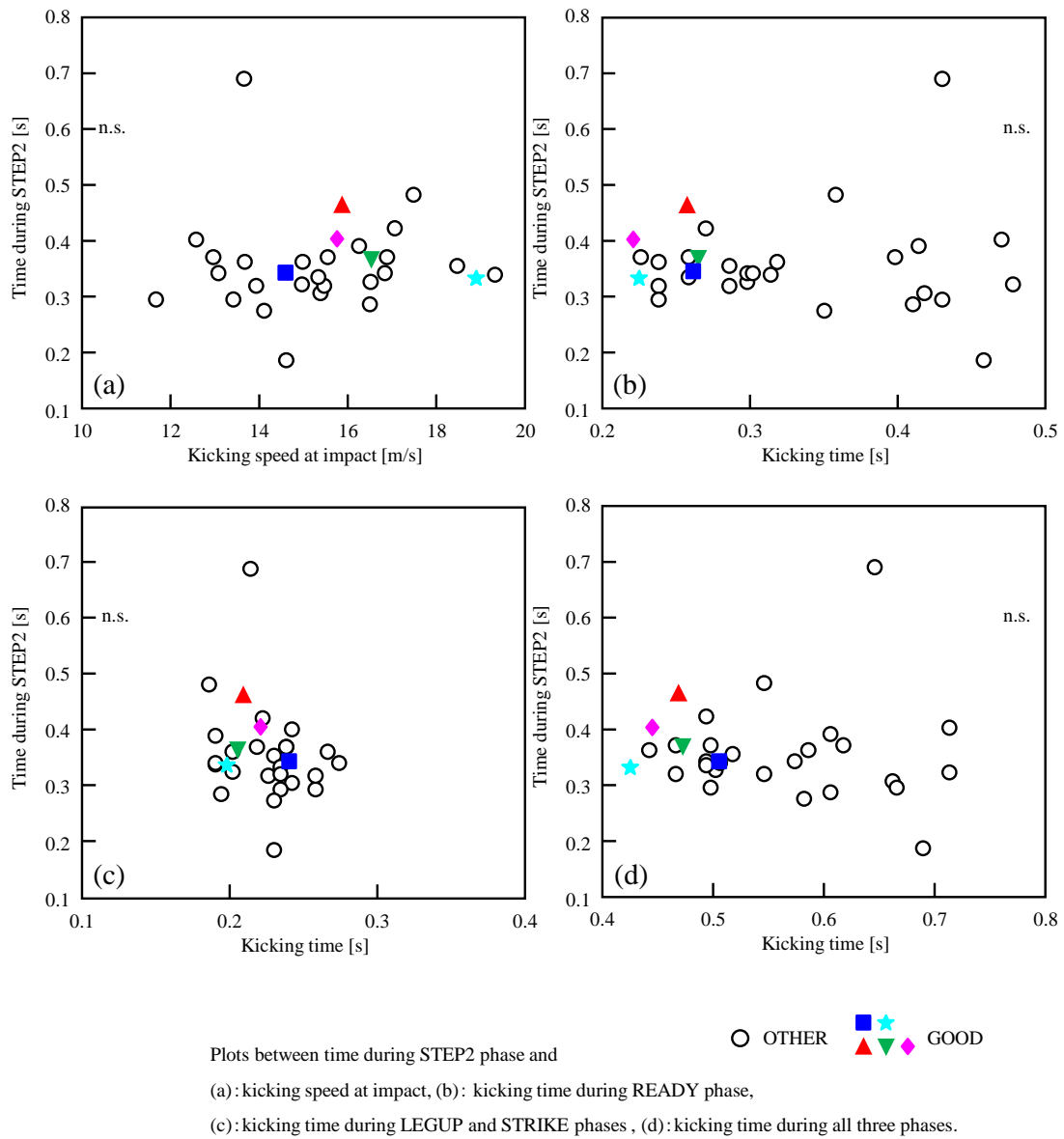


Figure 8-3 Scatter plots of time during STEP2 and other parameters.

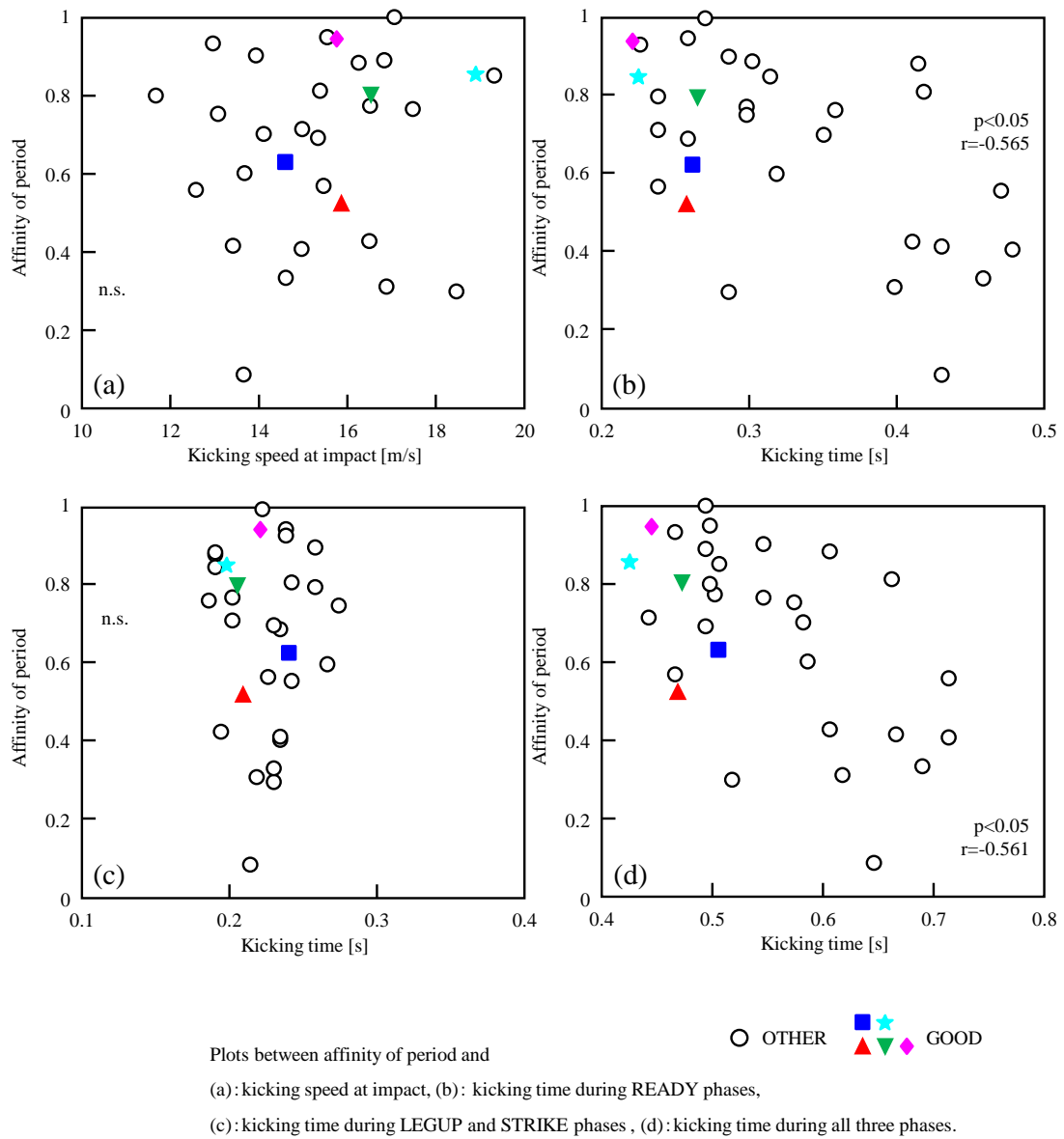


Figure 8-4 Scatter plots of affinity of period and other parameters.

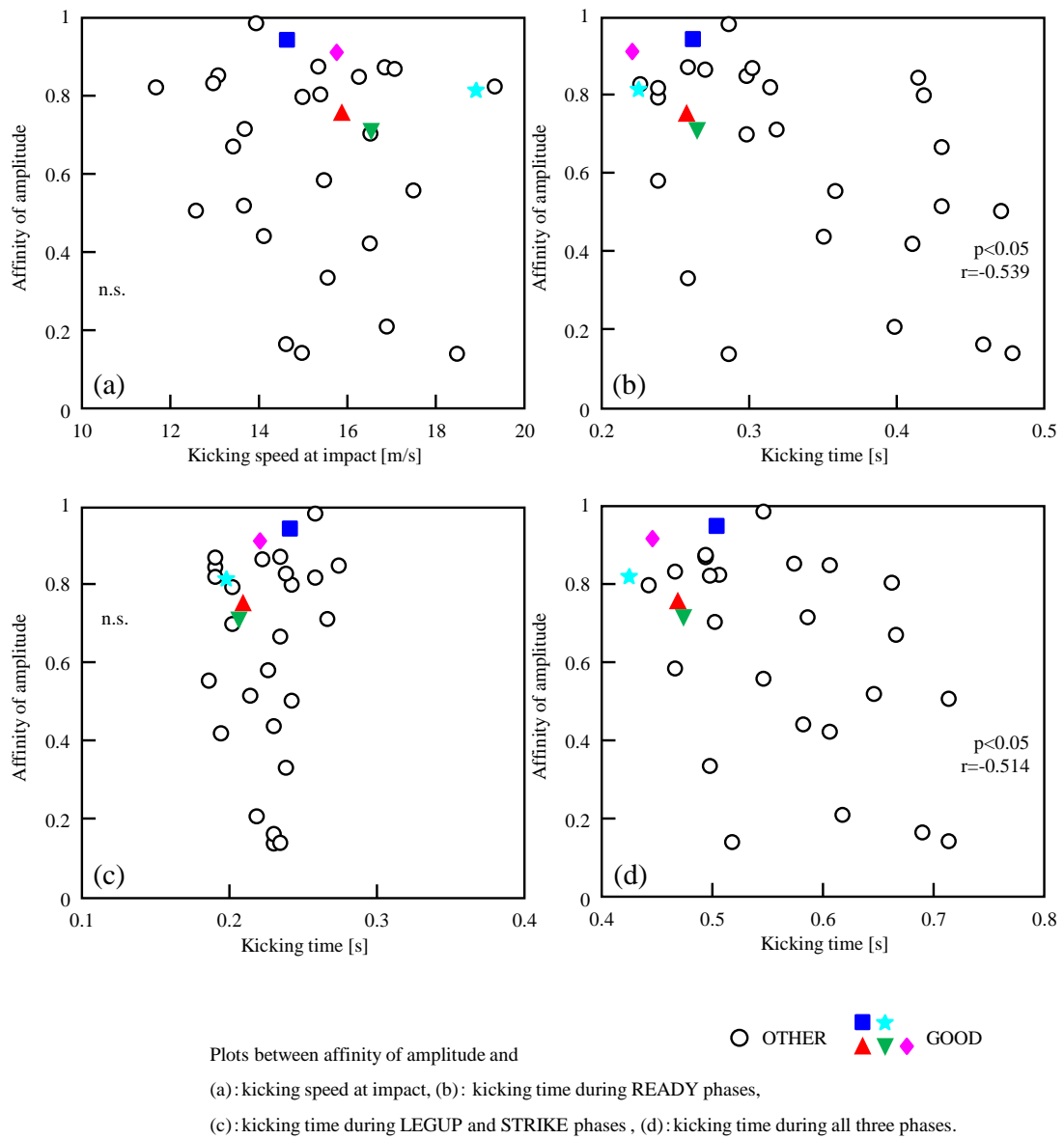


Figure 8-5 Scatter plots of affinity of amplitude and other parameters.

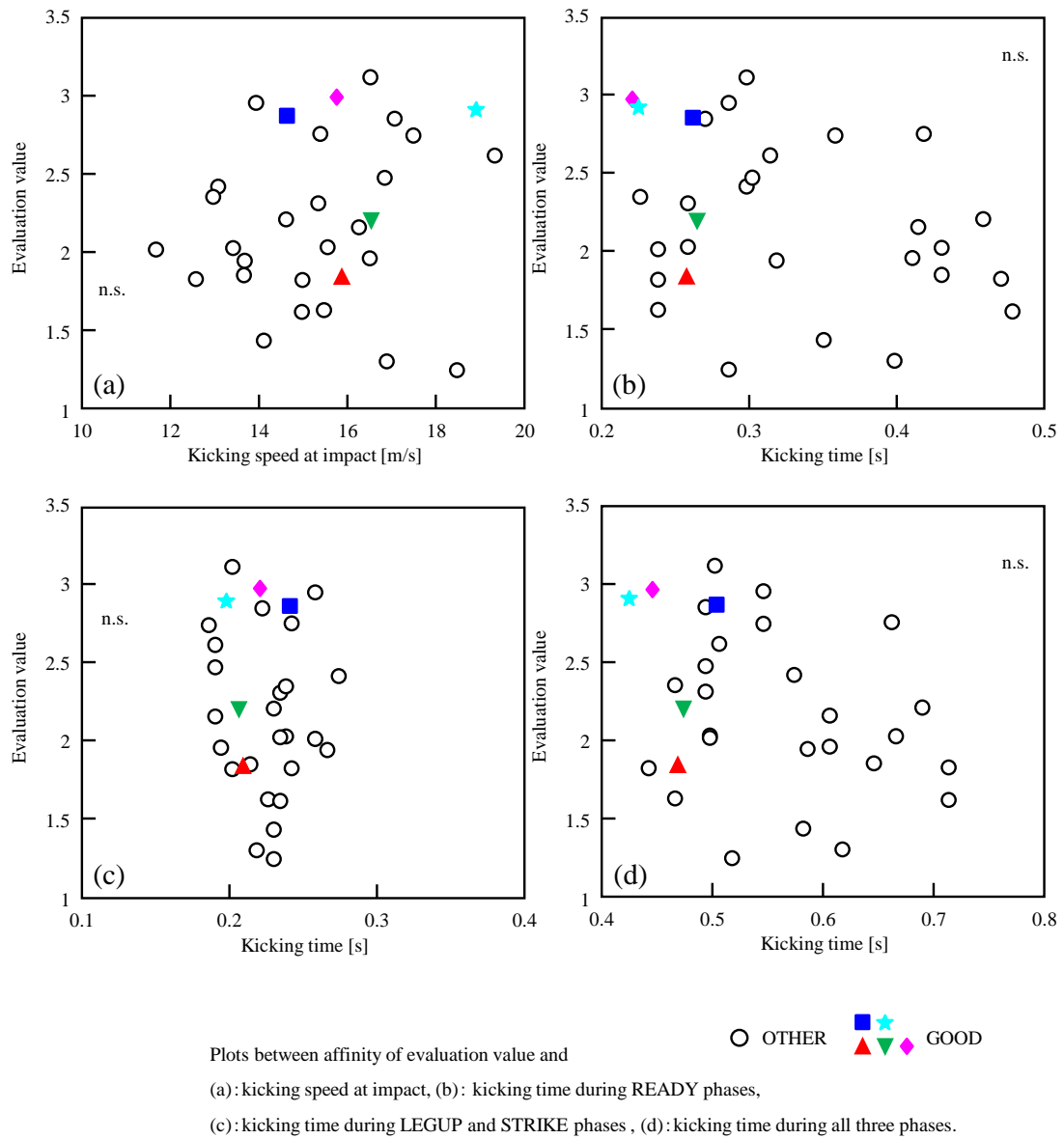
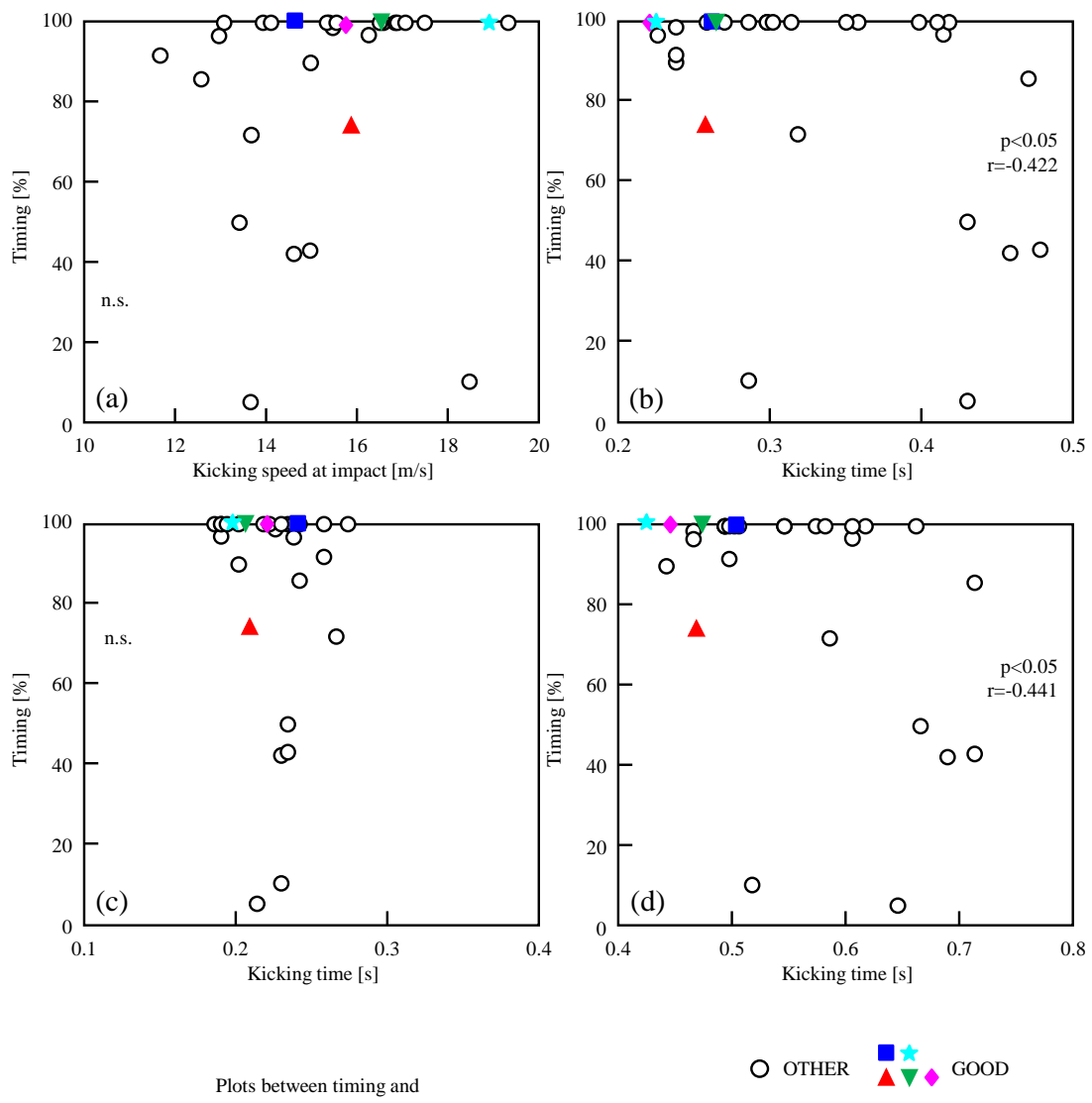
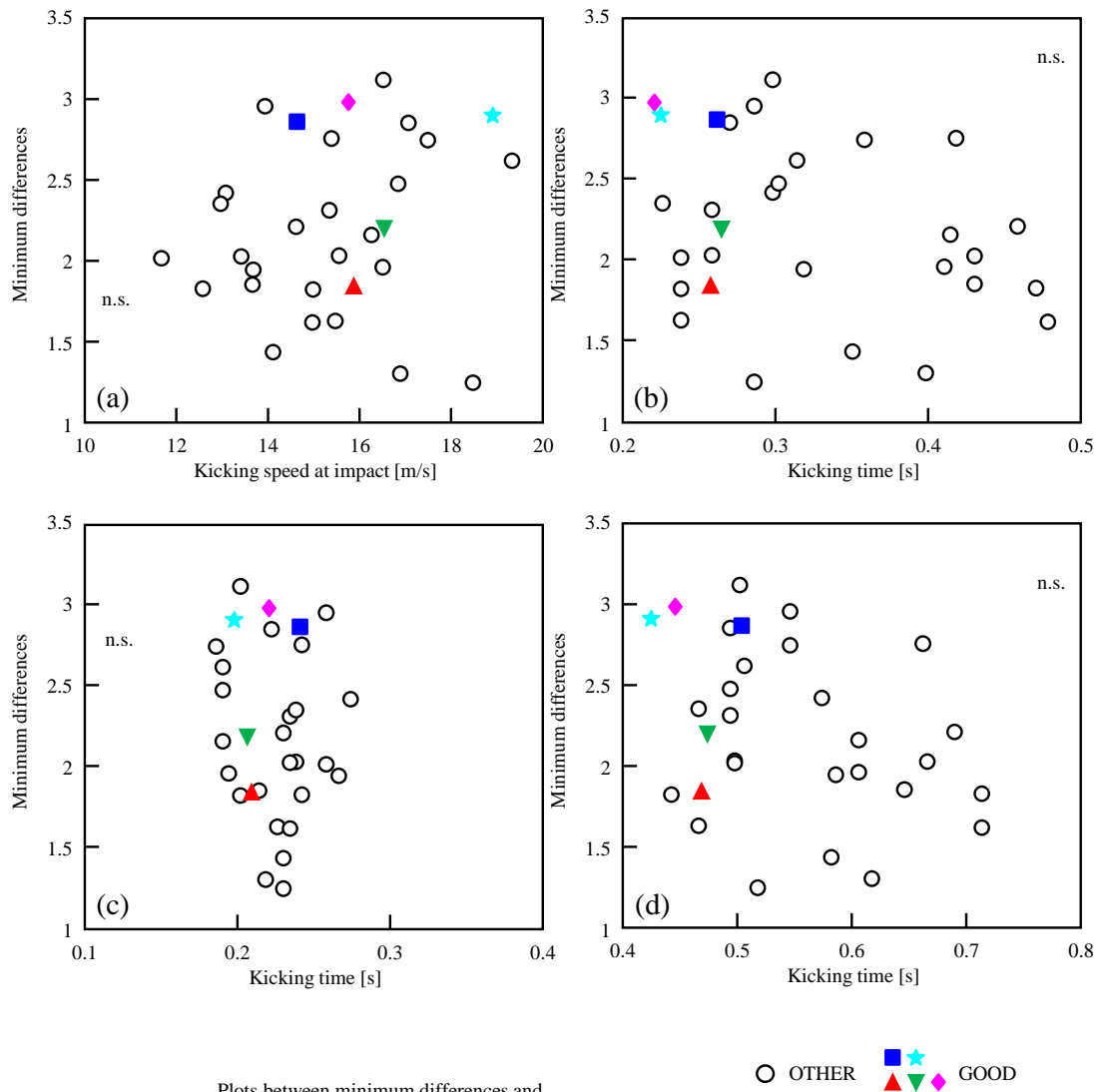


Figure 8-6 Scatter plots of evaluation and other parameters.



(a): kicking speed at impact, (b): kicking time during READY phases,
(c): kicking time during LEGUP and STRIKE phases , (d): kicking time during all three phases.

Figure 8-7 Scatter plots of timing and other parameters.



Plots between minimum differences and

(a): kicking speed at impact, (b): kicking time during READY phases,

(c): kicking time during LEGUP and STRIKE phases, (d): kicking time during all three phases.

Figure 8-8 Scatter plots of minimum differences and other parameters.

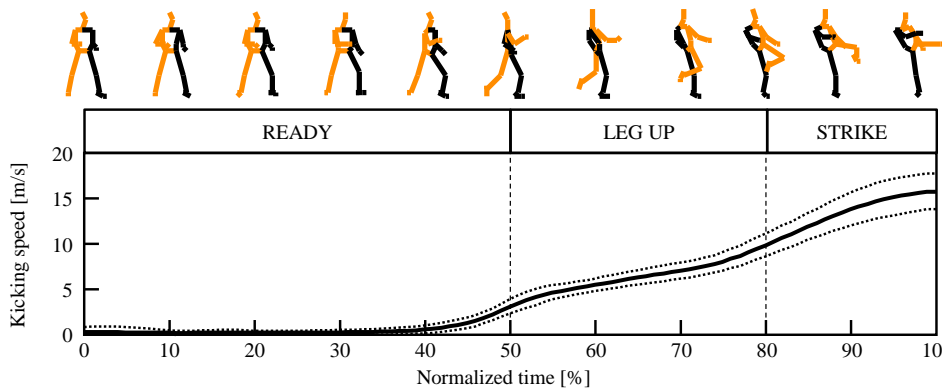
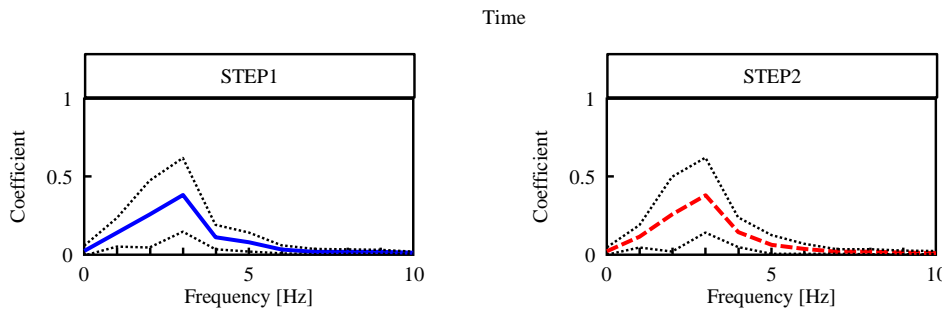
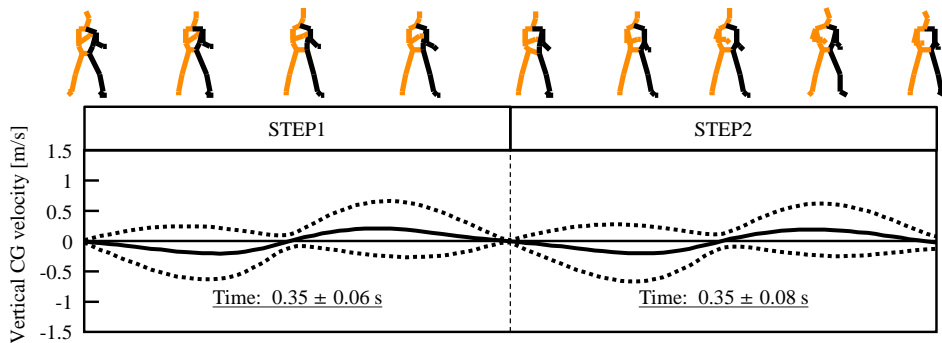
8.4 フィードバックシートの作成

第4, 5, 6, 7章で検討したパラメータを用いて, 被験者ごとのフィードバックシートを作成した. Figure 8-9 は, 全被験者の平均値と標準偏差を掲載したフィードバックシートを示している. STEP 局面における身体重心速度の鉛直成分 (Figure 7-3), フーリエ級数展開後の直流成分, 余弦, 正弦成分の合成値 (1-10 Hz) (Figure 7-3), 蹴り始めからインパクトまでの蹴りスピード (Figure 4-6), インパクトの蹴りスピード (Kicking speed), 全動作時間 (Kicking time), 振幅の類似性評価量 (Affinity of amplitude), 周期の類似性評価量 (Affinity of period), フーリエ級数を用いた類似性評価量 (Evaluation value), 動作相違度 (Minimum differences), 動作遷移開始タイミング (Timing), および速度的, 時間的, 感覚的な「素早さ」を相互評価するためのレーダーチャートを掲載した. なお, レーダーチャートの6つの評価値は, それぞれ0から5の間を取り, 評価値の全被験者平均値を3とし, 標準化を行った. また, Ev は, フーリエ級数を用いた類似性評価量, Tg, は動作遷移開始タイミング, Tr は, READY 局面の動作時間, Jf は, READY 局面中の軸脚股関節力による下胴への力学的エネルギーの伝達量, Hf は, LEGUP と STRIKE 局面を合わせたダイナミックな動作局面中の蹴り脚股関節屈曲角速度の最大値, Lr は, ダイナミックな動作局面中の下胴左回旋角速度の最大値を示す. インパクトの蹴りスピードと Jf は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.455$), インパクトの蹴りスピードと Hf は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.512$), インパクトの蹴りスピードと Jf は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.405$), 全動作時間と Tr は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.956$), 全動作時間と Jf は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.489$), 全動作時間と Hf は有意な相関関係 ($p < 0.05$, $r = 0.391$) であった.

Figure 8-10 は, 速度的, 時間的, 感覚的「素早さ」の評価が高く, 主観的にも「素早い」と判断された被験者, Figure 8-11 は, 時間的, 感覚的「素早さ」の評価が高く, 主観的にも「素早い」と判断された被験者 (GOOD), Figure 8-12 は, 速度的, 時間的「素早さ」の評価が高いが主観的には「素早い」と判断されなかった被験者 (POOR) を典型例として示し

ている。主観的にも「素早い」と判断された被験者のレーダーチャートは、蹴りスピードや全動作時間の大きさに関わらず、おおむねどの評価値も安定して大きく、六角形の形状を保っているが、主観的にも「素早い」と判断されなかった被験者のレーダーチャートは大きく形状が崩れている。ダイナミックな動作局面において蹴り脚股関節で大きな屈曲角速度や下胴左回旋角速度を生成することは、蹴りスピードを増加させるポイントではあるが、主観的な「素早さ」にも影響を及ぼしている可能性が示唆された。また、このようなフィードバックシートを作成することにより、被験者の「素早さ」が可視化されより、選手の評価に役立つと考えられる。

Mean



Kicking speed: 15.73 ± 1.97 m/s

Kicking time: 0.54 ± 0.08 s

Affinity of amplitude: 0.64 ± 0.25

Affinity of period: 0.66 ± 0.23

Evaluation value: 2.19 ± 0.53

Minimum differences: 0.04 ± 0.05

Timing: 85.2 ± 27.2 %

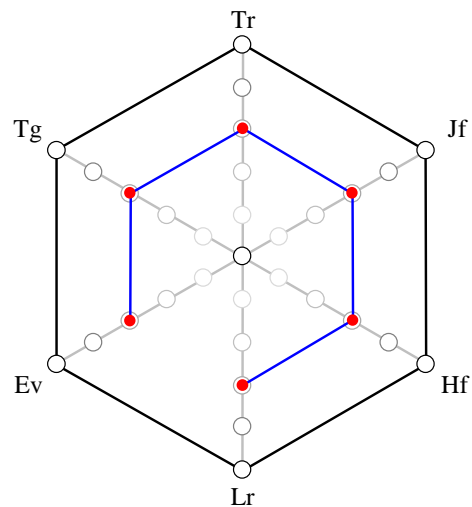
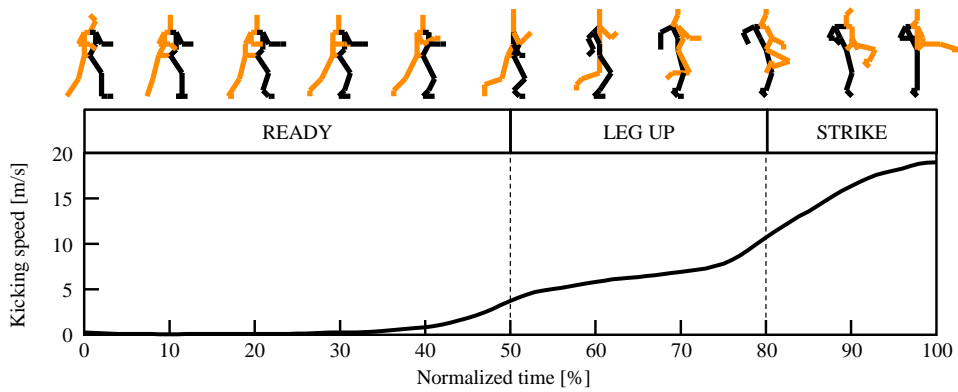
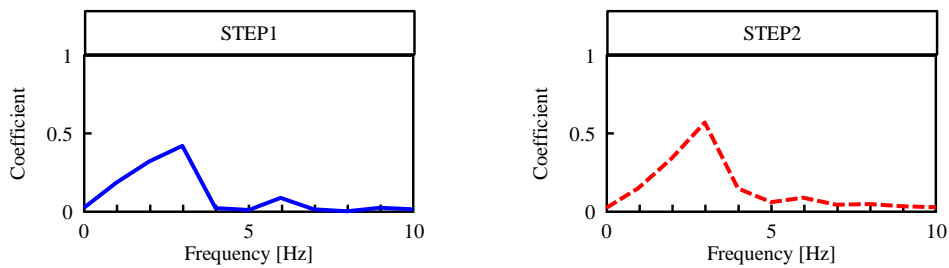
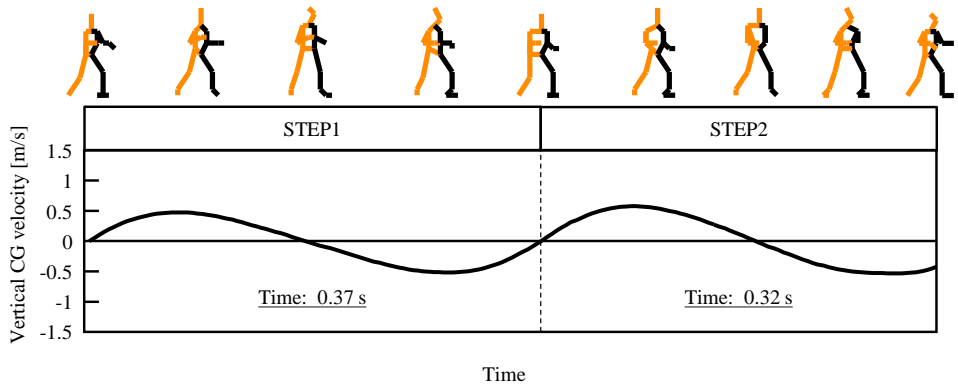


Figure 8-9 Feedback sheet.

Subject No. 5



Kicking speed: 18.99 m/s

Kicking time: 0.43 s

Affinity of amplitude: 0.80

Affinity of period: 0.84

Evaluation value: 2.88

Minimum differences: 0.04

Timing: 100 %

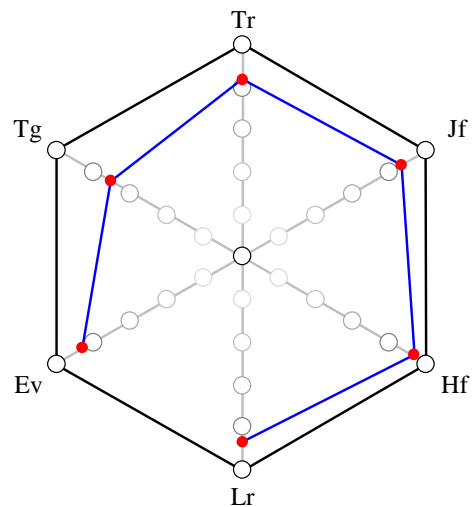
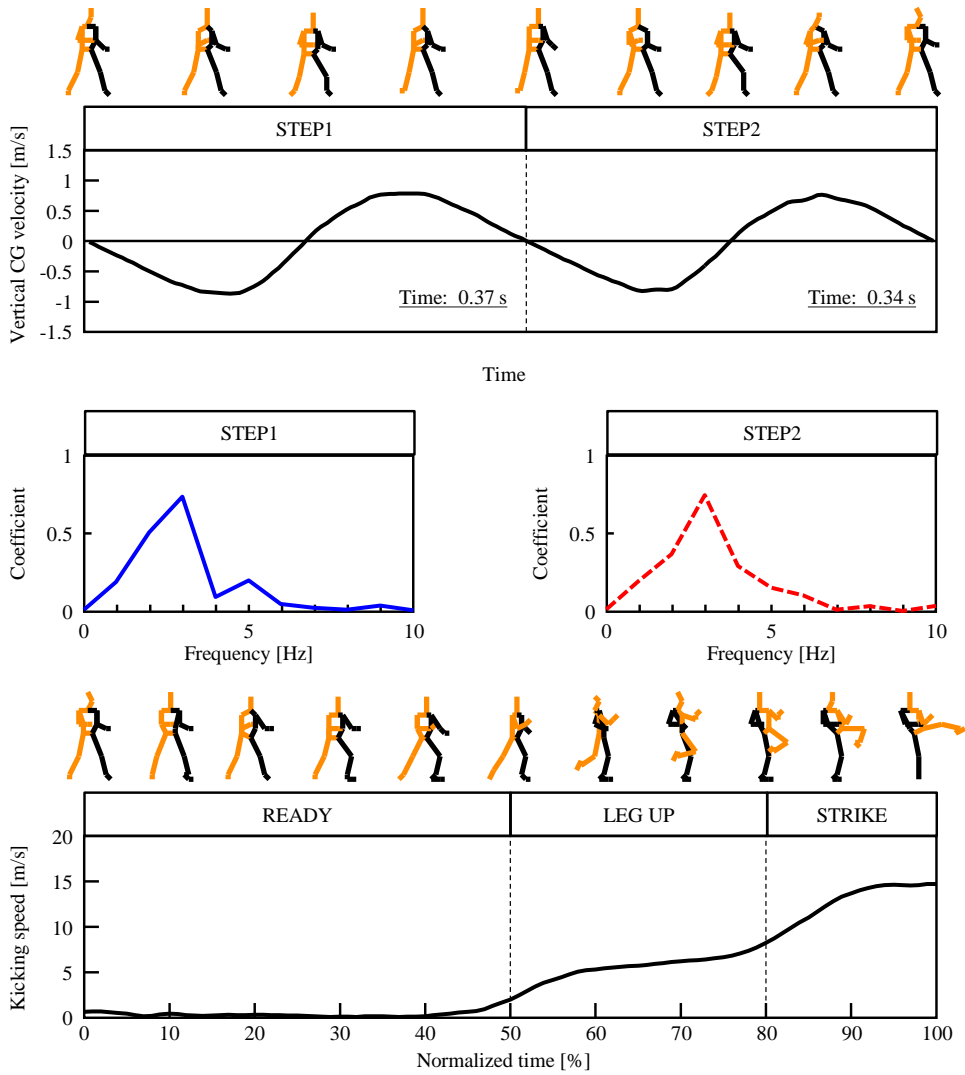


Figure 8-10 Feedback sheet of GOOD1.

Subject No. 20



Kicking speed: 14.74 m/s

Kicking time: 0.51 s

Affinity of amplitude: 0.93

Affinity of period: 0.61

Evaluation value: 2.83

Minimum differences: 0.07

Timing: 100 %

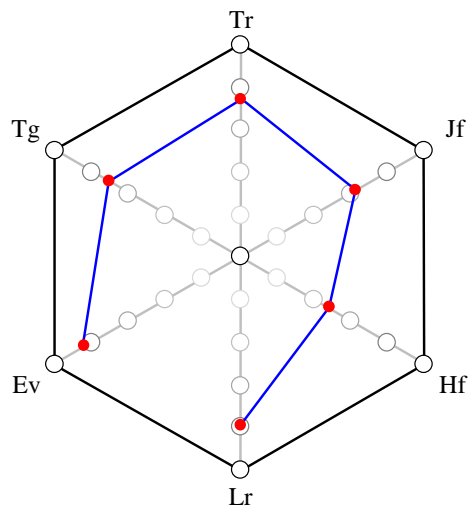


Figure 8-11 Feedback sheet of GOOD2.

Subject No. 11

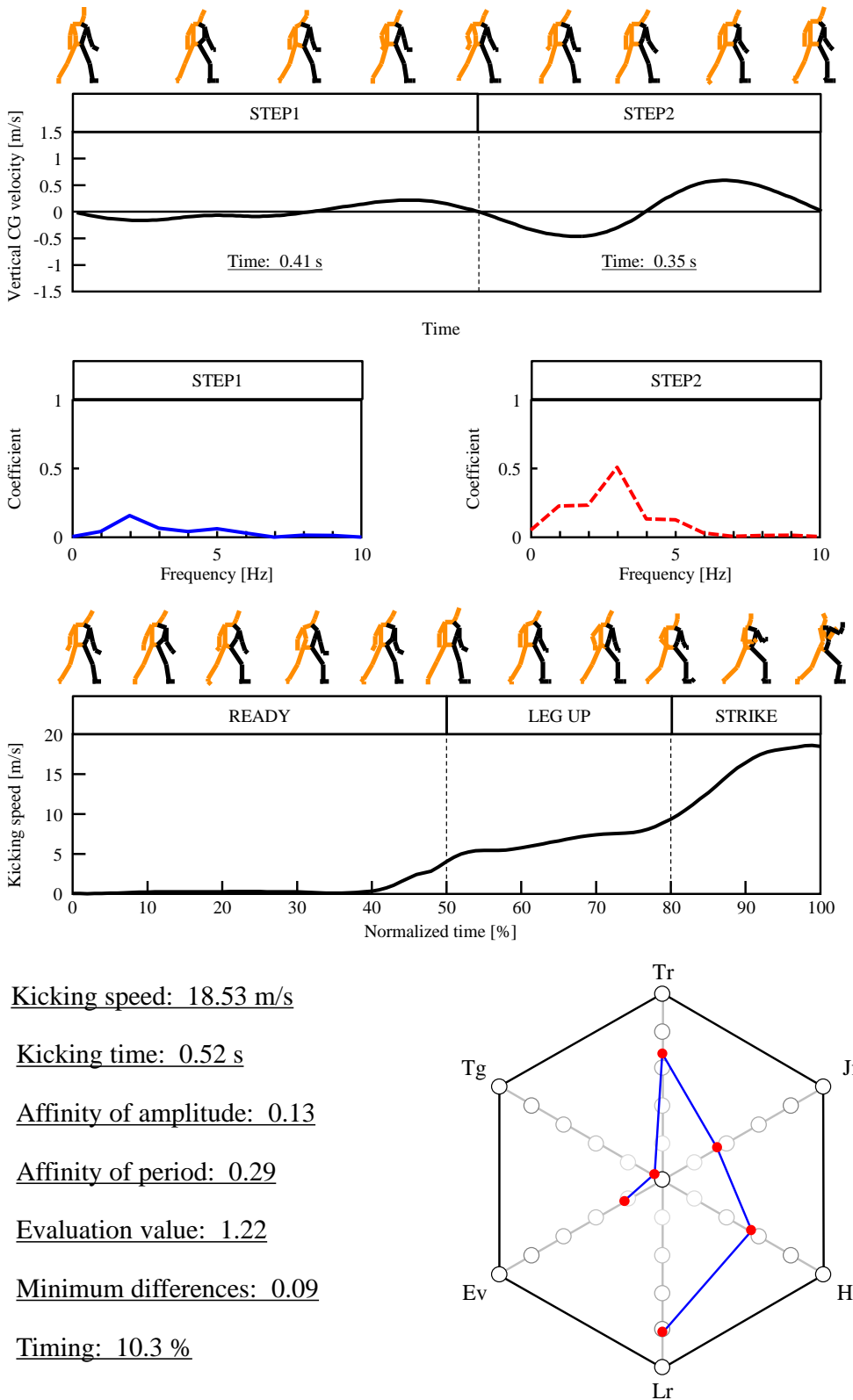


Figure 8-12 Feedback sheet of POOR.

8.5 今後の課題

第 7 章で述べたように，本提案手法では，感覚的な「素早さ」の評価として，ステップ動作中の上下動の速度成分を変えないことなく，蹴り始めを相手選手に悟らせないことを高く評価してきた．しかし，蹴り始めを相手選手に悟らせず予測させない方略にも，本提案手法で検討してきた類似性とは異なり，ステップ動作中の上下動の速度成分を大きく変えることによって，選手自身の蹴り動作を特定させないという方略も考えられる．また，他の方略を用いて「素早い」という印象を与えることも可能である．すなわち，視覚情報から得られる主観的な「素早さ」は，それぞれの選手の立ち位置，蹴り脚が床から離れた後の蹴り脚の軌道，また単純な蹴りスピードや蹴り時間にも依存するため，最終的な「素早さ」を評価するためには，これらの項目も含めた評価方法を考案する必要があるだろう．

9. 結論

本研究の目的は、対人種目であるテコンドーの前回し蹴り動作に関してバイオメカニクスの観点から新たな「素早さ」の評価方法を提示することで、試合に勝つための蹴り動作に関する新たな知見を得ることであった。

本研究の結果と考察から、以下のような結論が引き出せるであろう。

9.1 絶対的パラメータとしての速度的、時間的「素早さ」

9.1.1 ダイナミックな動作局面における前回し蹴り動作の速度的、時間的「素早さ」について

本研究では、準スタティックな動作局面である READY 局面を含む全ての局面の動作時間と IMP の蹴りスピードによって、全被験者 35 名を 4 つのグループに分けた。その結果、時間的な「素早さ」により影響を及ぼしているのは、ダイナミックな動作局面ではなく、準スタティックな動作局面であること、ダイナミックな動作局面中の時間的な「素早さ」は、速度的な「素早さ」を満たすことにより達成されることが示された。また、速度的な「素早さ」である「蹴りスピード」を高めるためには、(i) LEGUP 局面に大きな下胴の左回旋角速度および大きな蹴り脚股関節の屈曲角速度を生成すること、(ii) LEGUP 局面に大きな蹴り脚股関節伸展角速度を生成し、下胴スピードを生成すること、(iii) IMP 直前に、大きな下胴左回旋角速度や、股関節屈曲角速度を急減させ、「運動の連鎖」を巧みに用いることであった。速度的、時間的な「素早さ」を満たしていた GOOD の動作特徴は、上記の要件をすべて満たしていたために、より速度的、時間的「素早さ」を高めることができたと考えられる。

9.1.2 準スタティックな動作局面における前回し蹴り動作の速度的，時間的「素早さ」について

準スタティックな動作局面においては，限られた間合い（試技距離）の中で蹴りスピードを生成する必要があるため，軸脚の連鎖的なパターンが必要になる．速度的，時間的な「素早さ」を満たしていた **GOOD** と速度的な「素早さ」は満たしていないが，時間的な「素早さ」は満たしていた **TIME** では，速度的，時間的な「素早さ」を満たしていない **POOR** と平均的に速度的な「素早さ」は満たしていたが，時間的な「素早さ」は満たしていなかった **SPEED** に比べて，軸脚股関節内旋角速度から外旋角速度に切り替わるタイミングが早かったため，軸脚股関節伸展動作，内転動作を行った際に蹴り出し方向に大きな下胴スピードを早いタイミングで生成することができたと考えられる．すなわち，**GOOD** と **TIME** では，蹴り方向の下胴スピードを生成に作用するような軸脚股関節外旋動作により，軸脚股関節伸展動作および内転動作の効果的かつ連鎖的な動きがみられた．

9.1.3 前回し蹴り動作の開始タイミングの相違による動作の変容について

蹴り出しタイミングを制限された実験条件であっても被験者固有のステップ動作周波数は，身体特性によって決定される可能性が低いことが推察され，技術練習を行うことで，ステップ動作の周波数は，容易に変更することが可能であると考えられる．

蹴り出しタイミングを制御された実験条件であっても蹴りスピードや，動作時間に関しては，被験者ごとの最大のパフォーマンスが発揮されている，一方で，準スタティックな動作局面において，軸脚膝関節の動作を急変化させることで，相手選手に違和感を与え，反応されやすい蹴り動作になる可能性があるため，対応動作が「素早い」動作であるかどうかは提言できず，速度的，時間的「素早さ」のみならず，「蹴りがはやいと対戦相手に錯覚させる」感覚的パラメータを抽出し，分析する必要があるだろう．

9.2 感覚的な「素早さ」の定量化

上下のステップ動作の周期と振幅の類似性を用いた評価では、極大値や極小値、また特徴的なイベントを抜き出して評価を行うため、単純な上下の重心速度関数の形そのものを評価する場合に有効であると考えられる。したがって、指導者が選手の動きを主観的に判断した場合に、評価量の大きさと評価の大きさが比例する可能性がある。

フーリエ級数展開を用いた類似性評価では、周波数分析にもとづいて分析することにより、速度関数の形のみを評価するだけでなく、たとえば、どの周波数成分を変化させることによって、選手の動きがより「素早く」感じられるかといった評価方法、フィードバック方法に応用可能であると考えられる。

フーリエ級数展開を用いた動作遷移開始タイミングおよび動作相違度では、主に振幅を評価することができると考えていたが、振幅の類似性評価量と動作相違度との有意な相関が認められなかった。このことは、動作相違度が2周期の全ての時間の評価ではなく、最も値が小さくなったときを評価対象にしているためであると考えられる。しかし、最も評価値が小さくなるタイミングを算出することで、どのタイミングから、周波数の変化があるかを検討することが可能であった。

9.3 速度的、時間的、感覚的「素早さ」と主観的な「素早さ」の相互評価について

これまでのテコンドーのパフォーマンスを評価する研究の多くは、蹴りスピードが基準となり、蹴りスピードが大きい被験者ほど高い評価を受けていた。しかし、主観的に「素早い」被験者はIMPの蹴りスピードだけに関係するのではなく存在するため、本研究の結果を感覚的な素早さの評価パラメータを考慮して評価する必要があると考えられる。また、本研究で提案した手法を用いて感覚的な素早さの評価パラメータまで考慮することにより、IMPの蹴りスピードが小さな被験者であっても、「素早い」と評価することが可能であることが示された。

指導現場で用いられる「素早さ」には、「速さ」「早さ」「はやいと感じる」が混在してい

る。また、相手選手に錯覚させる「はやさ」と蹴りスピードの「はやさ」を同一の指導用語で両立させることは難しいだろう。

各々の感覚的な「素早さ」のパラメータの評価量の値が高い被験者には、主観的に素早いと評価されなかった被験者も多く含まれていたが、主観的に素早いと評価されなかった被験者は、評価された被験者に比べ、準スタティックな局面の動作時間が長い傾向にあった。したがって、たとえ評価量が高くとも、準スタティックな動作局面以降に時間がかかることで、相手選手に反応させる余裕を残すことになってしまうため、主観的に素早いと評価されなかったと考えられる。これらのことから、主観的な評価の際には、速度的な速さに比べ、時間的な短さが重視されると推察される。

また、相手選手に予測させないという方略ではなく、他の方略を用いて「素早い」という印象を与えることも可能である。したがって、最終的な「素早さ」を評価するためには、これらの項目も含めた評価方法を考案する必要があるだろう。

9.4 今後のテコンドー競技におけるバイオメカニクスへの展望

緒言でも述べたように、阿江と藤井（2002）は、「複雑なスポーツ運動やヒトの動きを研究し、スポーツ科学におけるスポーツバイオメカニクスの役割を果たすためには、研究のすすめ方に関してさらに多くの工夫が必要であろう」と述べ、対人種目に対する研究をスポーツバイオメカニクスがこれから取り組むべき課題の 1 つであるとしている。今後、感覚的な評価の数値化のみならず、その他、様々な場面における対応動作や場面の発生機序について検討することは、試合に勝つためのバイオメカニクスの研究に必要であり、バイオメカニクス分野の発展にも繋がることになるだろう。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、指導教員の藤井範久先生、小池関也先生、高木英樹先生、浅井武先生には、ご多用の中、多くのご助言、ご指導をいただきました。特に、藤井範久先生には研究活動から普段の生活まで面倒をみていただき、研究者としての心得をご教授いただきました。また、スポーツバイオメカニクス分野へ足を踏み入れるきっかけをいただいた岡田守彦先生（筑波大学名誉教授）、阿江通良先生（筑波大学名誉教授）、大阪大学在学時代から心配をかけました故熊倉博雄先生（大阪大学教授）、学会の折に叱咤激励をくださった木下博先生（大阪大学名誉教授）、実験の際に実験室を快く提供してくださった深代千之先生（東京大学教授）など挙げるときりがないほど多くの先生方にお世話いただき、可愛がっていただきました。深く感謝いたします。

スポーツバイオメカニクス研究室の先輩、後輩、特に兄貴分の宮崎彰吾氏、分野を飛び越えた高林俊幸先生との研究はじめその他様々な議論、雑談は、発見の日々でした。

最後になりますが、東京大学での実験の際に験者として活躍してくれた東京大学大学院の佐渡夏紀氏、被験者として研究活動に関わっていただきテコンドー選手の皆様、陰ながら応援してくれた家族、常に新しい視点と刺激を与えていただいた全日本テコンドー協会の阿部海将専務理事、小野原裕昭常務理事、岡本依子理事など、周りの方々に助けられ本論文をまとめることができました。ご協力いただいたすべての方に厚くお礼申し上げます。

ここに感謝と謙虚の気持ちを胸に、今後も知的好奇心の追及に邁進することを誓います。

百拝

平成 29 年 3 月 24 日

筑波大学大学院 人間総合科学研究科
木下 まどか

Appendix

身体セグメント移動座標系定義

(1) 右手部

右手第3中手骨頭 (RHND) から右手関節中心 (RWR) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ha} とし、右手関節内側 (RWRM) から右手関節外側 (RWRL) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{ha} とした。 \mathbf{z}_{ha} と \mathbf{s}_{ha} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{ha} とし、 \mathbf{y}_{ha} と \mathbf{z}_{ha} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{x}_{ha} とした。そして \mathbf{x}_{ha} , \mathbf{y}_{ha} , \mathbf{z}_{ha} を軸とする座標系を手部座標系とした。

(2) 右前腕

右手関節中心 (RWR) から右肘関節中心 (REL) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{fa} とし、右手関節内側 (RWRM) から右手関節外側 (RWRL) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{fa} とした。 \mathbf{s}_{fa} と \mathbf{z}_{fa} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{fa} とし、 \mathbf{z}_{fa} と \mathbf{x}_{fa} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{y}_{fa} とした。そして \mathbf{x}_{fa} , \mathbf{y}_{fa} , \mathbf{z}_{fa} を軸とする座標系を前腕座標系とした。

(3) 右上腕

右肘関節中心 (REL) から右肩関節中心 (RSH) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ua} とし、右肘関節内側 (RELM) から右肘関節外側 (RELL) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{ua} とした。 \mathbf{s}_{ua} と \mathbf{z}_{ua} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{ua} とし、 \mathbf{z}_{ua} と \mathbf{x}_{ua} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{y}_{ua} とした。そして \mathbf{x}_{ua} , \mathbf{y}_{ua} , \mathbf{z}_{ua} を軸とする座標系を上腕座標系とした。

(4) 右足部

右踵 (RHEL) から右足第3中足骨頭 (RBA) に向かう単位ベクトルを \mathbf{y}_{fo} とし、右第1中足骨頭 (RBAM) から右第5中足骨頭 (RBAL) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{fo} とした。 \mathbf{s}_{fo} と \mathbf{y}_{fo} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{z}_{fo} とし、 \mathbf{y}_{fo} と \mathbf{z}_{fo} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{x}_{fo} とした。そして \mathbf{x}_{fo} , \mathbf{y}_{fo} , \mathbf{z}_{fo} を軸とする座標系を足部座標系とした。

系とした.

(5) 右下腿

右足関節中心 (RAN) から右膝関節中心 (RKN) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{sh} とし, 右股関節中心 (RHIP) から右膝関節中心 (RKN) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{sh} とした. \mathbf{s}_{sh} と \mathbf{z}_{sh} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{sh} とし, \mathbf{z}_{sh} と \mathbf{x}_{sh} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{y}_{sh} とした. そして \mathbf{x}_{sh} , \mathbf{y}_{sh} , \mathbf{z}_{sh} を軸とする座標系を下腿座標系とした.

(6) 右大腿

右膝関節中心 (RKN) から右股関節中心 (RHIP) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{th} とし, 右足関節中心 (RAN) から右膝関節中心 (RKN) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{th} とした. \mathbf{s}_{th} と \mathbf{z}_{th} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{th} とし, \mathbf{z}_{th} と \mathbf{x}_{th} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{y}_{th} とした. そして \mathbf{x}_{th} , \mathbf{y}_{th} , \mathbf{z}_{th} を軸とする座標系を大腿座標系とした.

(7) 頭部

胸骨上縁 (STEC) から頭頂 (HEAD) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{he} とし, 左耳 (LEAR) から右耳 (REAR) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{he} とした. \mathbf{z}_{he} と \mathbf{s}_{he} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{he} とし, \mathbf{y}_{he} と \mathbf{z}_{he} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{x}_{he} とした. そして \mathbf{x}_{he} , \mathbf{y}_{he} , \mathbf{z}_{he} を軸とする座標系を頭部座標系とした.

(8) 上脗

肋骨下端中心 (CRIB) から胸骨上縁 (STEC) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ut} とし, 左肩関節中心 (LSH) から右肩関節中心 (RSH) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{ut} とした. \mathbf{z}_{ut} と \mathbf{s}_{ut} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{ut} とし, \mathbf{y}_{ut} と \mathbf{z}_{ut} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{x}_{ut} とした. そして \mathbf{x}_{ut} , \mathbf{y}_{ut} , \mathbf{z}_{ut} を軸とする座標系を上脗座標系とした.

(9) 下胴

左右股関節中心 (CHIP) から肋骨下端中心 (CRIB) に向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{1t} とし, 左股関節中心 (LHIP) から右股関節中心 (RHIP) に向かう単位ベクトルを補助ベクトル \mathbf{s}_{1t} とした. \mathbf{z}_{1t} と \mathbf{s}_{1t} の外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{1t} とし, \mathbf{y}_{1t} と \mathbf{z}_{1t} の外積によって得られる単位ベクトルを \mathbf{x}_{1t} とした. そして \mathbf{x}_{1t} , \mathbf{y}_{1t} , \mathbf{z}_{1t} を軸とする座標系を下胴座標系とした.

身体セグメント角度

(1) 上胴

(a) 前傾・後傾

静止座標系の YZ 平面において Y 軸と y_{ut} とのなす角度を上胴前後傾角度と定義した。なお、後傾位を正，前傾位を負とした。

(b) 左傾・右傾

静止座標系の ZX 平面において X 軸と x_{ut} とのなす角度を上胴左右傾角度と定義した。なお，右傾位を正，左傾位を負とした。

(c) 左回旋・右回旋

静止座標系の XY 平面において X 軸と x_{ut} とのなす角度を上胴左右傾角度と定義した。なお，左回旋位を正，右回旋位を負とした。

(2) 下胴

(a) 前傾・後傾

静止座標系の YZ 平面において Y 軸と y_{lt} とのなす角度を下胴前後傾角度と定義した。なお，後傾位を正，前傾位を負とした。

(b) 左傾・右傾

静止座標系の ZX 平面において X 軸と x_{lt} とのなす角度を下胴左右傾角度と定義した。なお，右傾位を正，左傾位を負とした。

(c) 左回旋・右回旋

静止座標系の XY 平面において X 軸と x_{lt} とのなす角度を下胴左右傾角度と定義した。なお，左回旋位を正，右回旋位を負とした。

関節角度

(1) 右足関節

(a) 底屈・背屈

右下腿座標系の $\mathbf{y}_{sh}\mathbf{z}_{sh}$ 平面に右足部座標系の \mathbf{y}_{fo} 軸を射影したベクトルを \mathbf{y}'_{fo} とし、 \mathbf{y}_{sh} 軸と \mathbf{y}'_{fo} とのなす角度を右足関節底背屈角度と定義した。なお、立位時の足関節底屈・背屈角度をゼロとし、背屈位を正、底屈位を負とした。

(b) 内反・外反

右下腿座標系の $\mathbf{z}_{sh}\mathbf{x}_{sh}$ 平面に右足部座標系の \mathbf{x}_{fo} 軸を射影したベクトルを \mathbf{x}'_{fo} とし、 \mathbf{x}_{sh} 軸と \mathbf{x}'_{fo} とのなす角度を右足関節内外反角度と定義した。なお、立位時の足関節内反・外反角度をゼロとし、内反位を正、外反位を負とした。

(c) 内転・外転

右下腿座標系の $\mathbf{x}_{sh}\mathbf{y}_{sh}$ 平面において \mathbf{y}_{sh} 軸と \mathbf{y}'_{fo} とのなす角度を右足関節内外転角度と定義した。なお、立位時の足関節内転・外転角度をゼロとし、内転位を正、外転位を負とした。

(2) 右膝関節 屈曲・伸展

右大腿座標系の $\mathbf{y}_{th}\mathbf{z}_{th}$ 平面に右下腿座標系の \mathbf{z}_{sh} 軸を射影したベクトルを \mathbf{z}'_{sh} とし、 \mathbf{z}_{th} 軸と \mathbf{z}'_{sh} とのなす角度を右膝関節屈曲伸展角度と定義した。なお、立位時の膝関節完全伸展位をゼロとし、屈曲位を負とした。

(3) 右股関節

(a) 屈曲・伸展

下胴座標系の $\mathbf{y}_{lt}\mathbf{z}_{lt}$ 平面に右大腿座標系の \mathbf{z}_{th} 軸を射影したベクトルを \mathbf{z}'_{th} とし、 \mathbf{z}_{lt} 軸と \mathbf{z}'_{th} とのなす角度を右股関節屈曲伸展角度と定義した。なお、立位時の股関節屈曲・伸展角度をゼロとし、屈曲位を正、伸展位を負とした。

(b) 内転・外転

下胴座標系の $\mathbf{z}_{lt}\mathbf{x}_{lt}$ 平面に右大腿座標系の \mathbf{x}_{th} 軸を射影したベクトルを \mathbf{x}'_{th} とし、 \mathbf{x}_{lt} 軸と \mathbf{x}'_{th} とのなす角度を右股関節内外転角度と定義した。なお、立位時の股関節内転・外転角度をゼロとし、内転位を正、外転位を負とした。

(c) 内旋・外旋

下胴座標系の $\mathbf{x}_{lt}\mathbf{y}_{lt}$ 平面において \mathbf{x}_{lt} 軸と \mathbf{x}'_{th} とのなす角度を右股関節内外旋角度と定義した。なお、立位時の股関節内旋・外旋角度をゼロとし、内旋位を正、外旋位を負とした。

(4) 体幹関節

(a) 屈曲・伸展

上胴座標系の $\mathbf{y}_{ut}\mathbf{z}_{ut}$ 平面に下胴座標系の \mathbf{z}_{lt} 軸を射影したベクトルを \mathbf{z}'_{lt} とし、 \mathbf{z}_{ut} 軸と \mathbf{z}'_{lt} とのなす角度を体幹関節屈曲伸展角度と定義した。なお、立位時の体幹関節屈曲・伸展角度をゼロとし、伸展位を正、屈曲位を負とした。

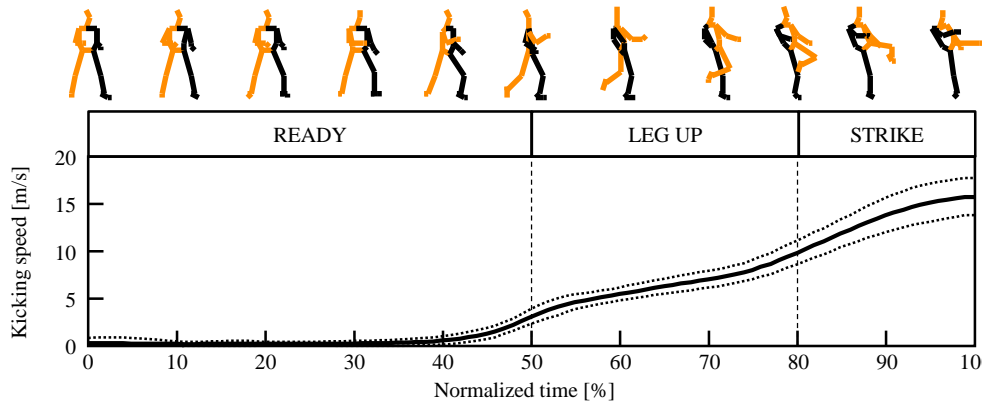
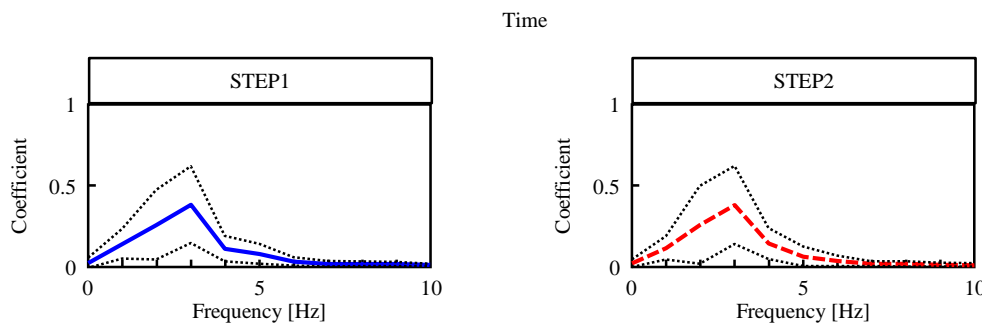
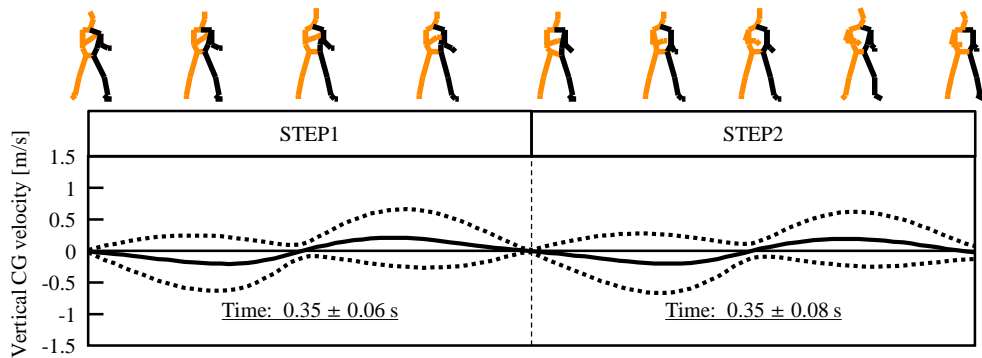
(b) 左屈・右屈

上胴座標系の $\mathbf{z}_{ut}\mathbf{x}_{ut}$ 平面に下胴座標系の \mathbf{x}_{lt} 軸を射影したベクトルを \mathbf{x}'_{lt} とし、 \mathbf{x}_{ut} 軸と \mathbf{x}'_{lt} とのなす角度を体幹関節左右屈角度と定義した。なお、立位時の体幹関節左屈・右屈角度をゼロとし、右屈位を正、左屈位を負とした。

(c) 左捻転・右捻転

上胴座標系の $\mathbf{x}_{ut}\mathbf{y}_{ut}$ 平面において \mathbf{x}_{ut} 軸と \mathbf{x}'_{lt} とのなす角度を体幹関節左右捻転角度と定義した。なお、立位時の体幹関節左捻転・右捻転角度をゼロとし、左捻転位を正、右捻転位を負とした。

Mean



Kicking speed: 15.73 ± 1.97 m/s

Kicking time: 0.54 ± 0.08 s

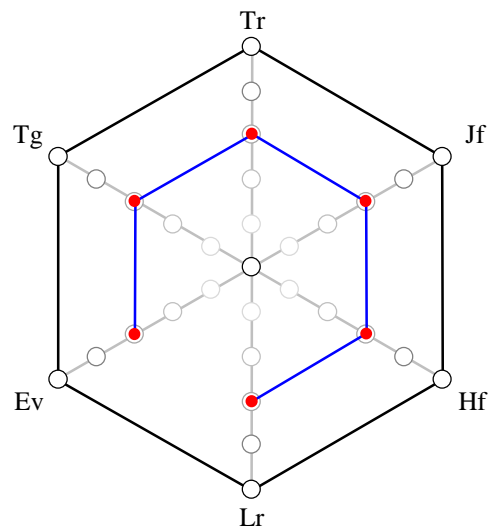
Affinity of amplitude: 0.64 ± 0.25

Affinity of period: 0.66 ± 0.23

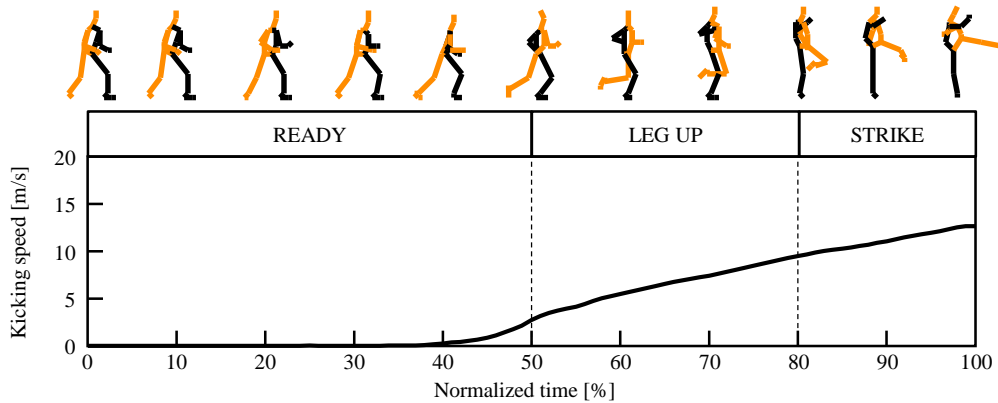
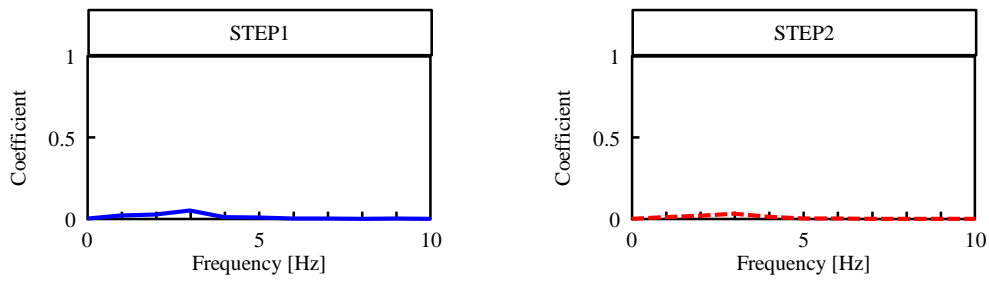
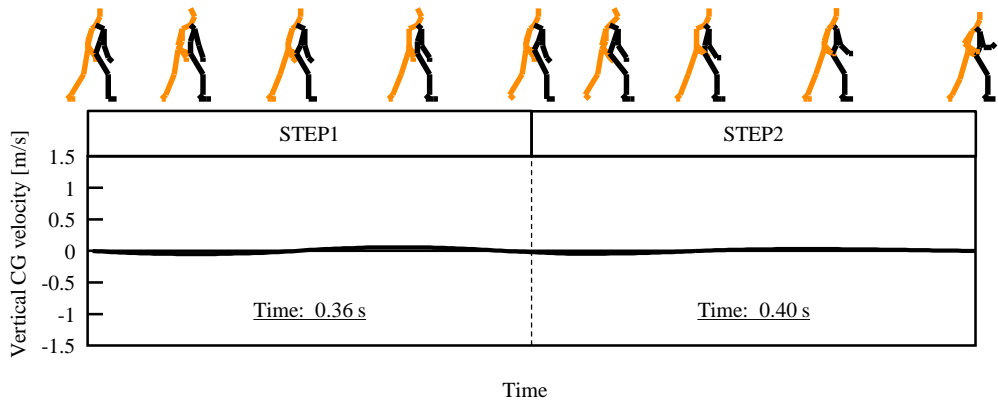
Evaluation value: 2.19 ± 0.53

Minimum differences: 0.04 ± 0.05

Timing: 85.2 ± 27.2 %



Subject No. 1



Kicking speed: 12.65 m/s

Kicking time: 0.72 s

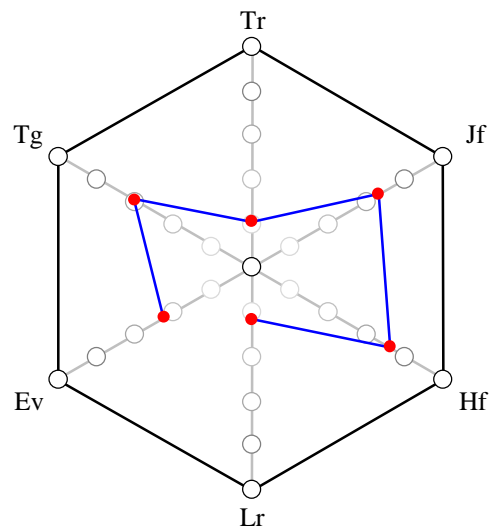
Affinity of amplitude: 0.50

Affinity of period: 0.55

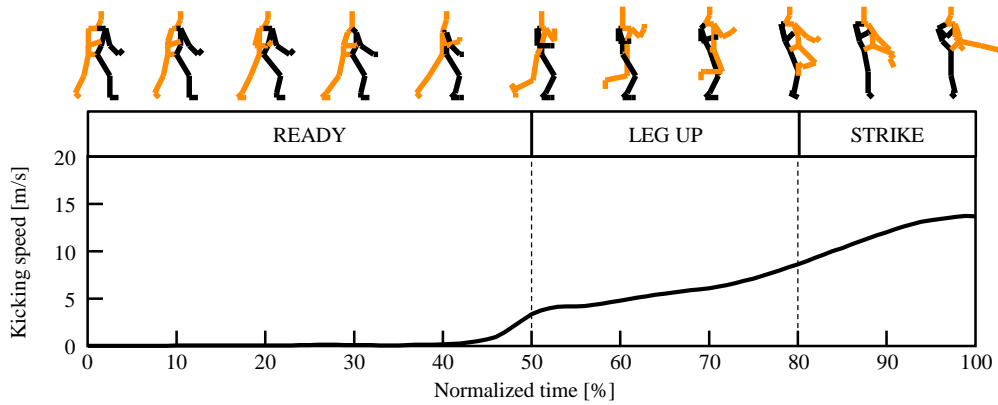
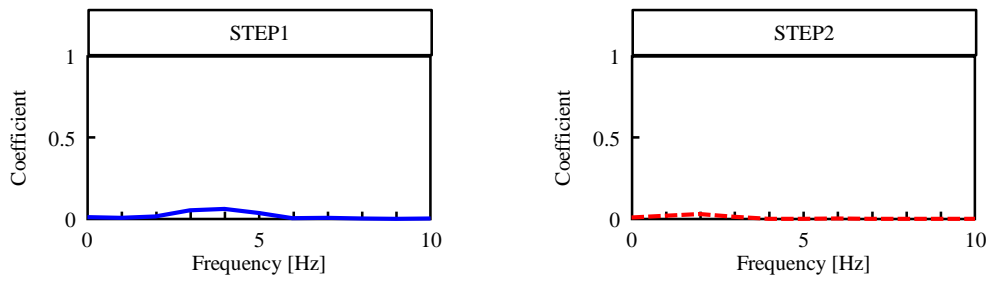
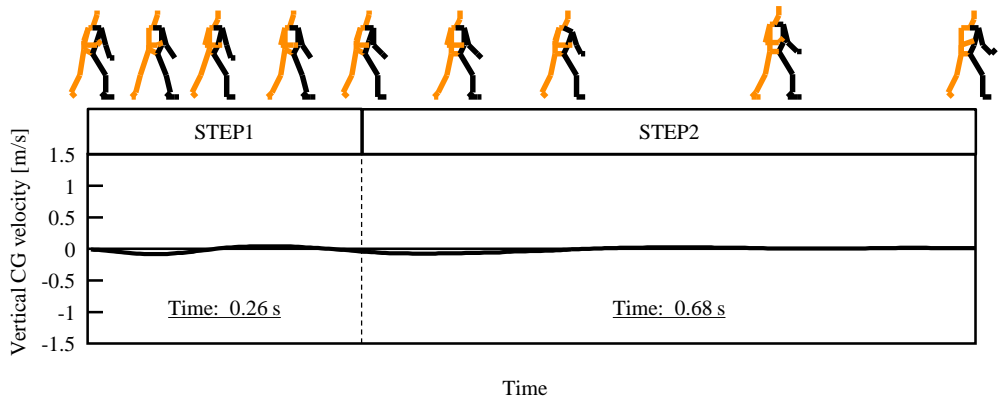
Evaluation value: 1.80

Minimum differences: 0.00

Timing: 85.9 %



Subject No. 2



Kicking speed: 13.71 m/s

Kicking time: 0.65 s

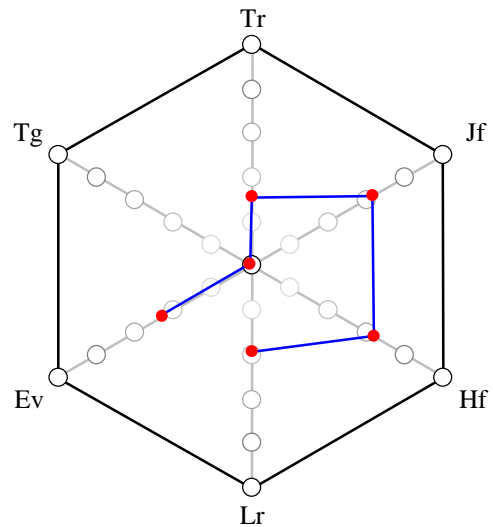
Affinity of amplitude: 0.51

Affinity of period: 0.08

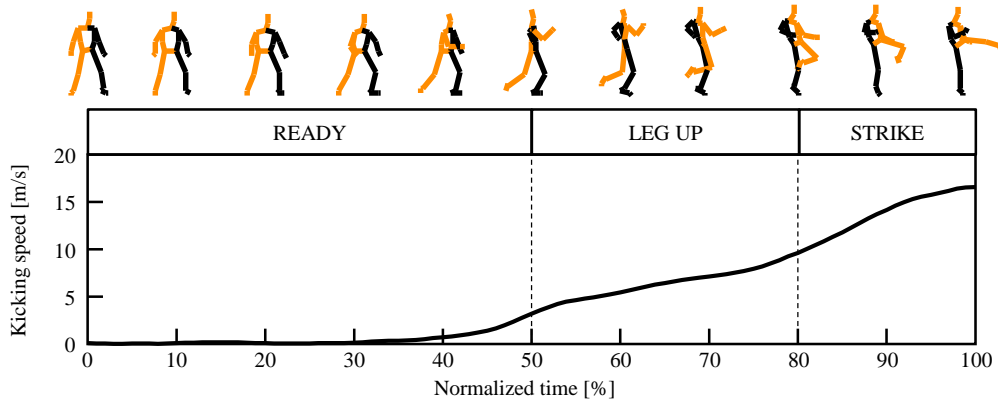
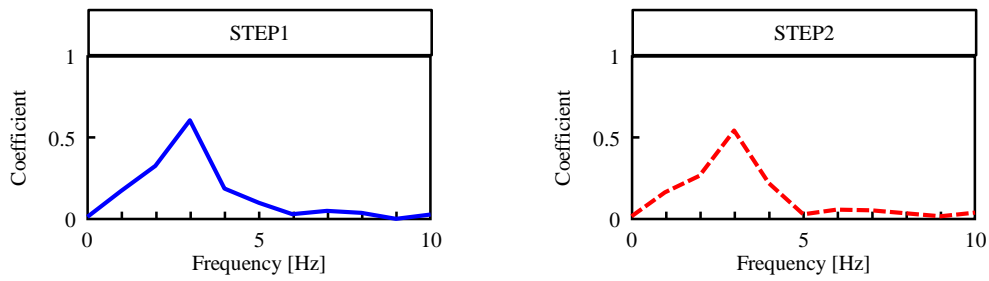
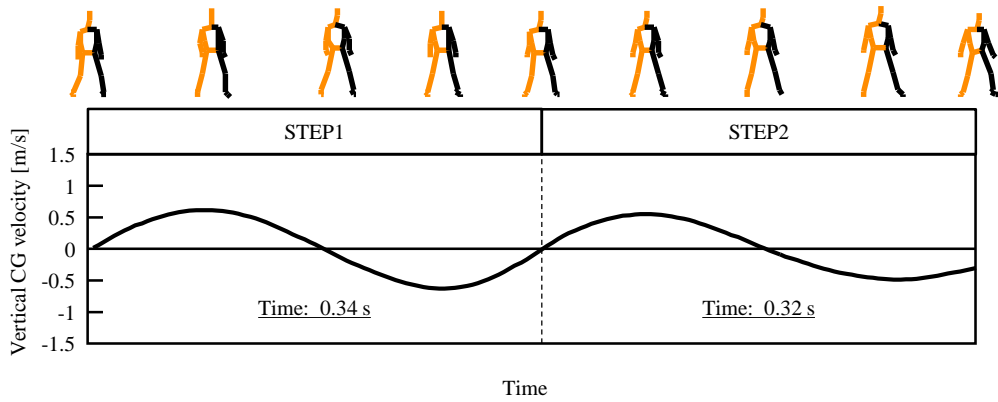
Evaluation value: 1.83

Minimum differences: 0.01

Timing: 5.3 %



Subject No. 3



Kicking speed: 16.57 m/s

Kicking time: 0.51 s

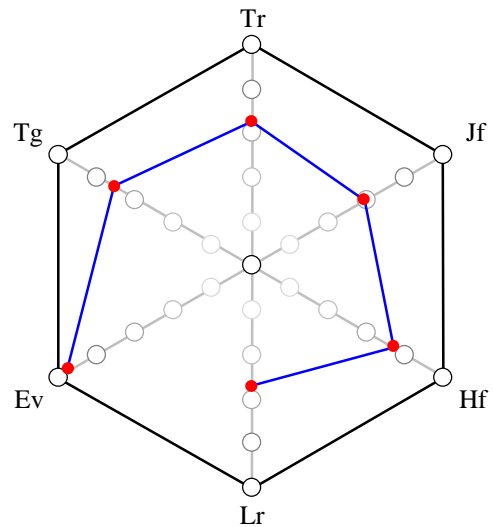
Affinity of amplitude: 0.69

Affinity of period: 0.76

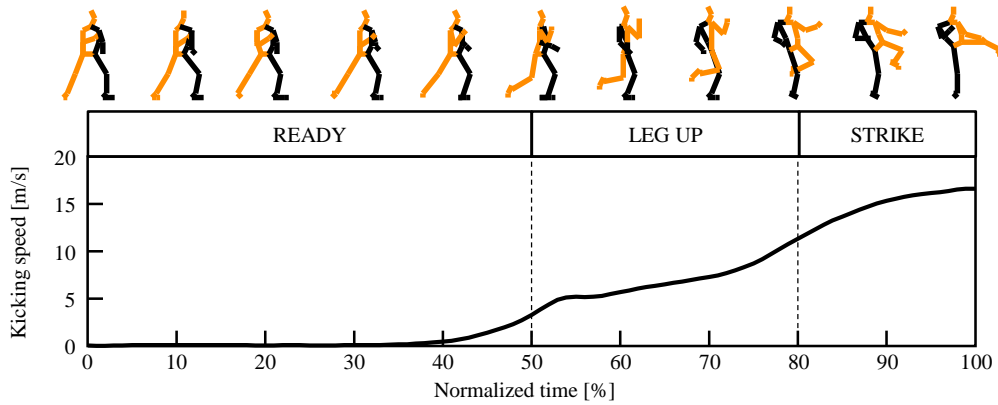
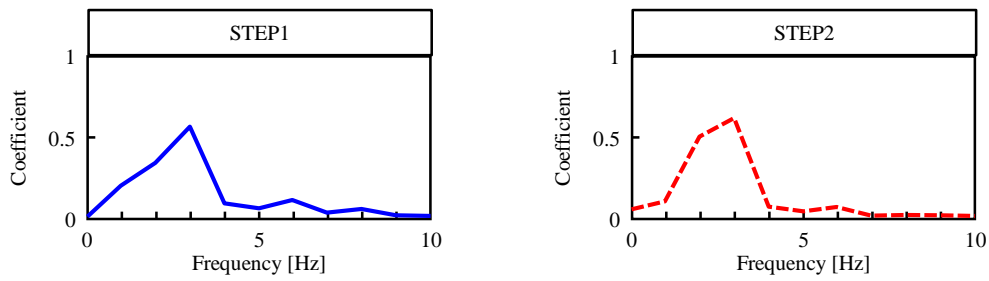
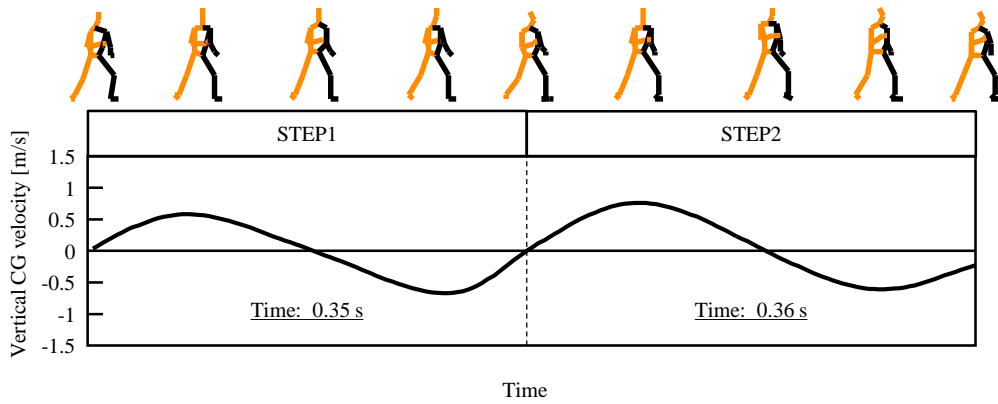
Evaluation value: 3.10

Minimum differences: 0.02

Timing: 100 %



Subject No. 4



Kicking speed: 16.64 m/s

Kicking time: 0.48 s

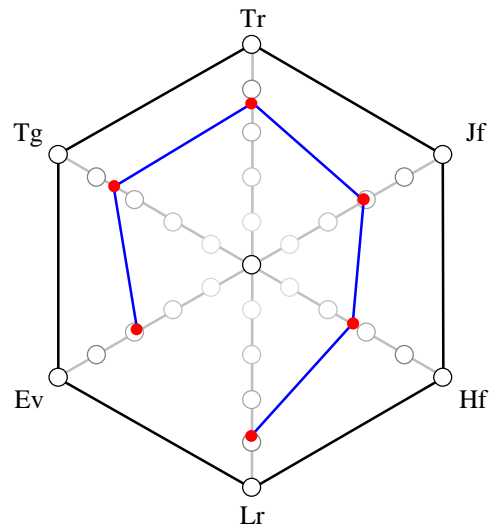
Affinity of amplitude: 0.69

Affinity of period: 0.78

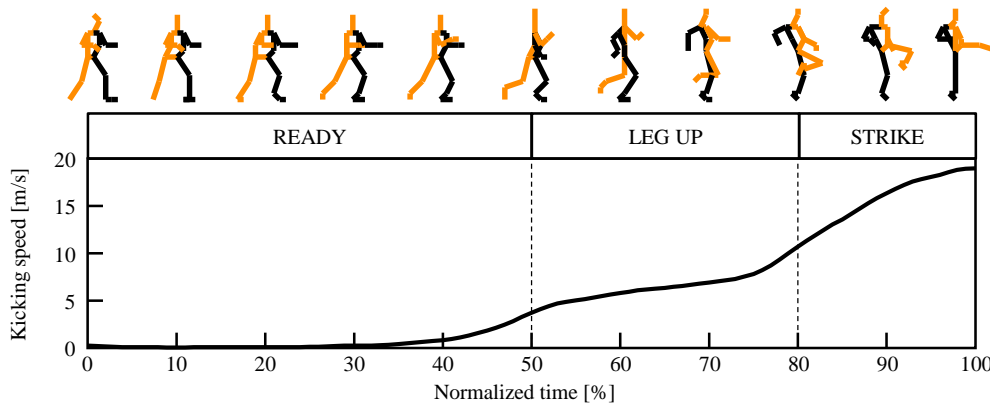
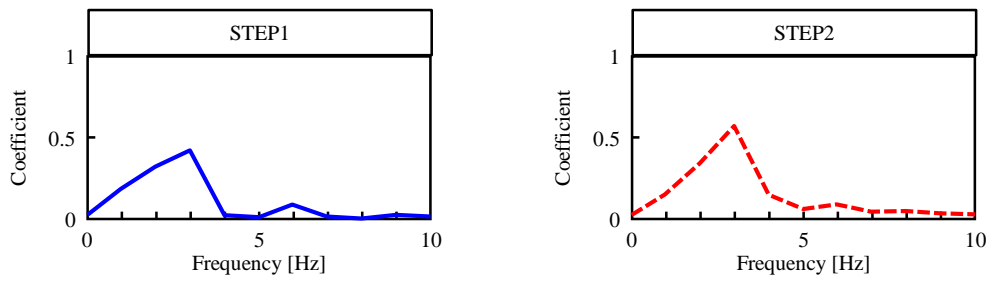
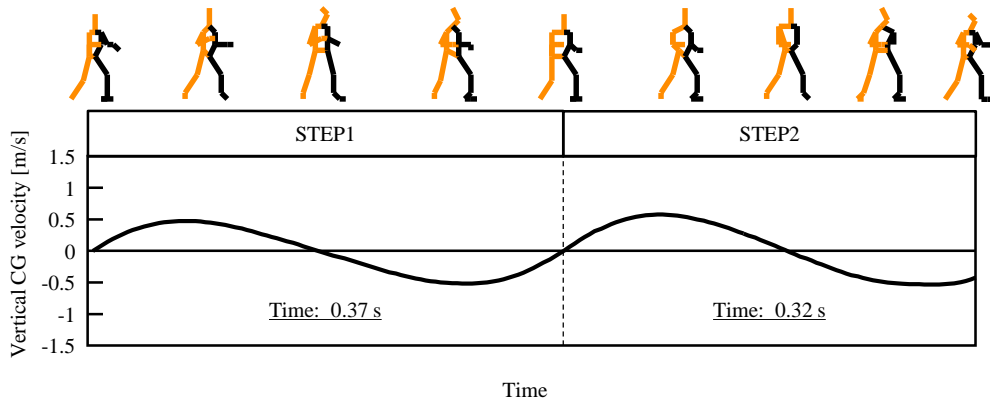
Evaluation value: 2.16

Minimum differences: 0.04

Timing: 100 %



Subject No. 5



Kicking speed: 18.99 m/s

Kicking time: 0.43 s

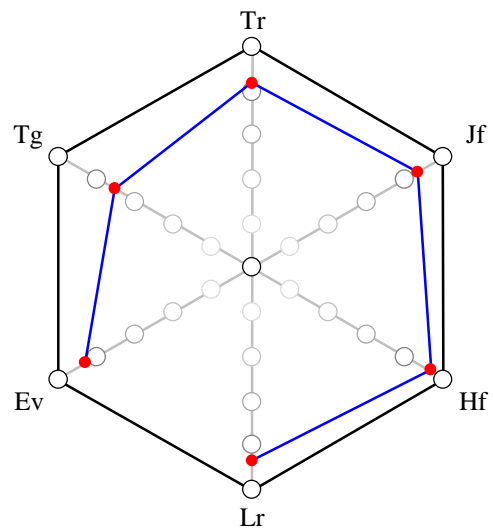
Affinity of amplitude: 0.80

Affinity of period: 0.84

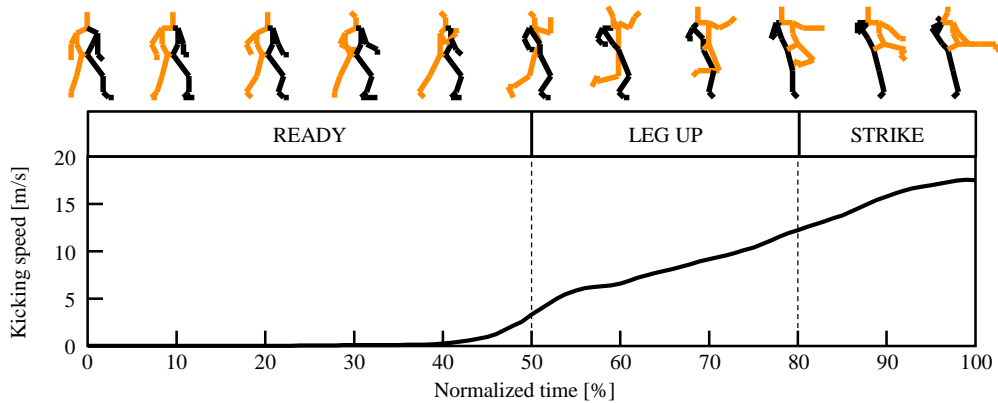
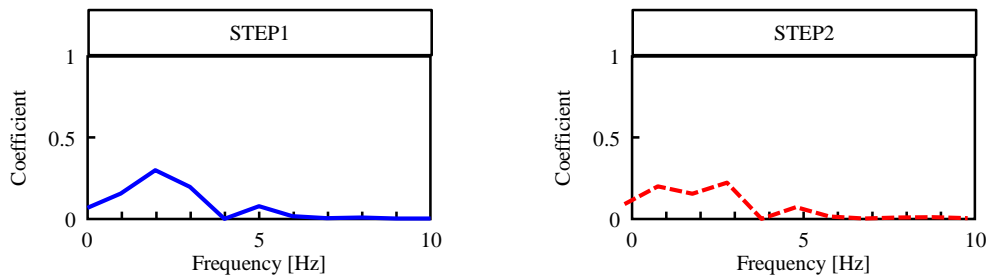
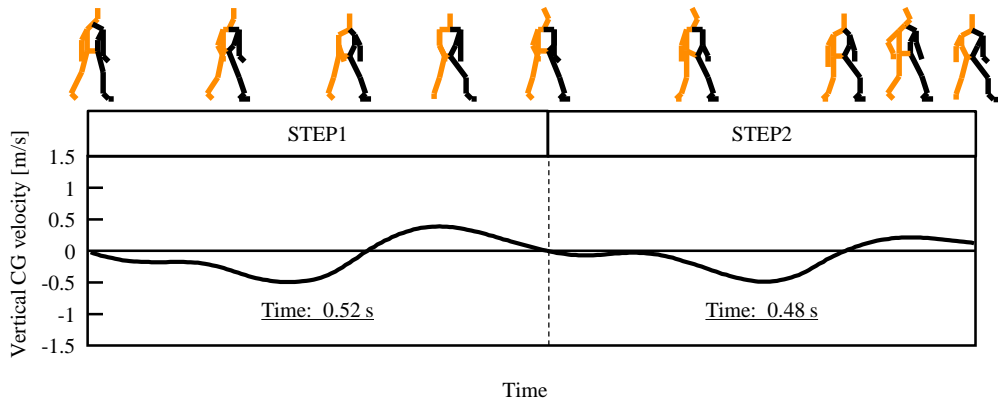
Evaluation value: 2.88

Minimum differences: 0.04

Timing: 100 %



Subject No. 6



Kicking speed: 17.54 m/s

Kicking time: 0.55 s

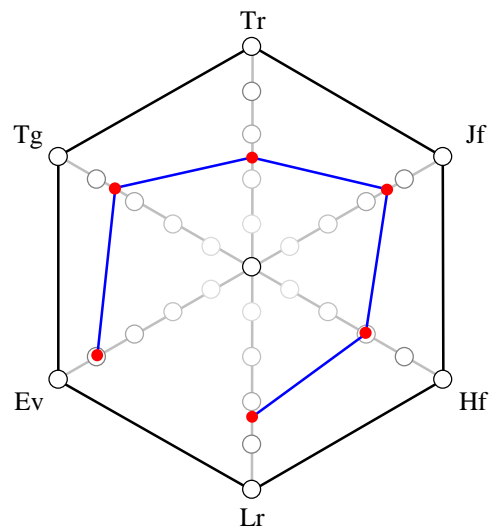
Affinity of amplitude: 0.55

Affinity of period: 0.75

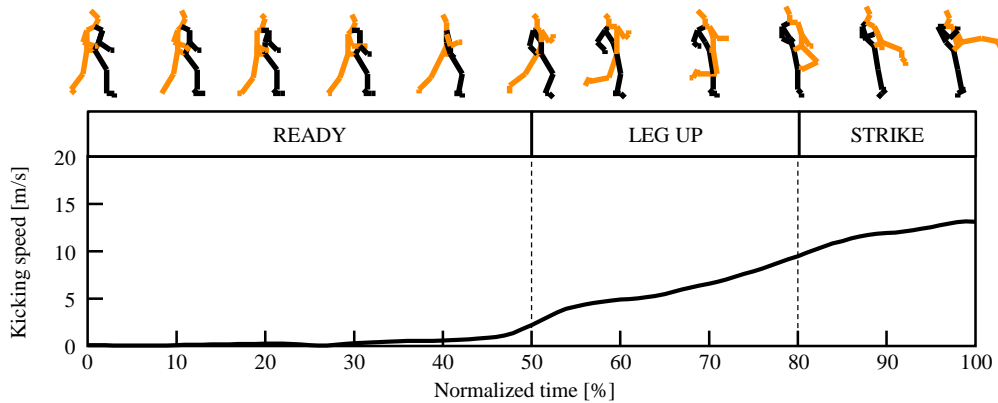
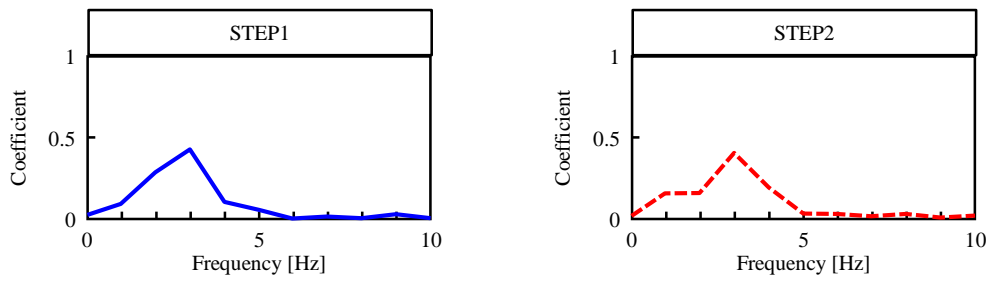
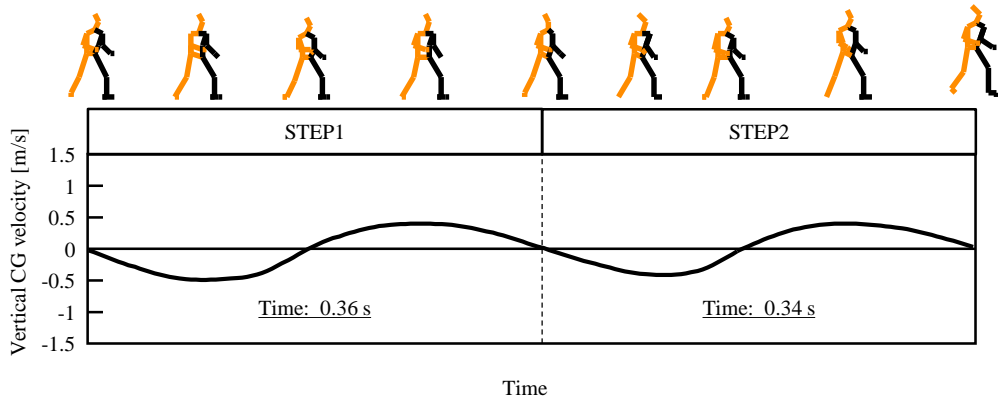
Evaluation value: 2.72

Minimum differences: 0.02

Timing: 100 %



Subject No. 7



Kicking speed: 13.13 m/s

Kicking time: 0.58 s

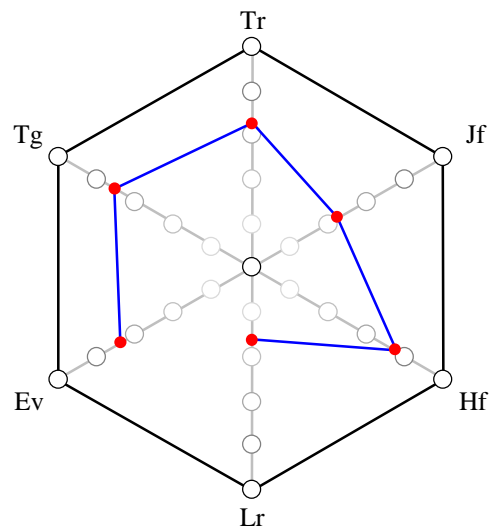
Affinity of amplitude: 0.84

Affinity of period: 0.74

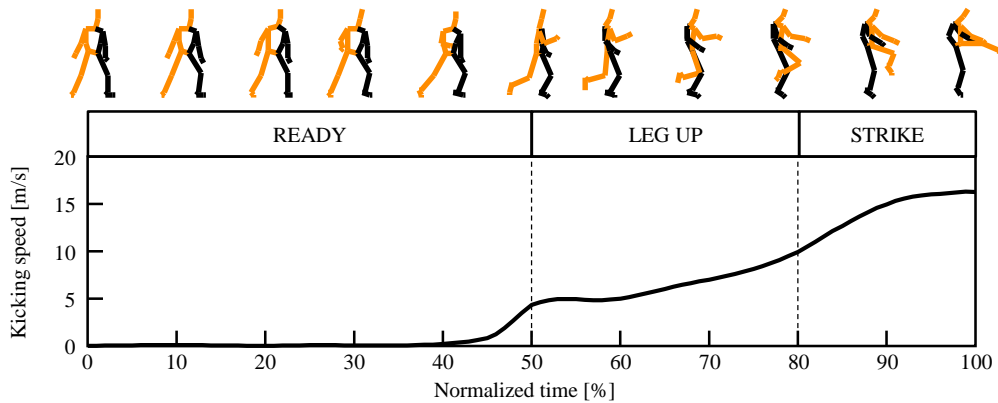
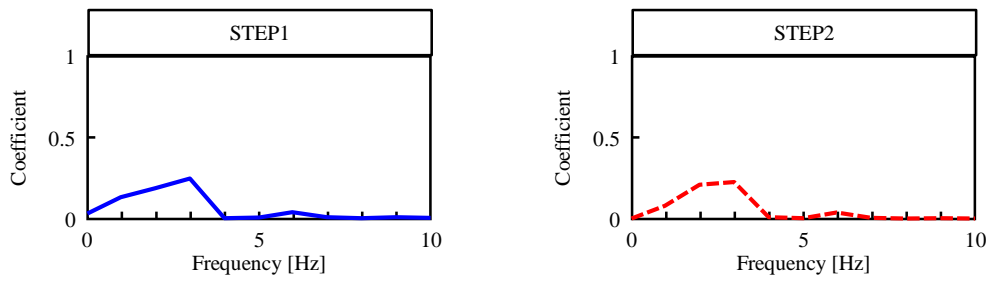
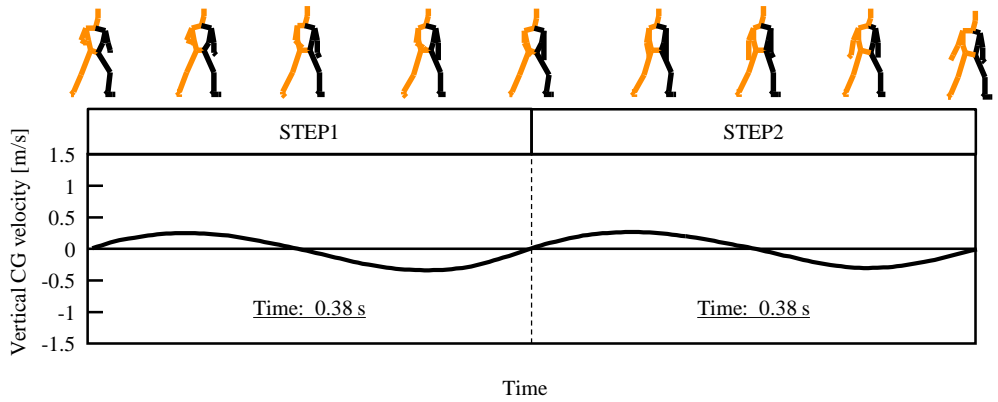
Evaluation value: 2.40

Minimum differences: 0.03

Timing: 100 %



Subject No. 8



Kicking speed: 16.31 m/s

Kicking time: 0.61 s

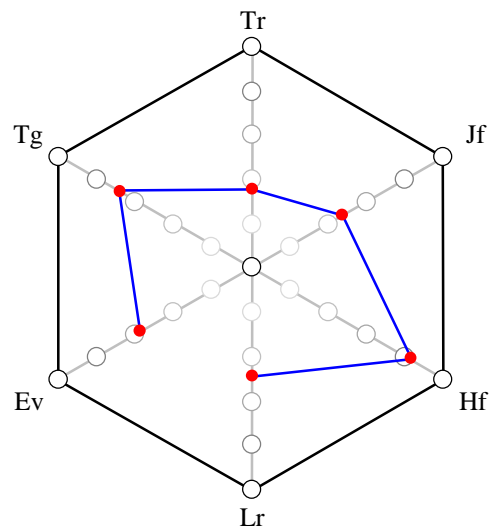
Affinity of amplitude: 0.84

Affinity of period: 0.87

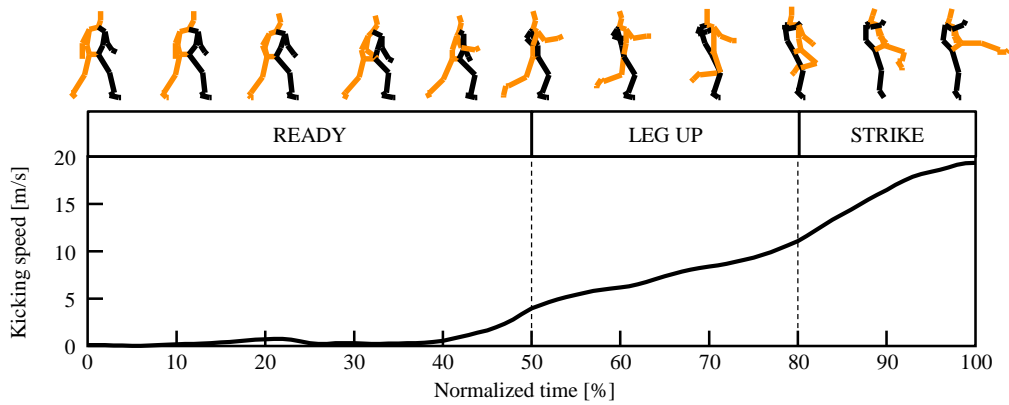
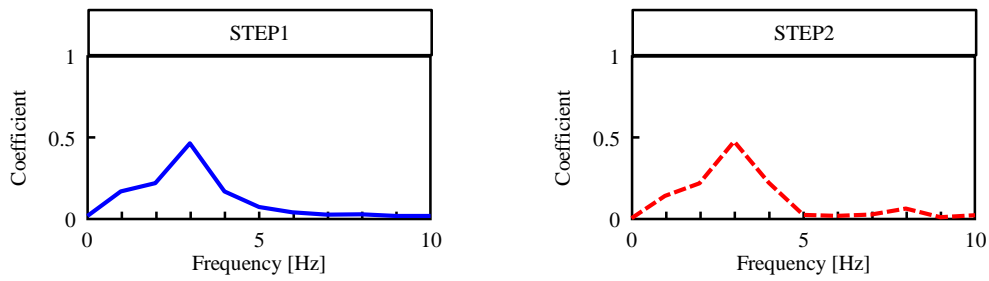
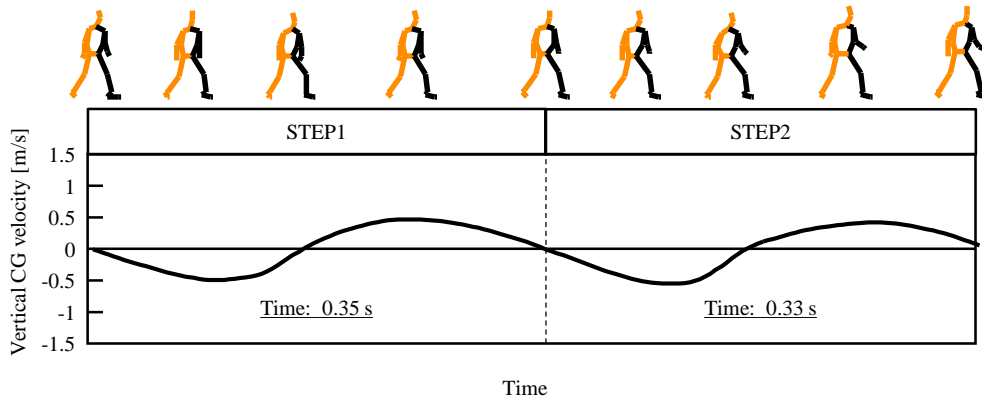
Evaluation value: 2.14

Minimum differences: 0.00

Timing: 96.9 %



Subject No. 9



Kicking speed: 19.37 m/s

Kicking time: 0.51 s

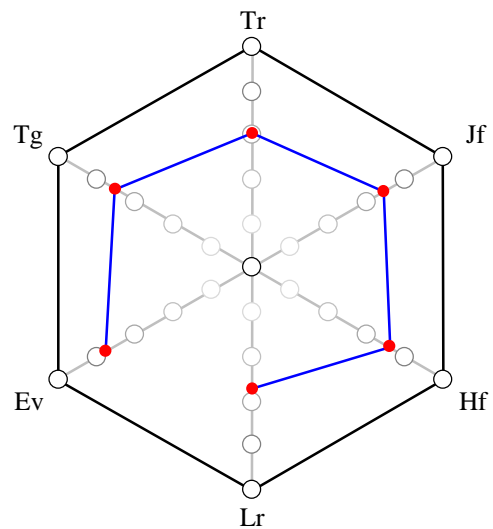
Affinity of amplitude: 0.81

Affinity of period: 0.84

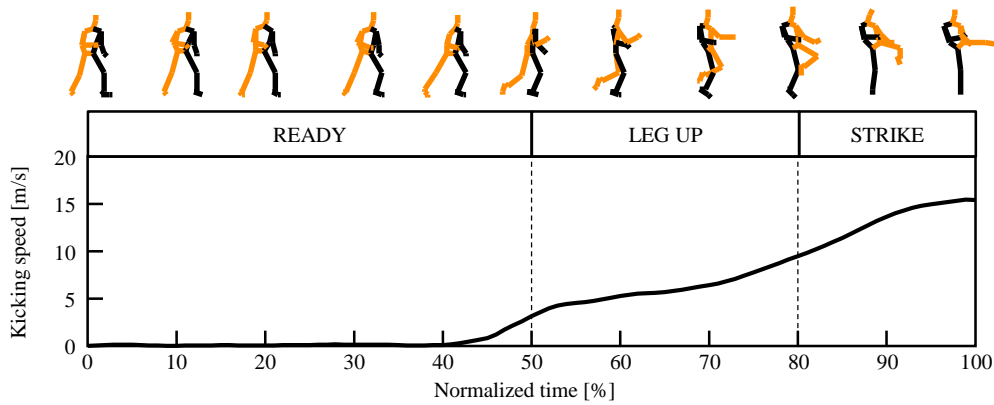
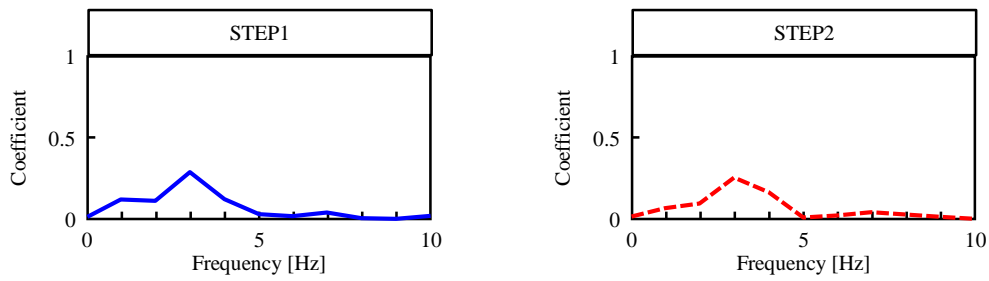
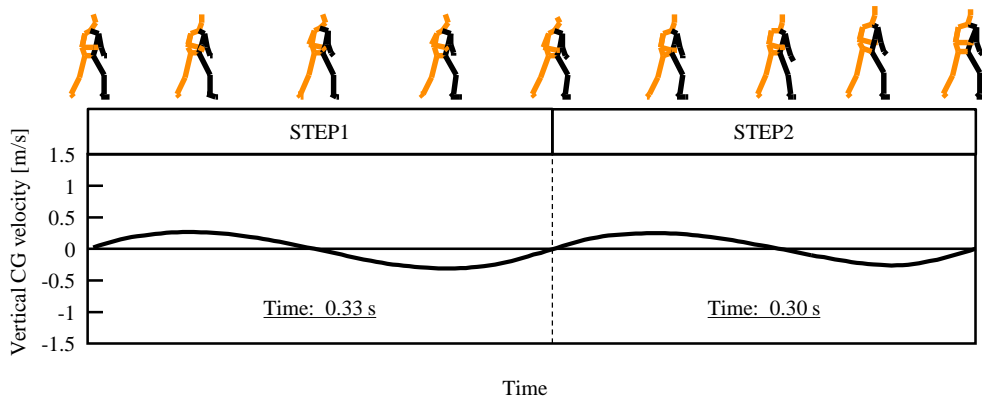
Evaluation value: 2.60

Minimum differences: 0.01

Timing: 100 %



Subject No. 10



Kicking speed: 15.44 m/s

Kicking time: 0.69 s

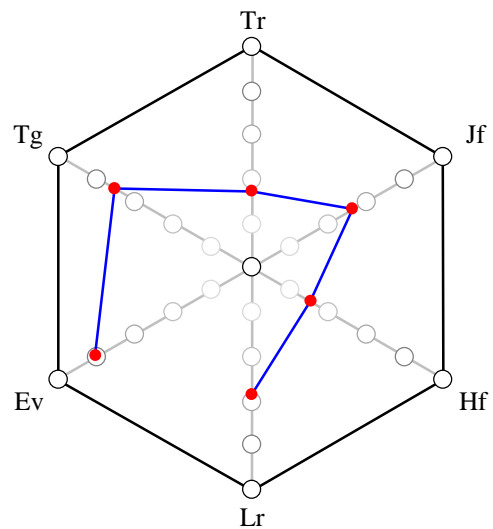
Affinity of amplitude: 0.79

Affinity of period: 0.80

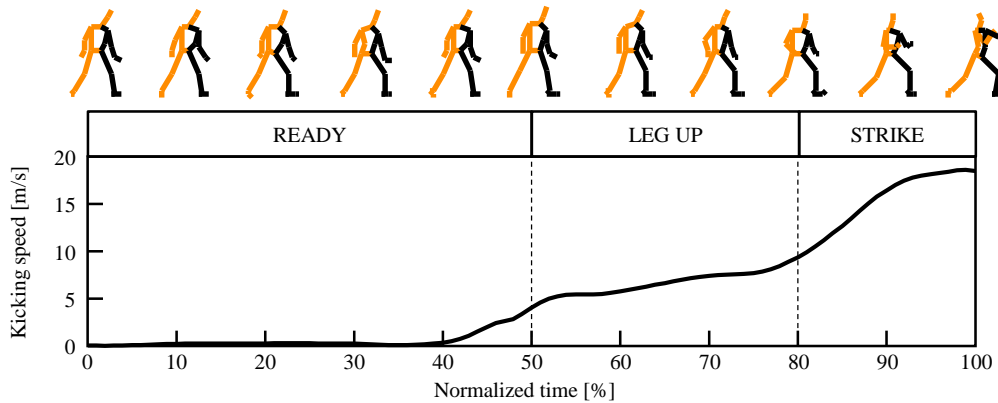
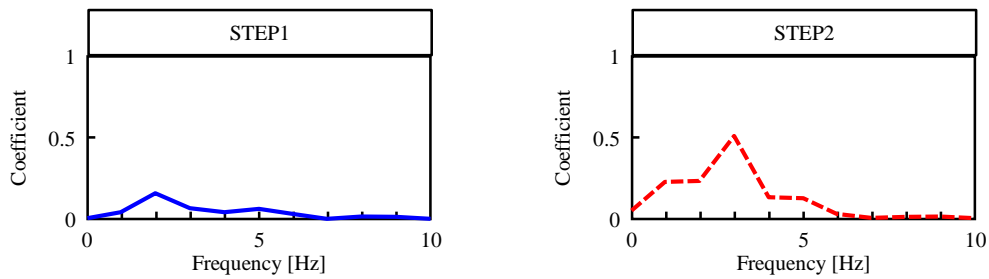
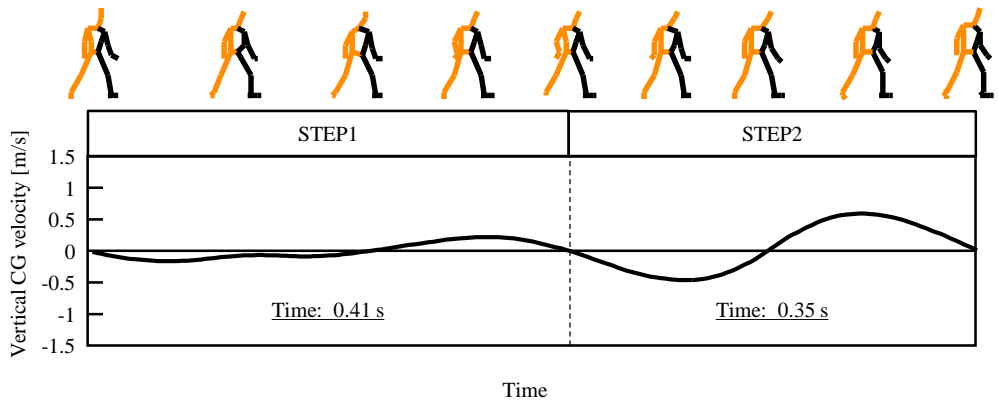
Evaluation value: 2.74

Minimum differences: 0.01

Timing: 100 %



Subject No. 11



Kicking speed: 18.53 m/s

Kicking time: 0.52 s

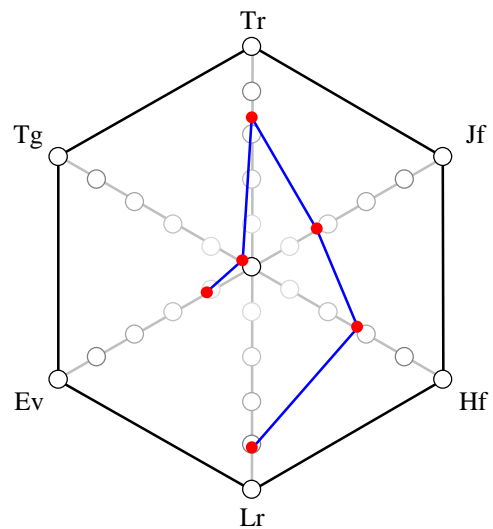
Affinity of amplitude: 0.13

Affinity of period: 0.29

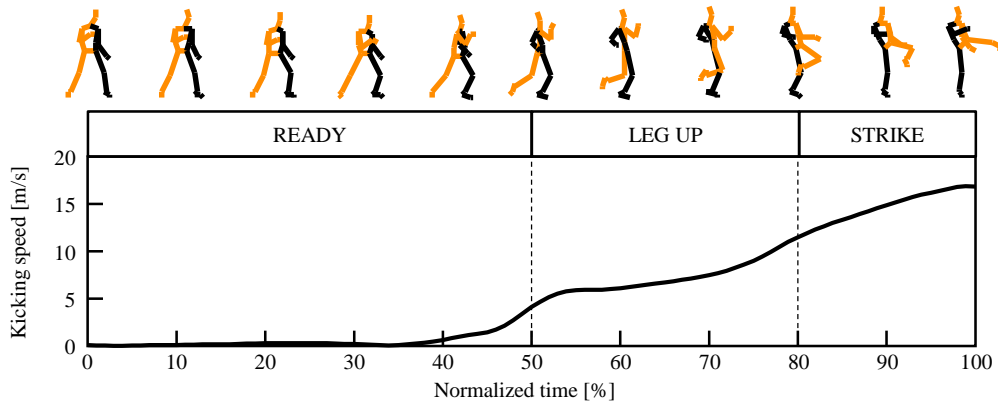
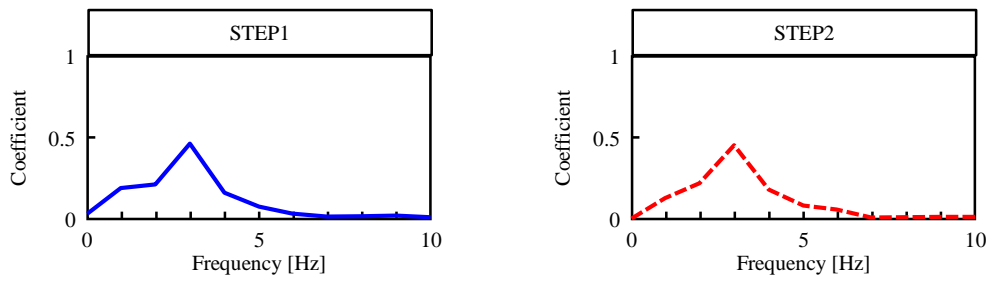
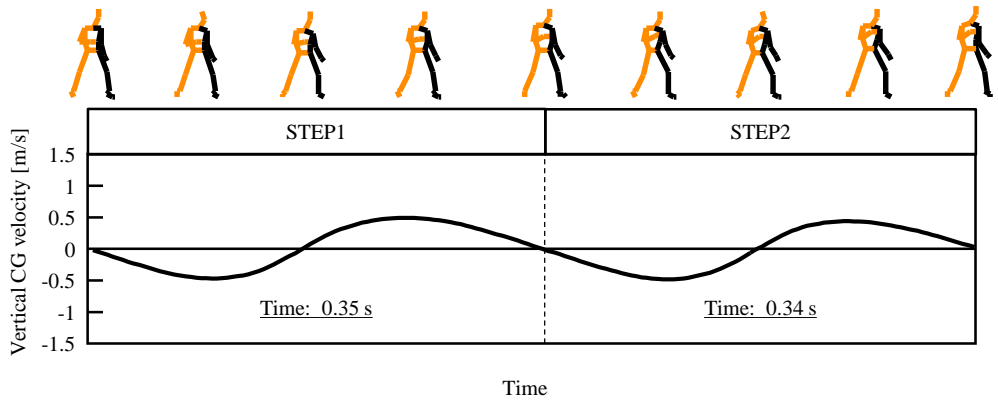
Evaluation value: 1.22

Minimum differences: 0.09

Timing: 10.3 %



Subject No. 12



Kicking speed: 16.89 m/s

Kicking time: 0.50 s

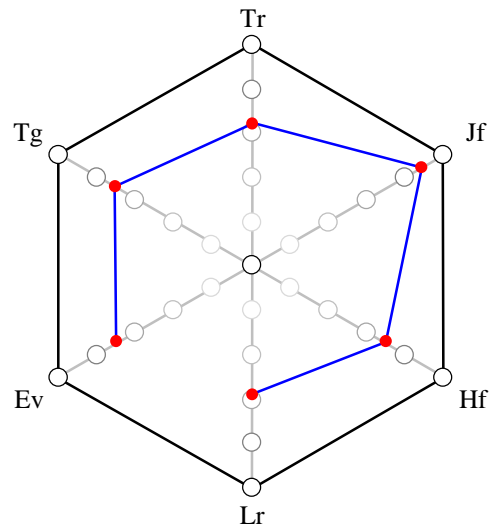
Affinity of amplitude: 0.86

Affinity of period: 0.88

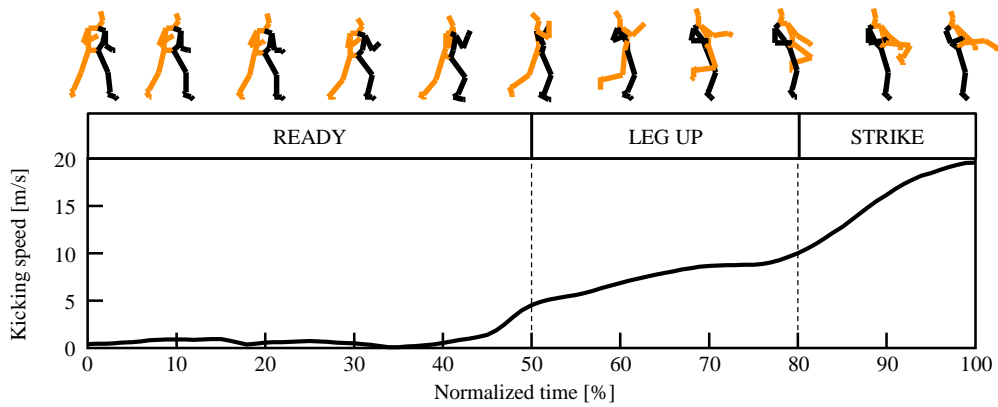
Evaluation value: 2.46

Minimum differences: 0.01

Timing: 100 %



Subject No. 13



Kicking speed: 19.61 m/s

Kicking time: 0.45 s

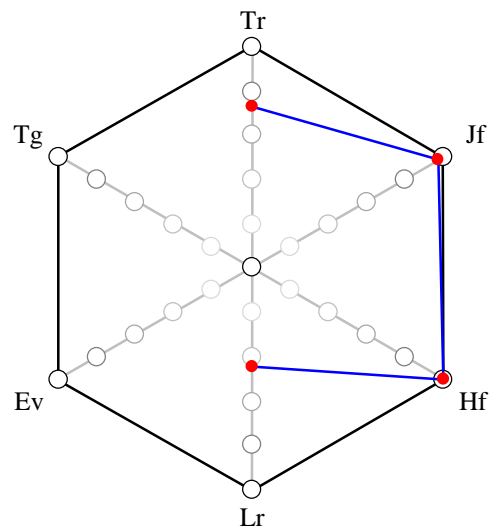
Affinity of amplitude: -

Affinity of period: -

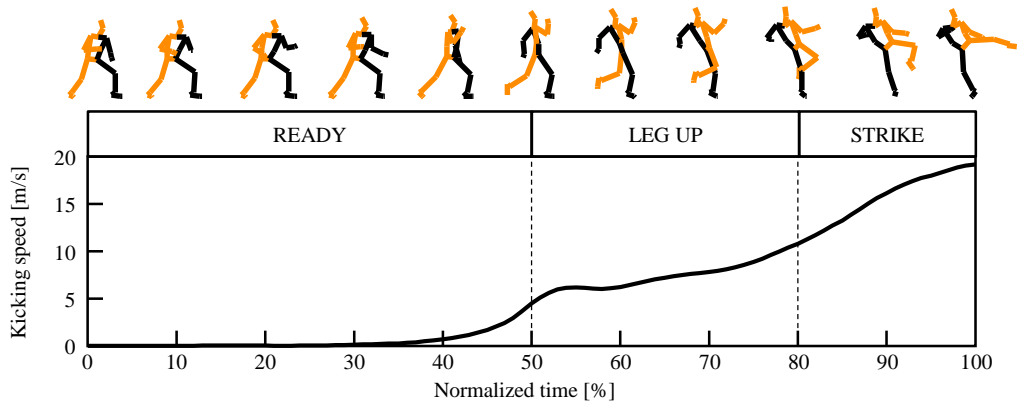
Evaluation value: -

Minimum differences: -

Timing: - %



Subject No. 14



Kicking speed: 19.19 m/s

Kicking time: 0.45 s

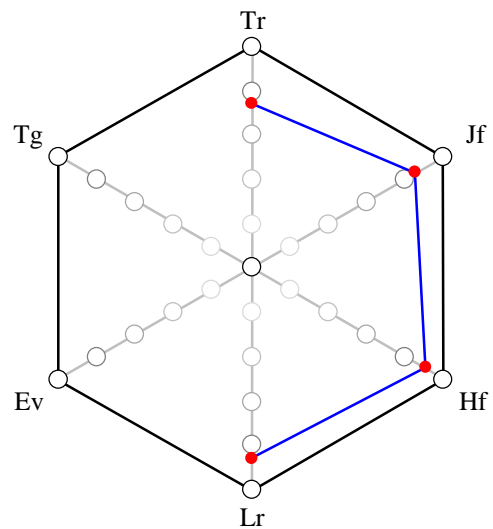
Affinity of amplitude: -

Affinity of period: -

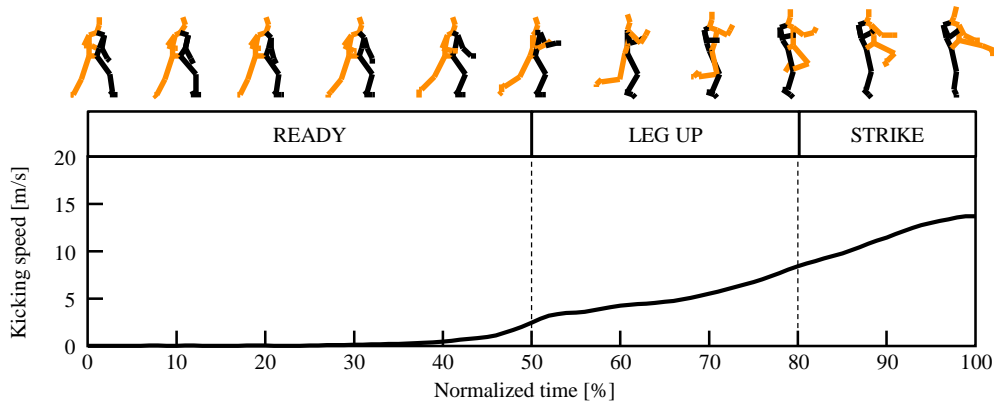
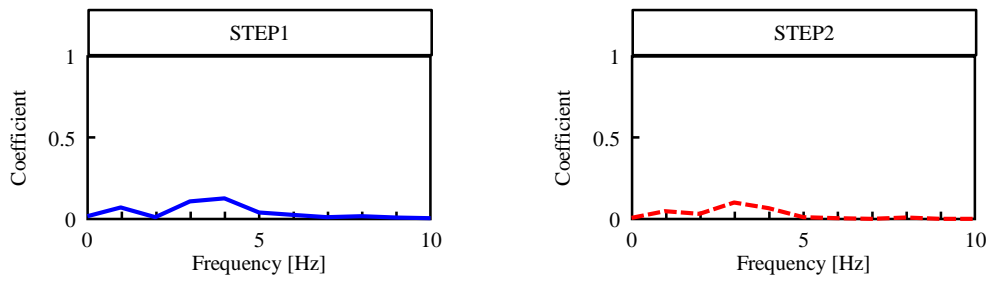
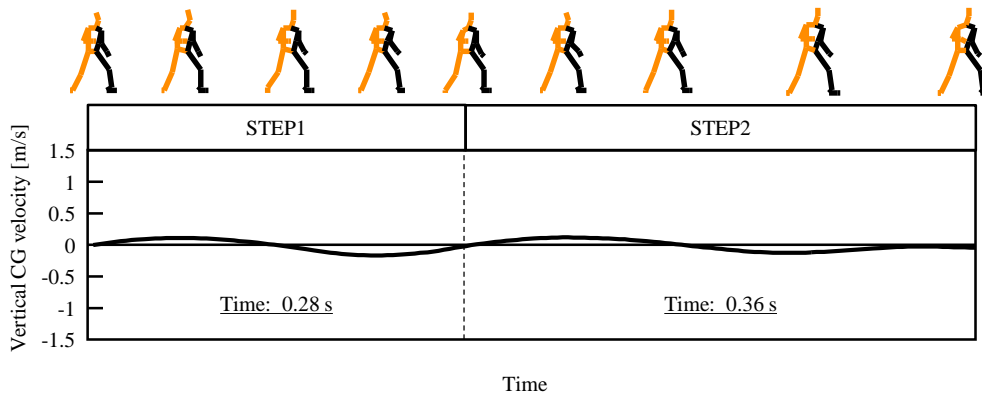
Evaluation value: -

Minimum differences: -

Timing: - %



Subject No. 15



Kicking speed: 13.73 m/s

Kicking time: 0.59 s

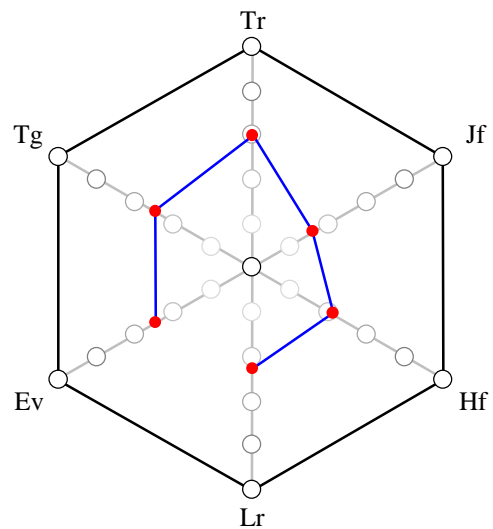
Affinity of amplitude: 0.71

Affinity of period: 0.59

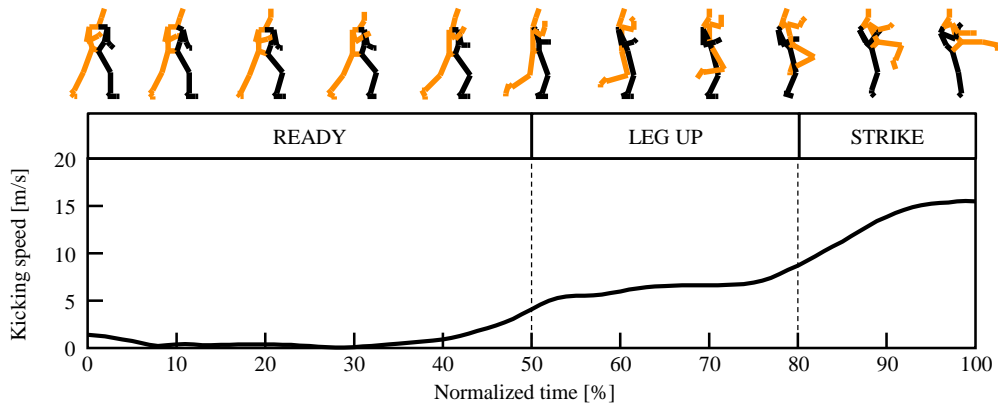
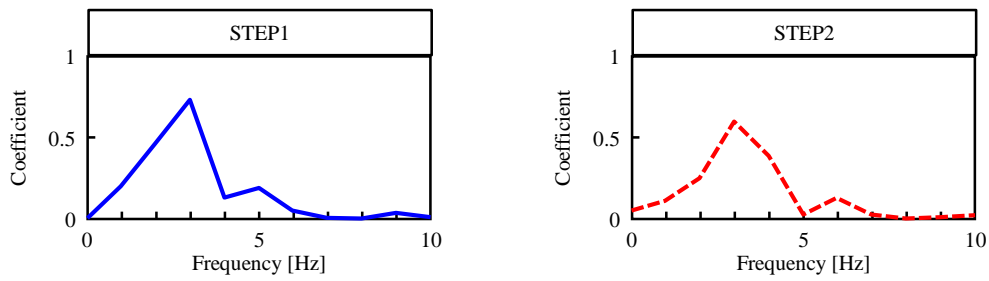
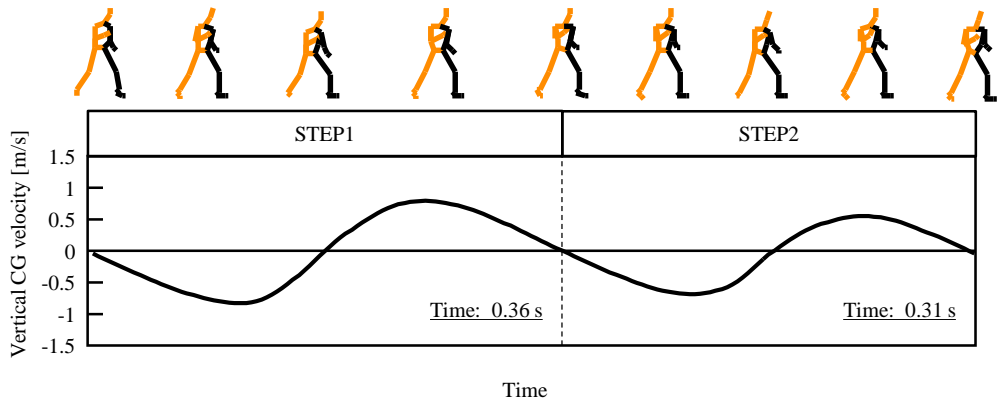
Evaluation value: 1.92

Minimum differences: 0.00

Timing: 71.9 %



Subject No. 16



Kicking speed: 15.52 m/s

Kicking time: 0.47 s

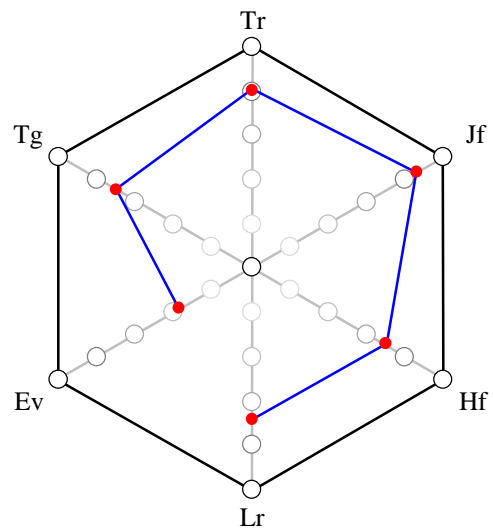
Affinity of amplitude: 0.57

Affinity of period: 0.56

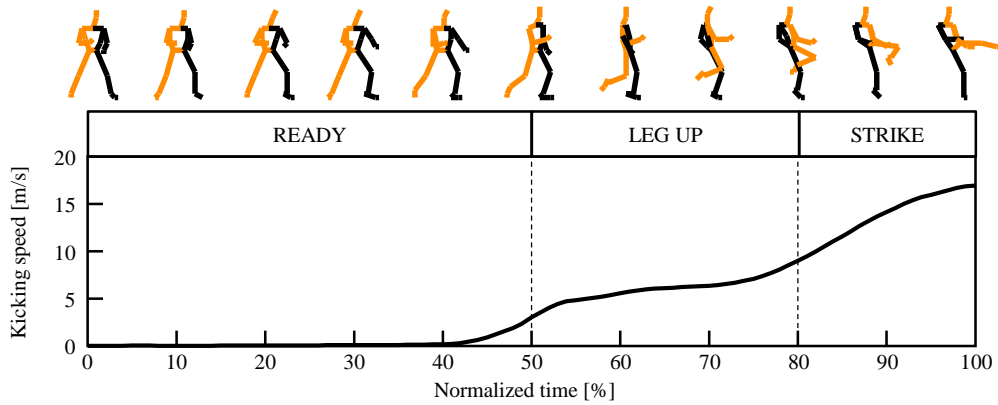
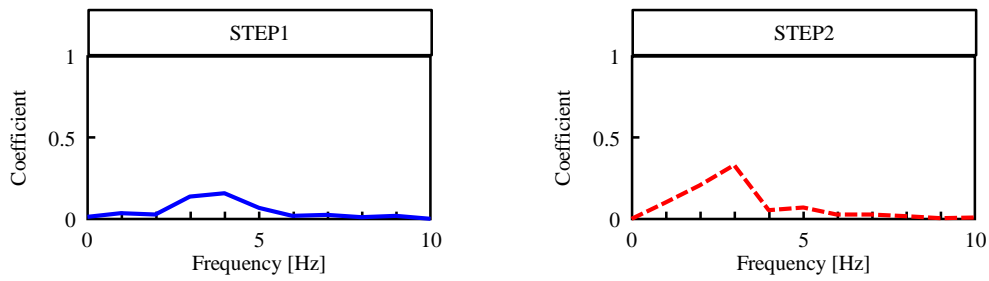
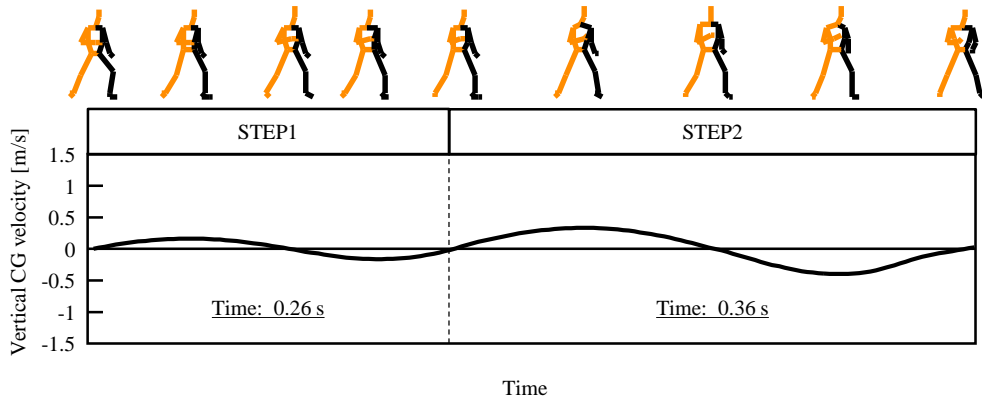
Evaluation value: 1.60

Minimum differences: 0.17

Timing: 98.7 %



Subject No. 17



Kicking speed: 16.94 m/s

Kicking time: 0.62 s

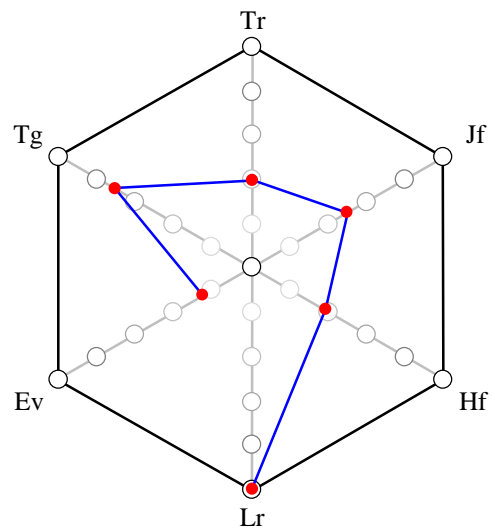
Affinity of amplitude: 0.20

Affinity of period: 0.30

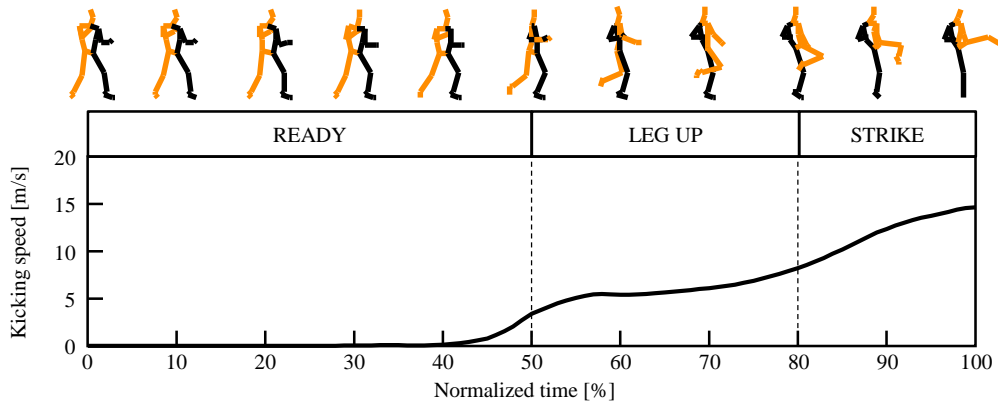
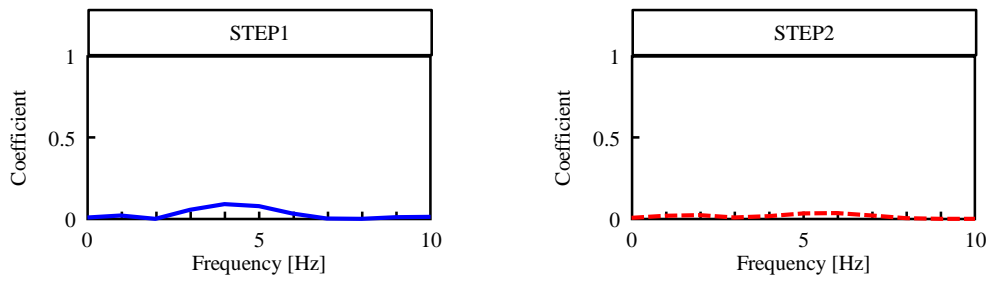
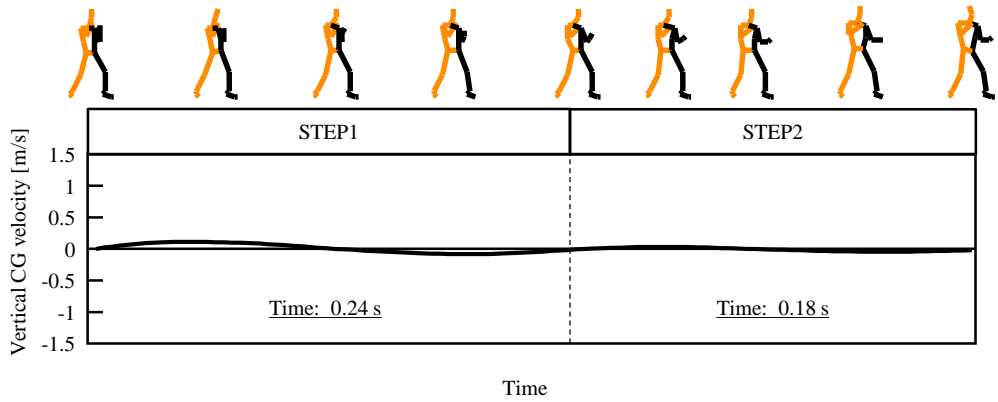
Evaluation value: 1.28

Minimum differences: 0.08

Timing: 100 %



Subject No. 18



Kicking speed: 14.66 m/s

Kicking time: 0.70 s

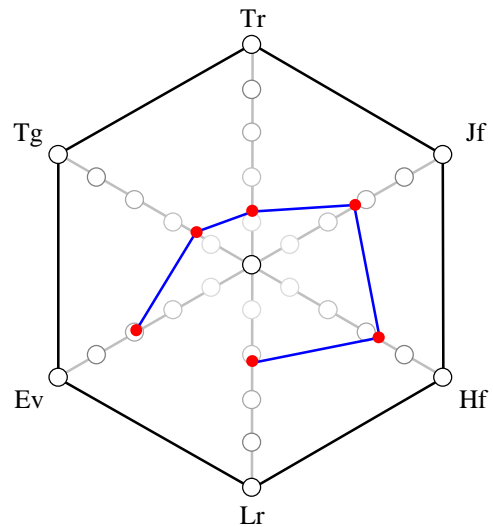
Affinity of amplitude: 0.15

Affinity of period: 0.32

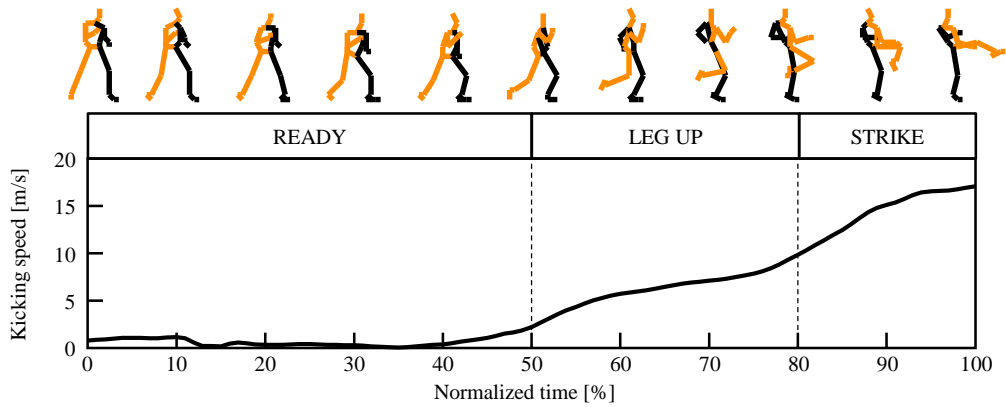
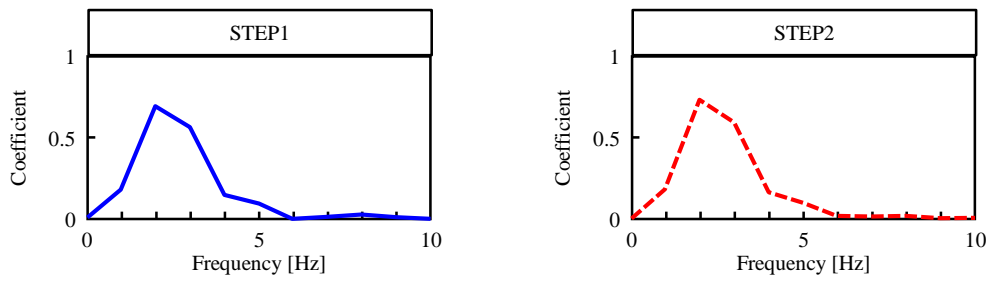
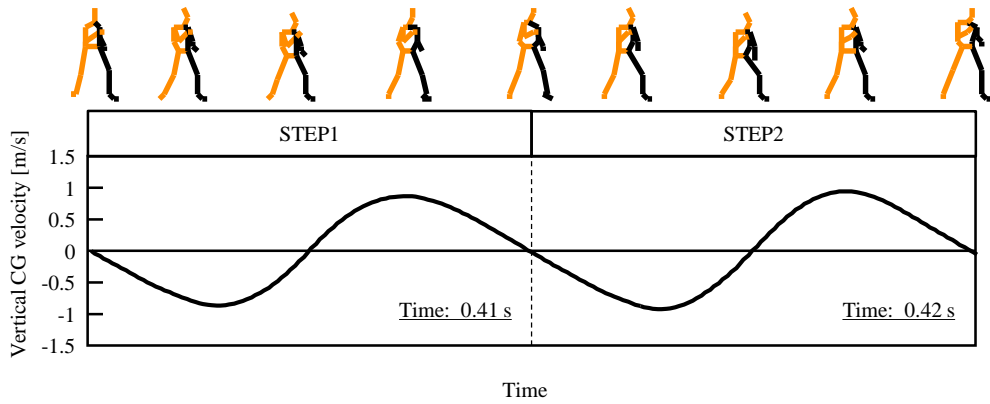
Evaluation value: 2.19

Minimum differences: 0.01

Timing: 42.2 %



Subject No. 19



Kicking speed: 17.12 m/s

Kicking time: 0.5 s

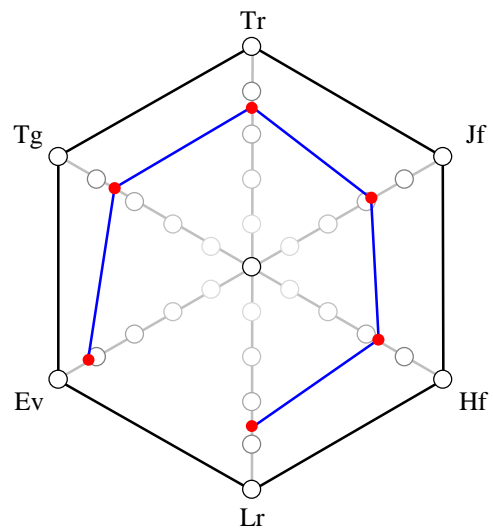
Affinity of amplitude: 0.86

Affinity of period: 0.99

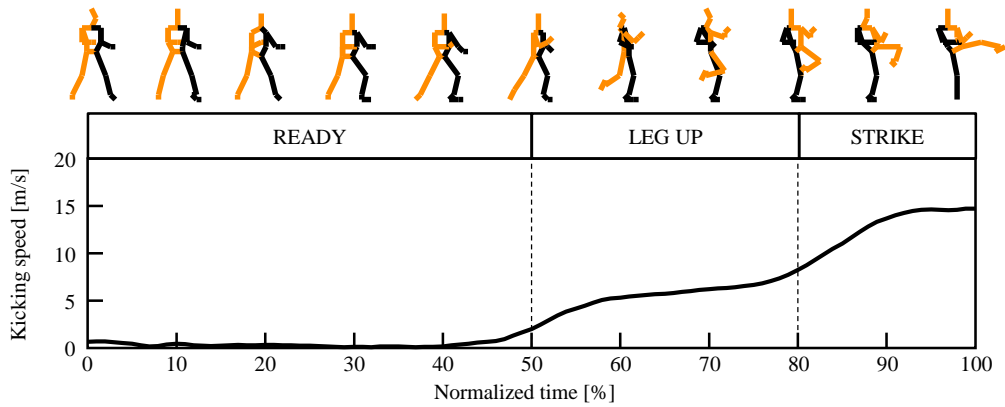
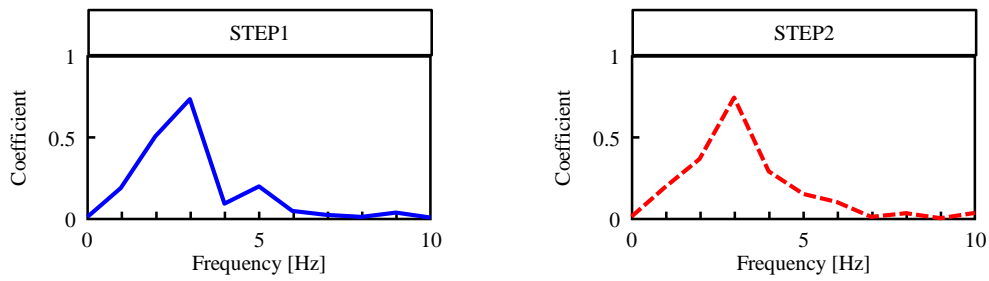
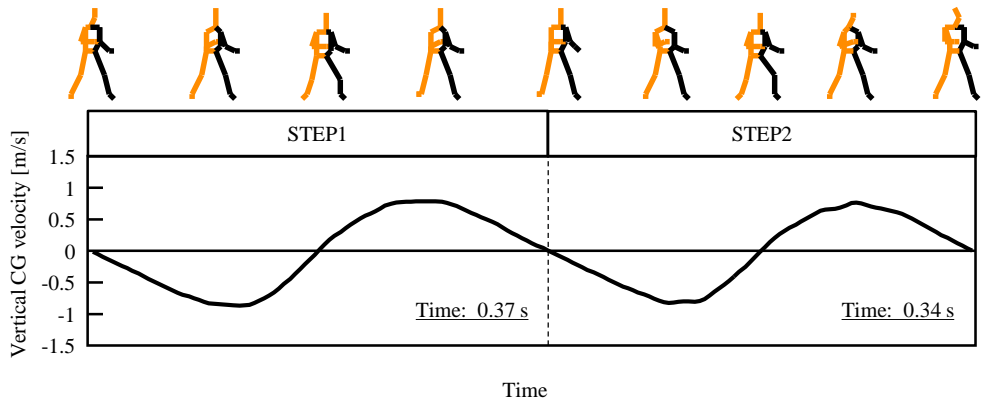
Evaluation value: 2.83

Minimum differences: 0.00

Timing: 100 %



Subject No. 20



Kicking speed: 14.74 m/s

Kicking time: 0.51 s

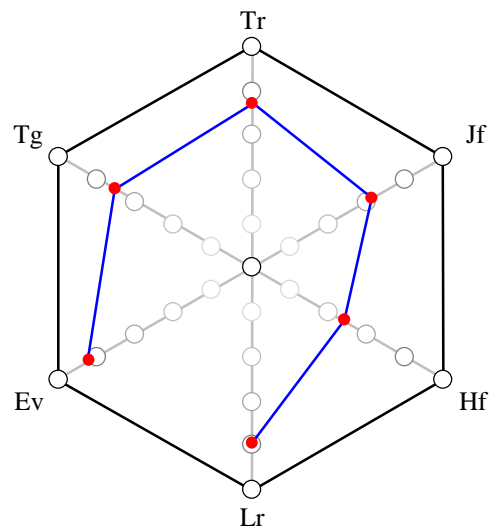
Affinity of amplitude: 0.93

Affinity of period: 0.61

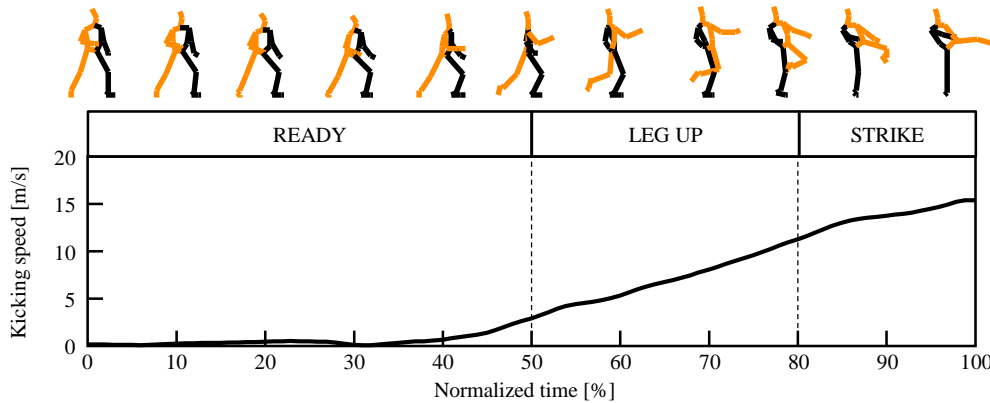
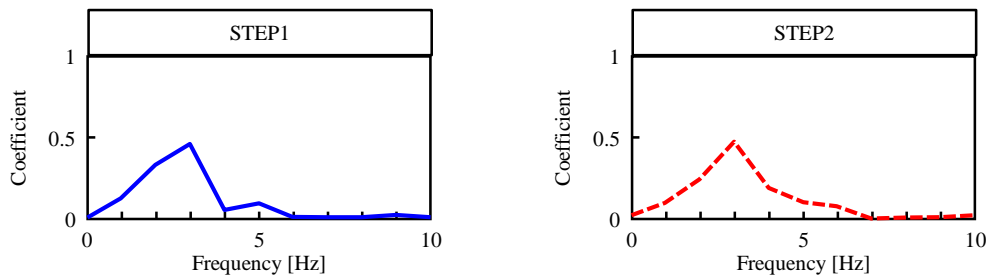
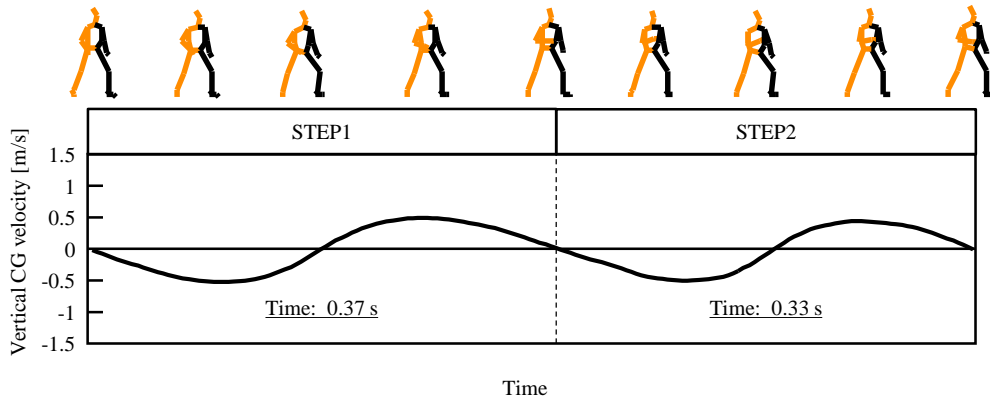
Evaluation value: 2.83

Minimum differences: 0.07

Timing: 100 %



Subject No. 21



Kicking speed: 15.39 m/s

Kicking time: 0.50 s

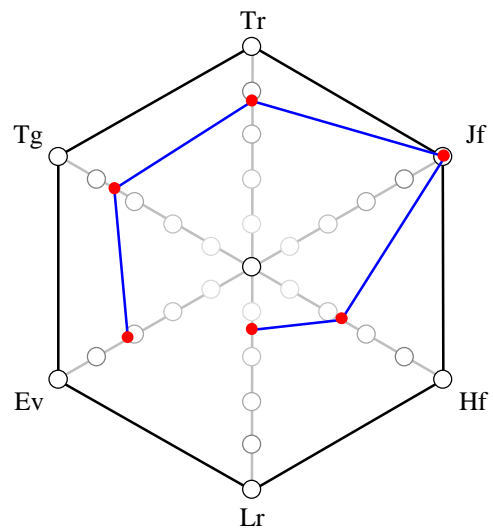
Affinity of amplitude: 0.86

Affinity of period: 0.68

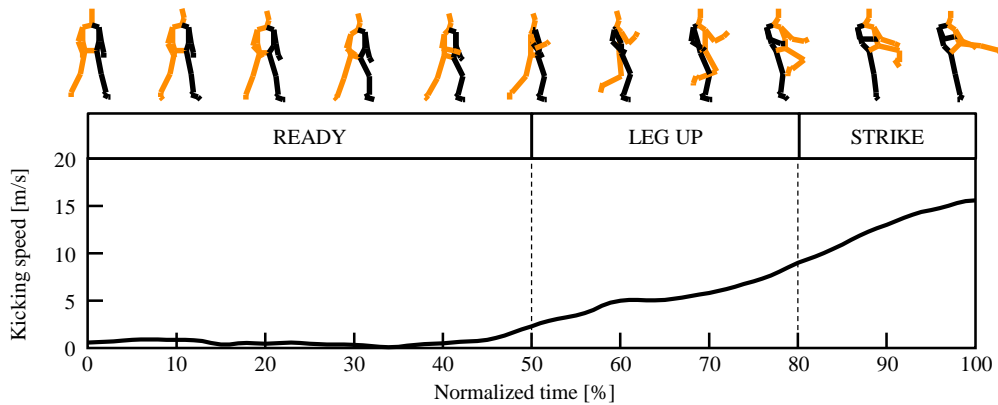
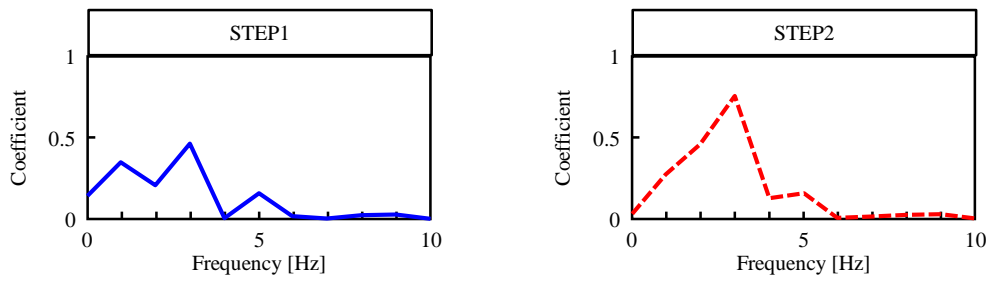
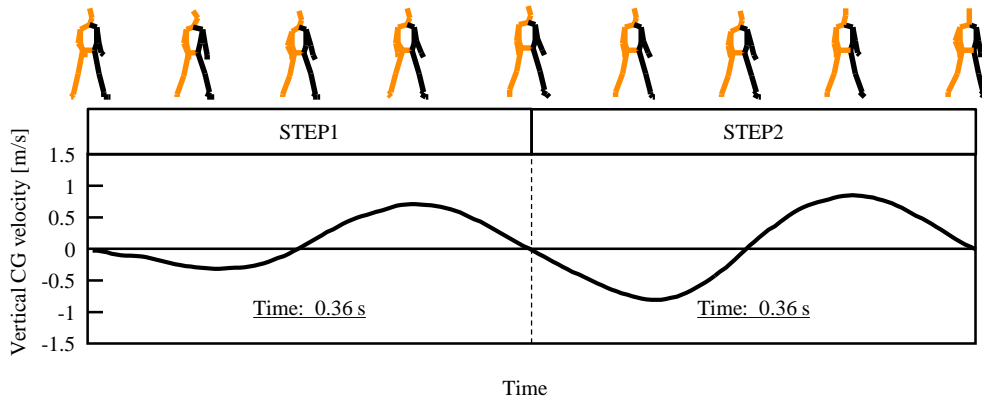
Evaluation value: 2.29

Minimum differences: 0.03

Timing: 100 %



Subject No. 22



Kicking speed: 15.61 m/s

Kicking time: 0.50 s

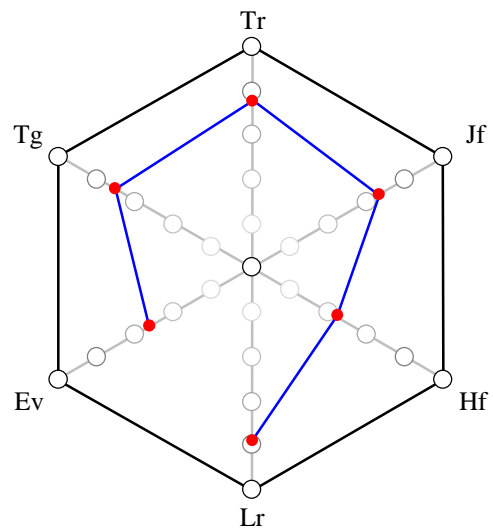
Affinity of amplitude: 0.32

Affinity of period: 0.94

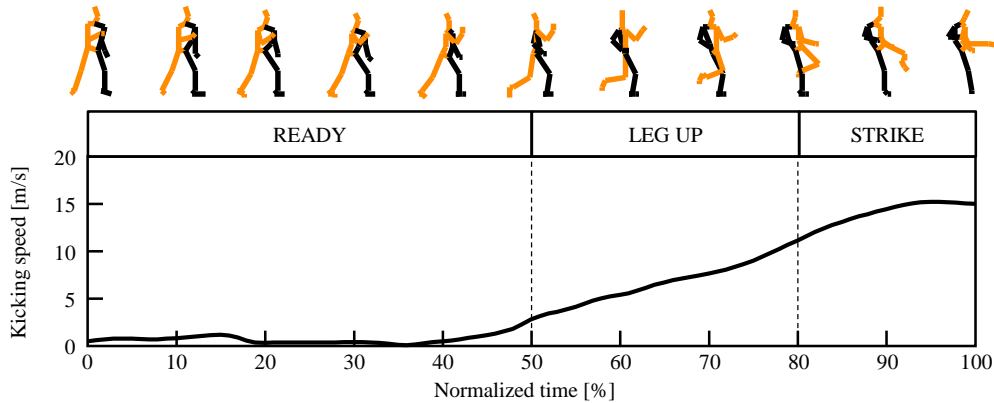
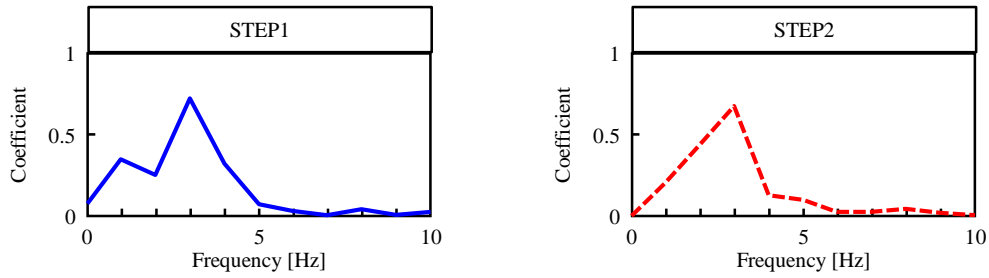
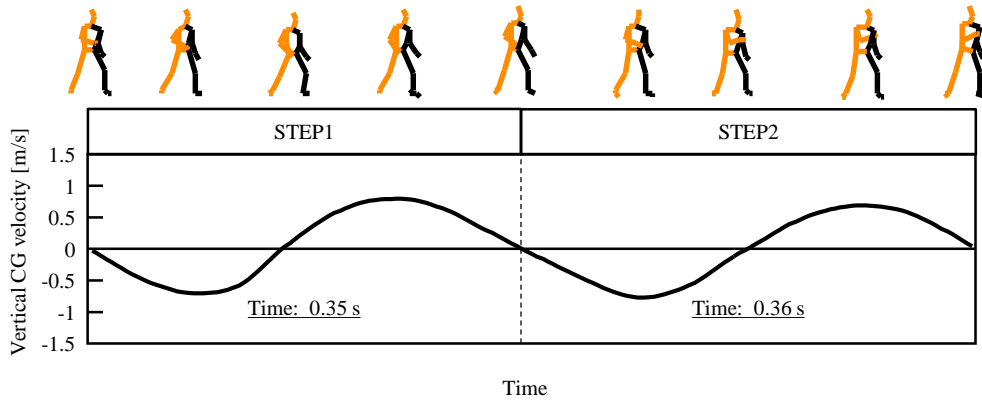
Evaluation value: 2.01

Minimum differences: 0.18

Timing: 100 %



Subject No. 23



Kicking speed: 15.04 m/s

Kicking time: 0.45 s

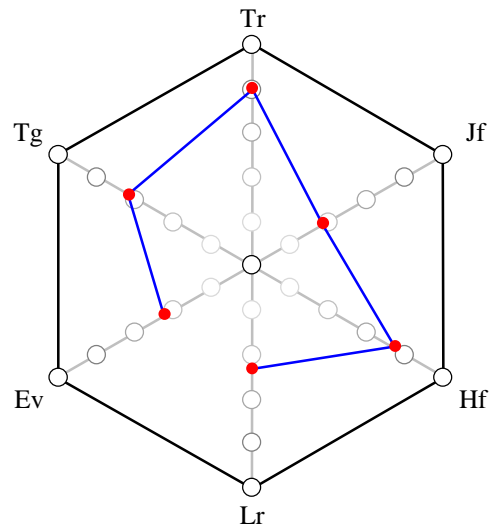
Affinity of amplitude: 0.79

Affinity of period: 0.70

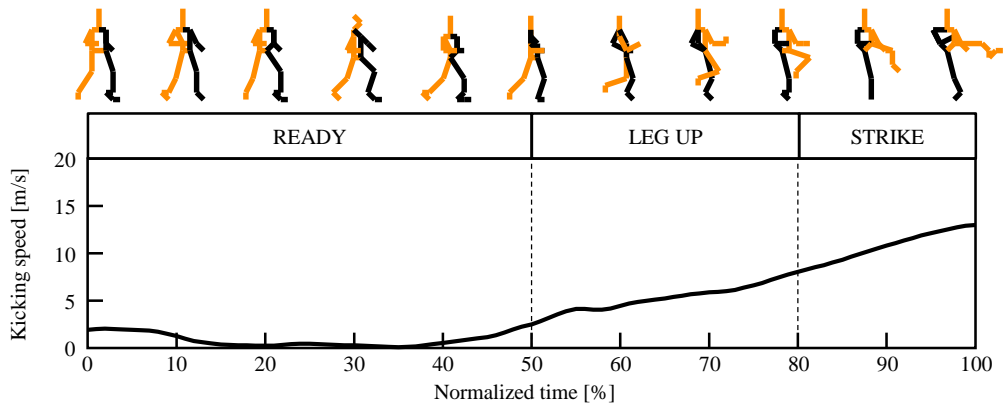
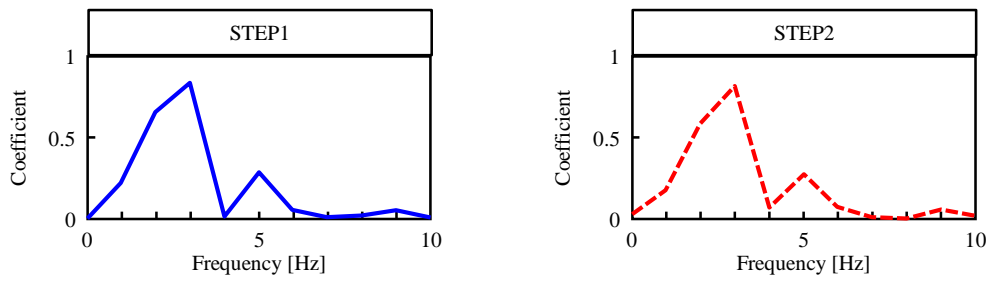
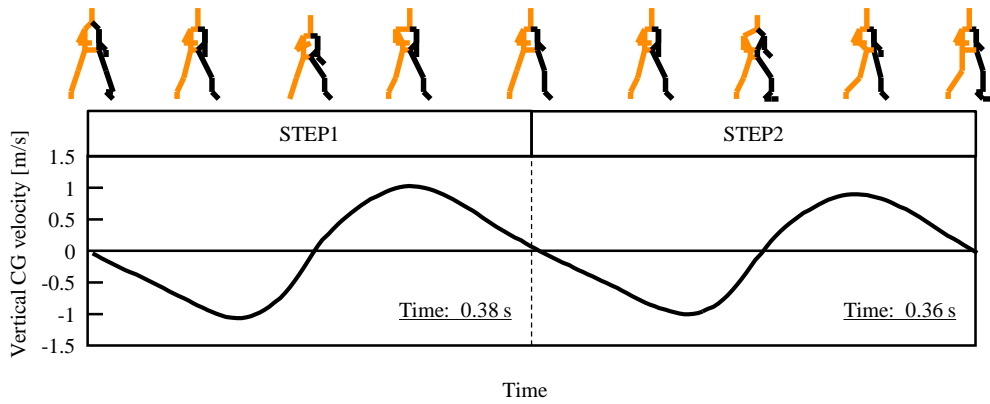
Evaluation value: 1.80

Minimum differences: 0.09

Timing: 89.9 %



Subject No. 24



Kicking speed: 13.03 m/s

Kicking time: 0.47 s

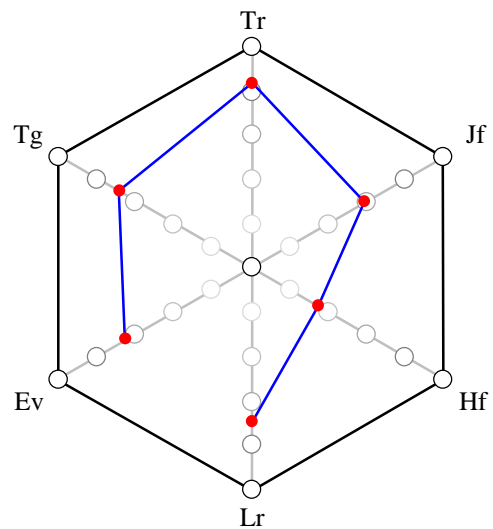
Affinity of amplitude: 0.82

Affinity of period: 0.92

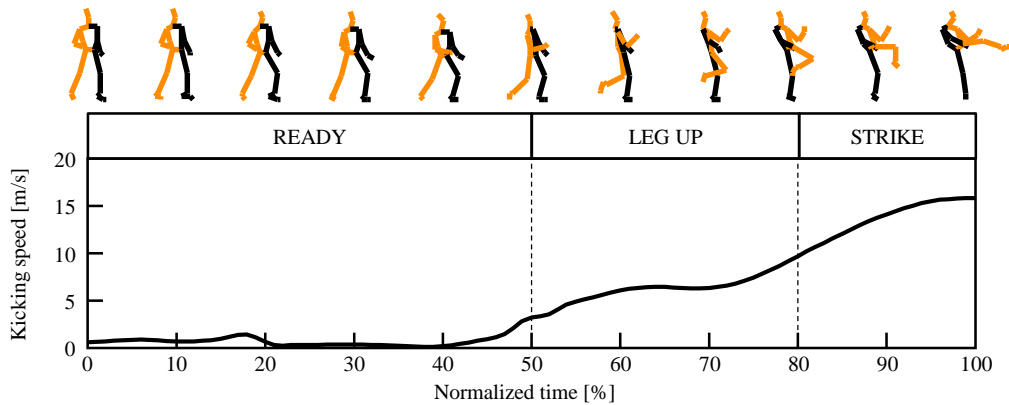
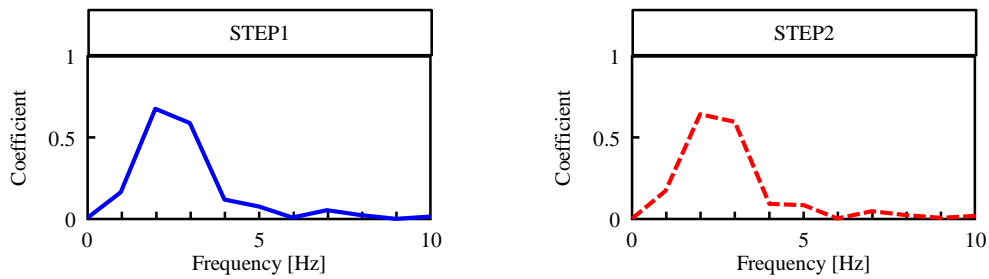
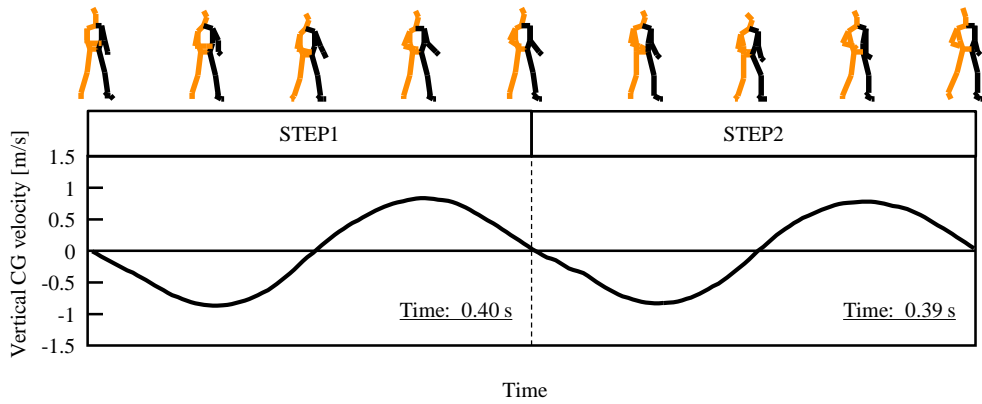
Evaluation value: 2.33

Minimum differences: 0.01

Timing: 96.7 %



Subject No. 25



Kicking speed: 15.86 m/s

Kicking time: 0.45 s

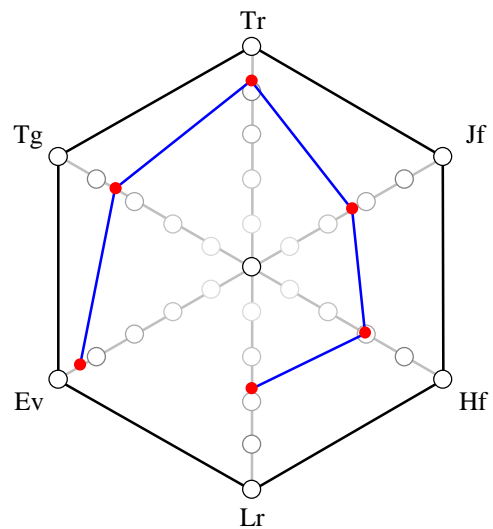
Affinity of amplitude: 0.90

Affinity of period: 0.93

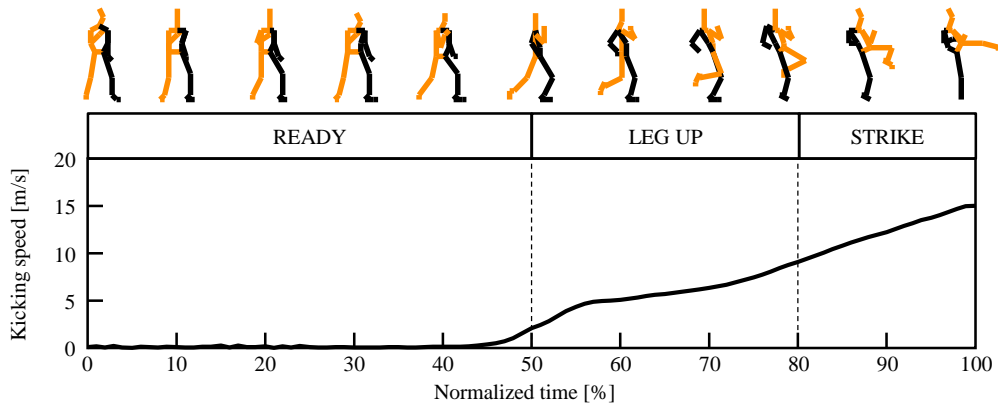
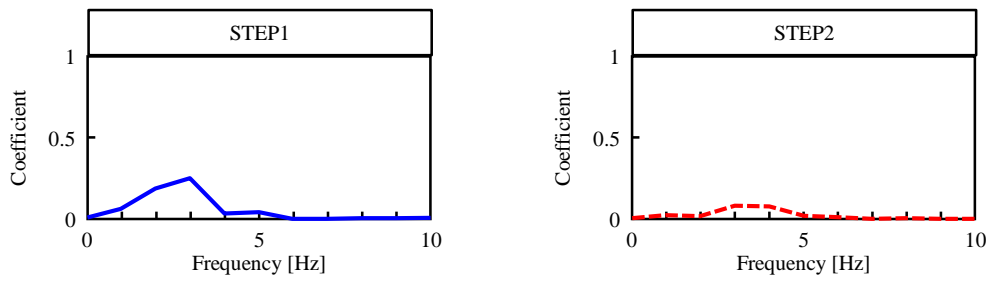
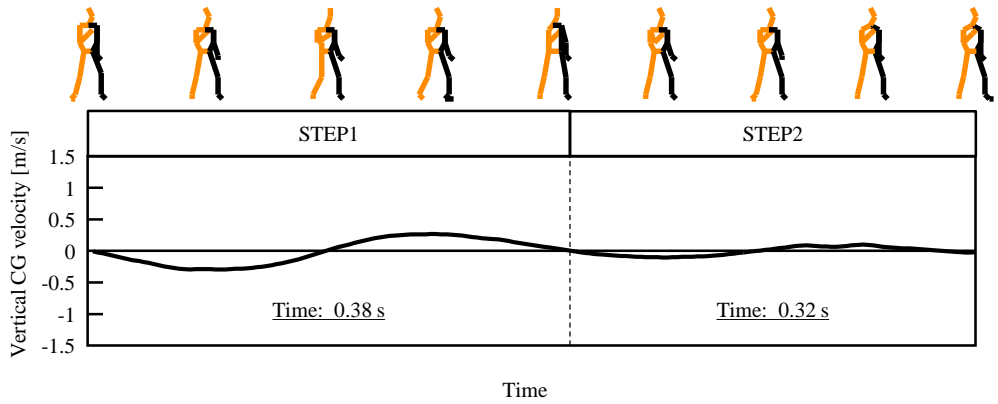
Evaluation value: 2.94

Minimum differences: 0.00

Timing: 99.0 %



Subject No. 26



Kicking speed: 15.02 m/s

Kicking time: 0.72 s

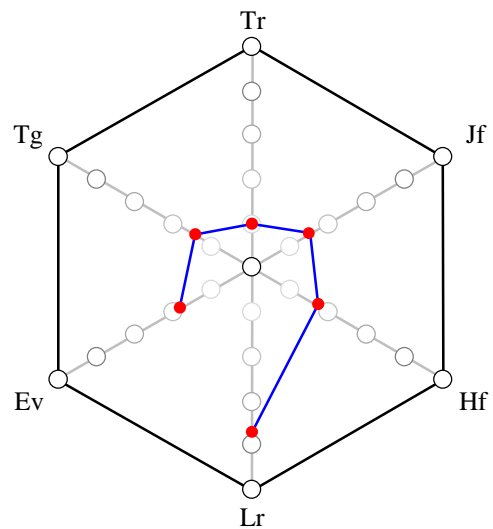
Affinity of amplitude: 0.13

Affinity of period: 0.40

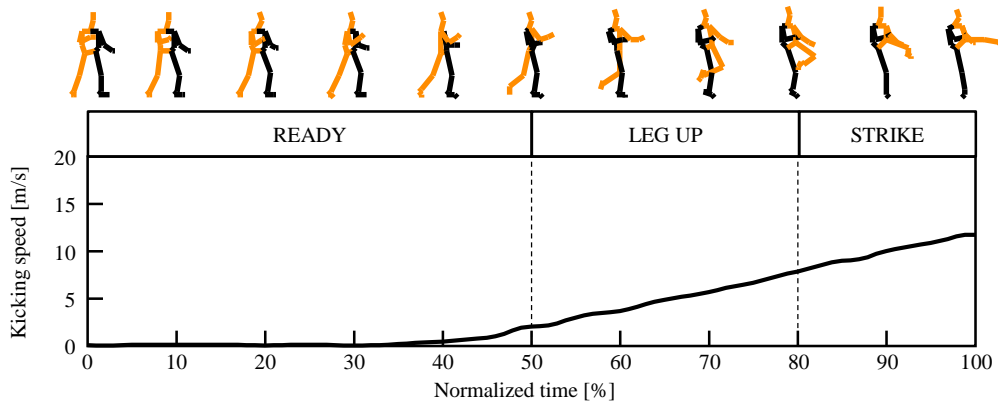
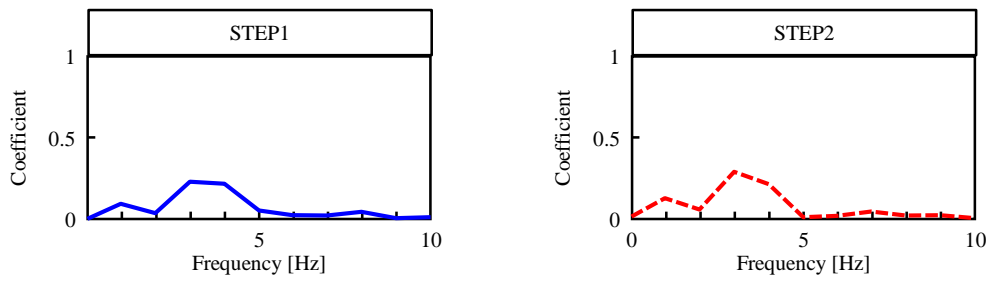
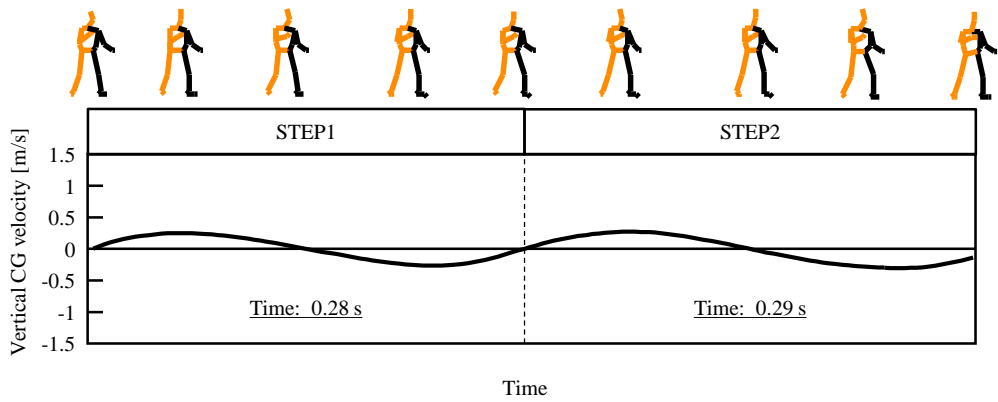
Evaluation value: 1.60

Minimum differences: 0.04

Timing: 43.0 %



Subject No. 27



Kicking speed: 11.74 m/s

Kicking time: 0.50 s

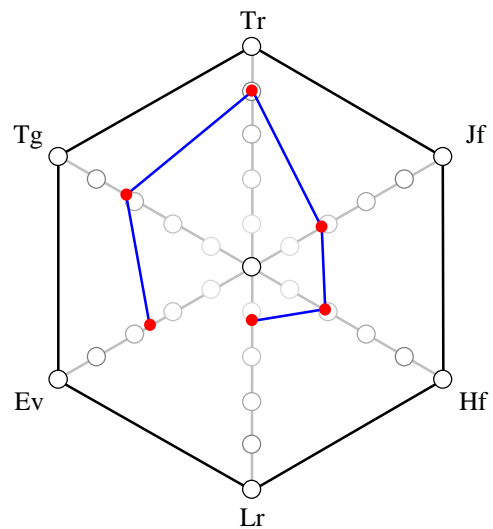
Affinity of amplitude: 0.81

Affinity of period: 0.80

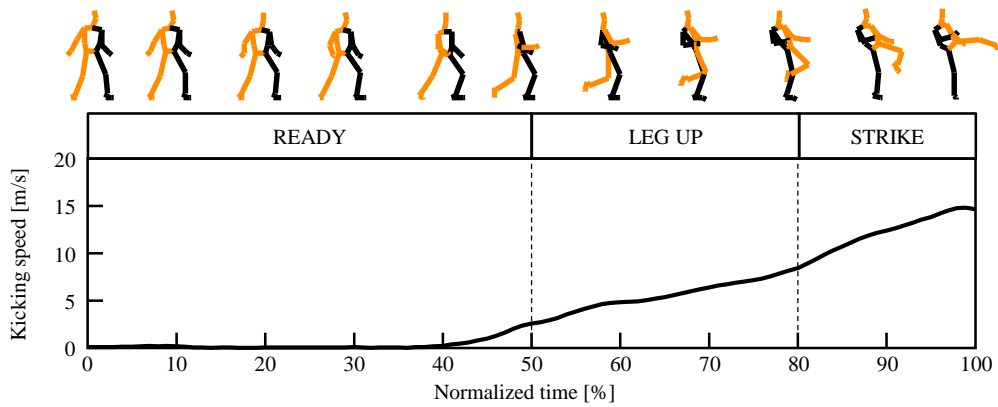
Evaluation value: 1.99

Minimum differences: 0.01

Timing: 91.7 %



Subject No. 28



Kicking speed: 14.66 m/s

Kicking time: 0.59 s

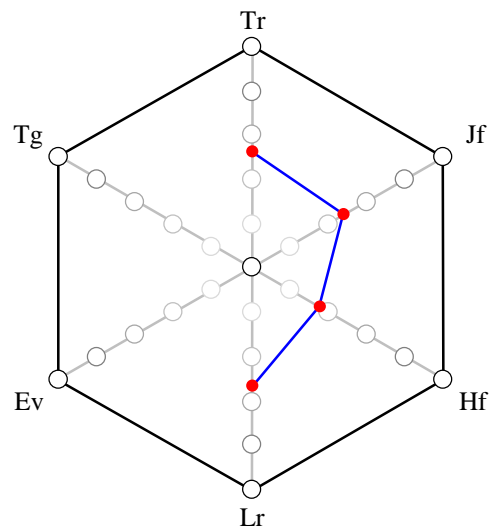
Affinity of amplitude: -

Affinity of period: -

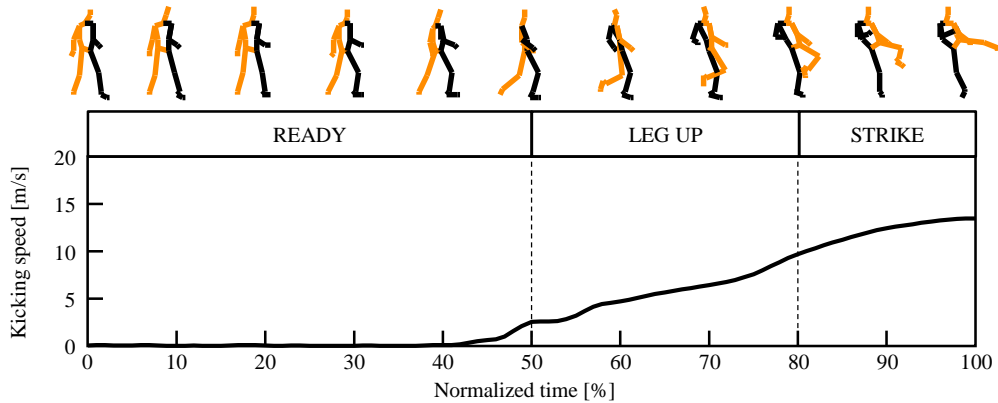
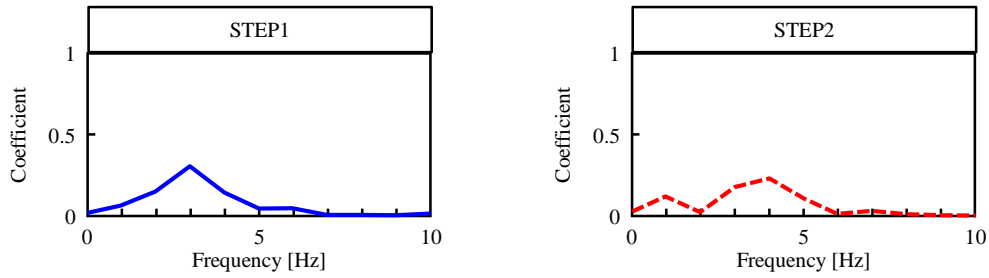
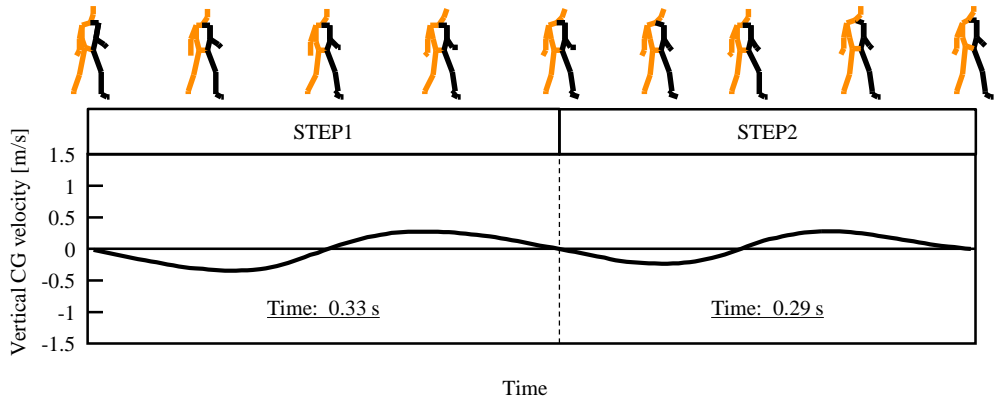
Evaluation value: -

Minimum differences: -

Timing: - %



Subject No. 29



Kicking speed: 13.48 m/s

Kicking time: 0.67 s

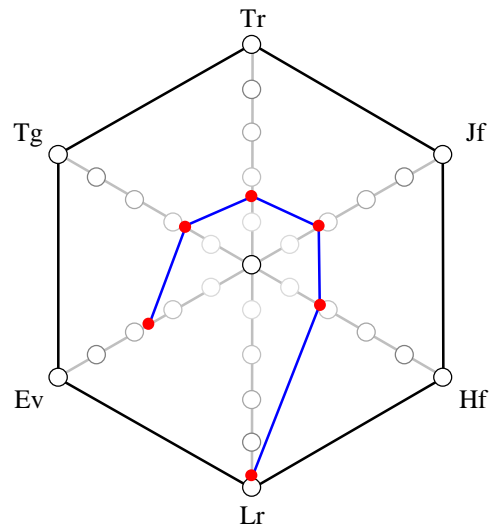
Affinity of amplitude: 0.66

Affinity of period: 0.41

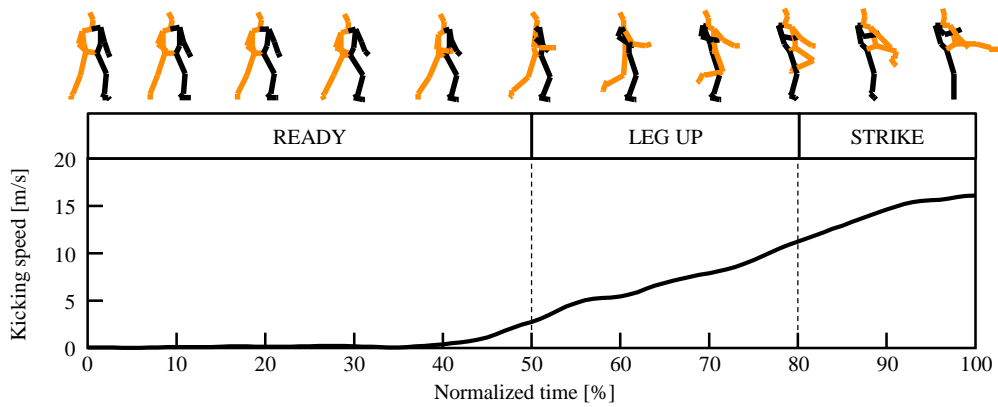
Evaluation value: 2.01

Minimum differences: 0.05

Timing: 50.0 %



Subject No. 30



Kicking speed: 16.12 m/s

Kicking time: 0.44 s

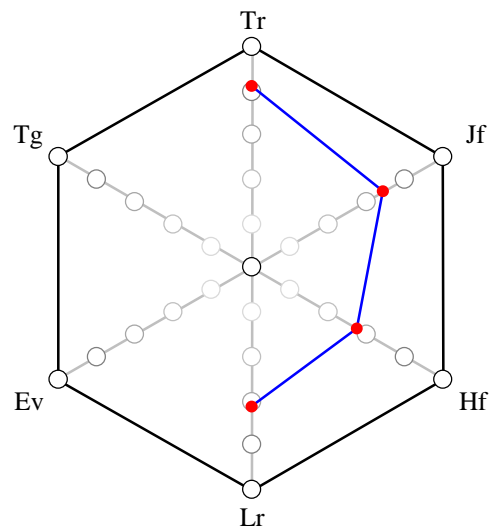
Affinity of amplitude: -

Affinity of period: -

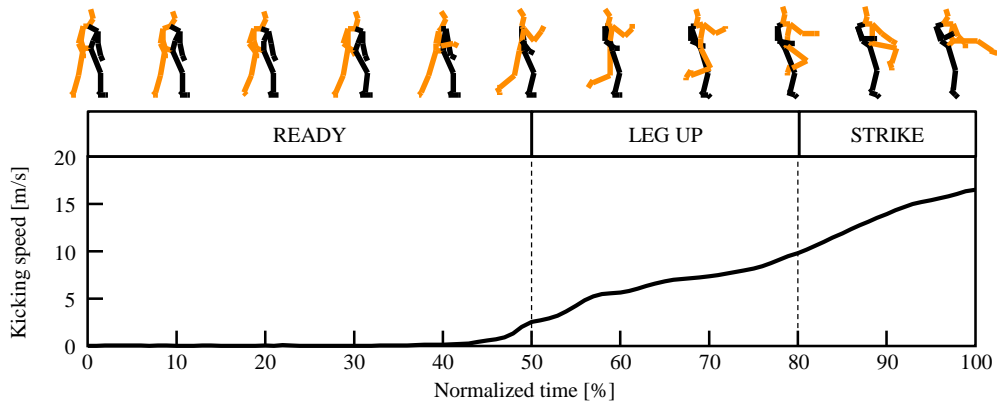
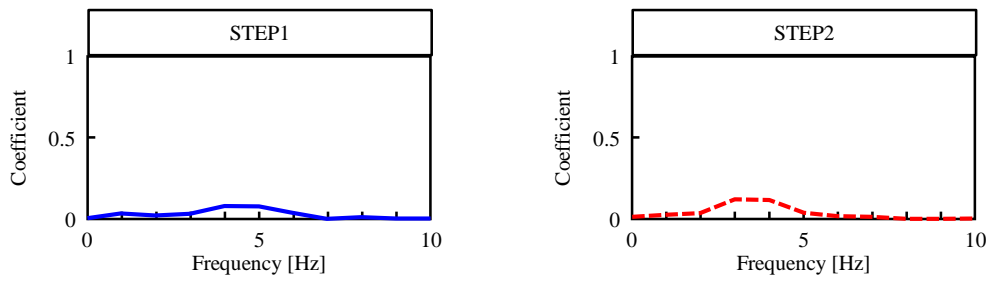
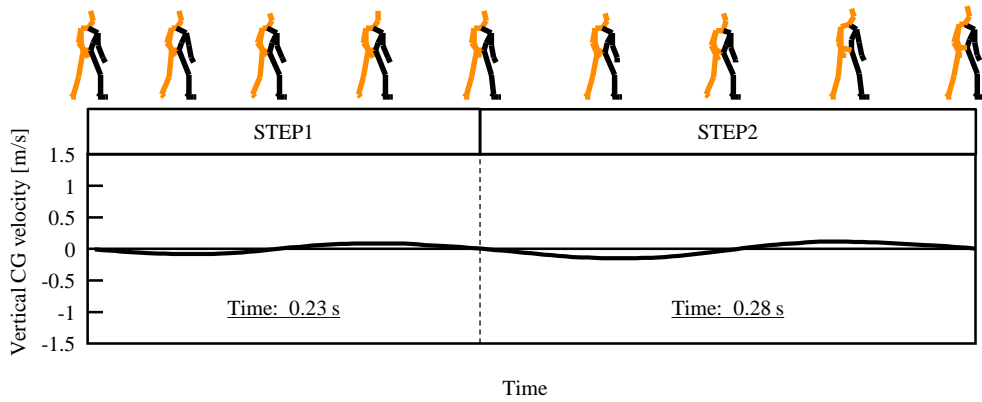
Evaluation value: -

Minimum differences: -

Timing: - %



Subject No. 31



Kicking speed: 16.55 m/s

Kicking time: 0.61 s

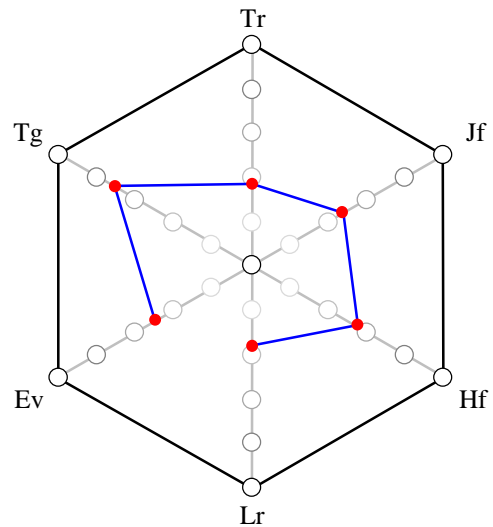
Affinity of amplitude: 0.41

Affinity of period: 0.42

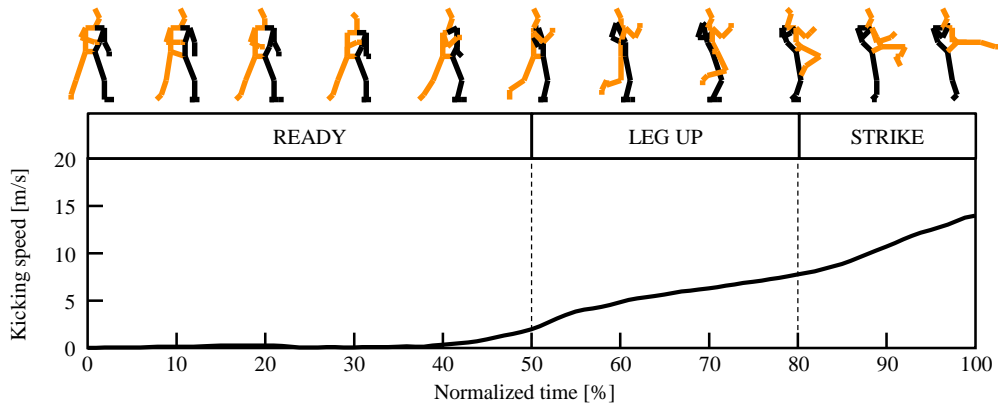
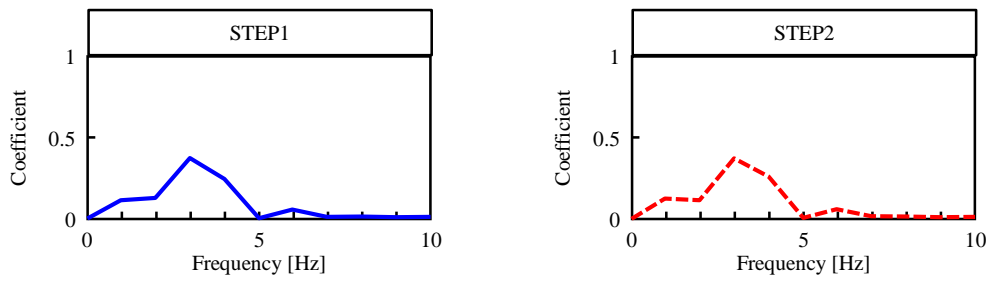
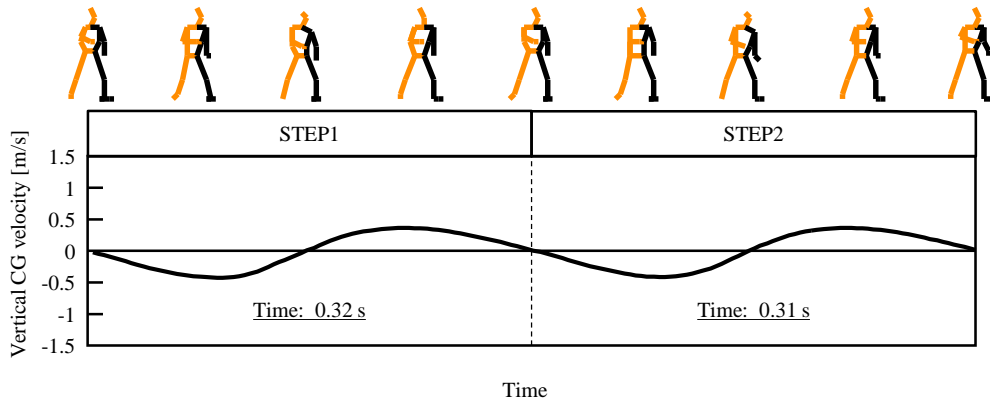
Evaluation value: 1.94

Minimum differences: 0.01

Timing: 100 %



Subject No. 32



Kicking speed: 13.99 m/s

Kicking time: 0.55 s

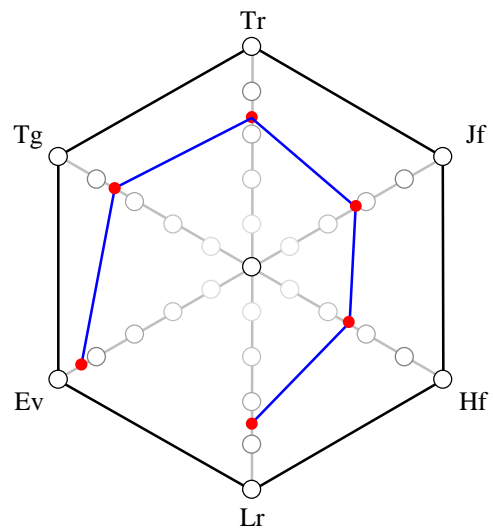
Affinity of amplitude: 0.97

Affinity of period: 0.89

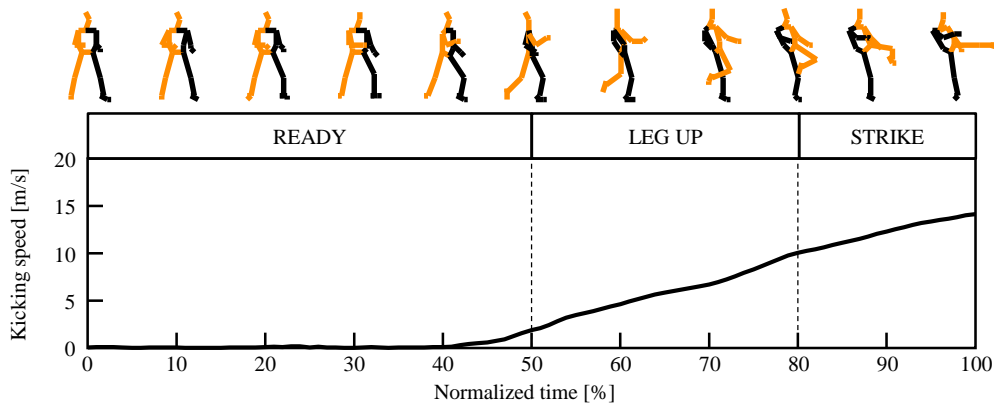
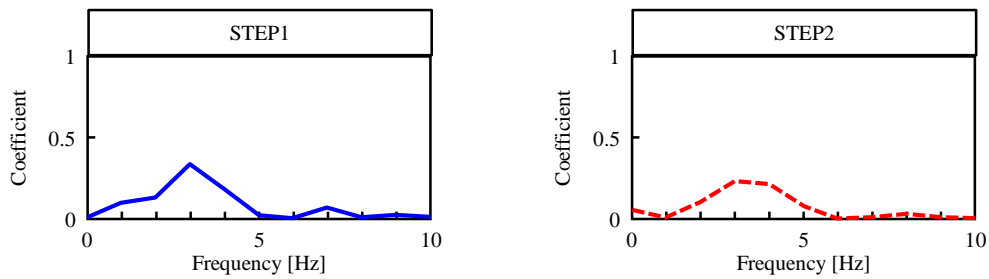
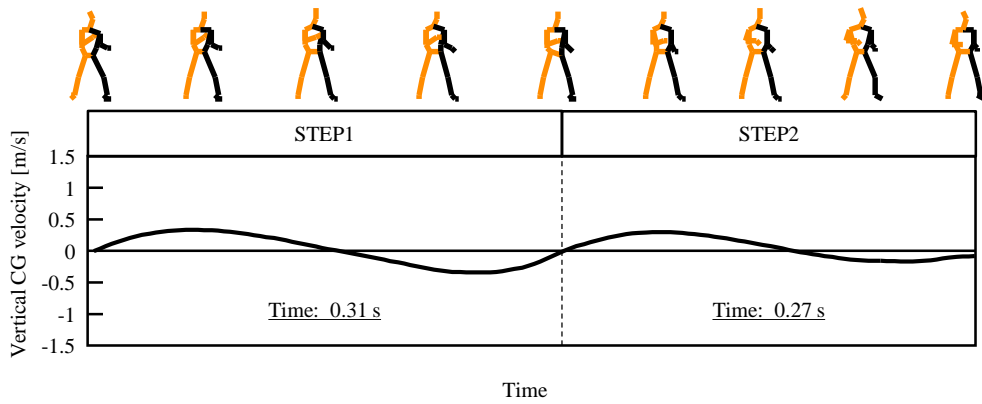
Evaluation value: 2.94

Minimum differences: 0.00

Timing: 100 %



Subject No. 33



Kicking speed: 14.18 m/s

Kicking time: 0.59 s

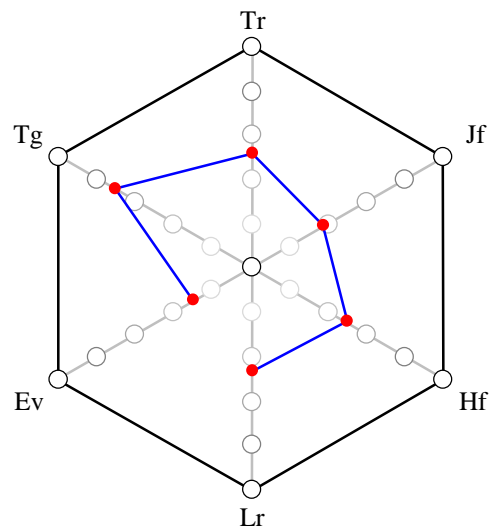
Affinity of amplitude: 0.43

Affinity of period: 0.69

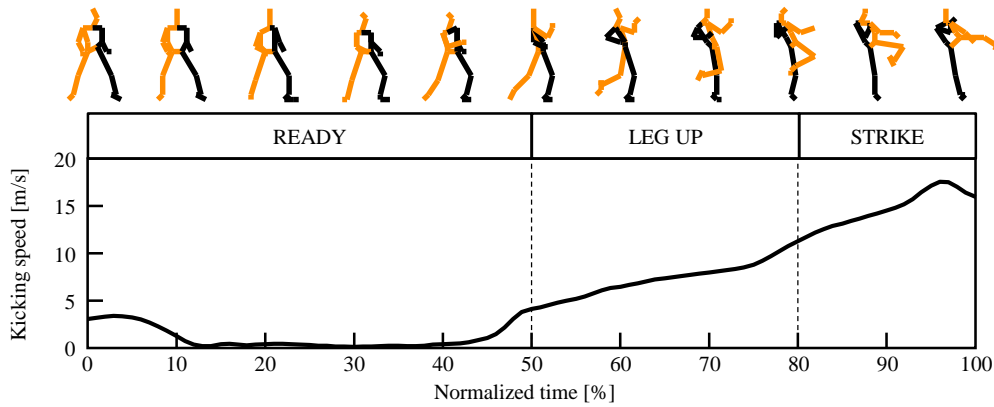
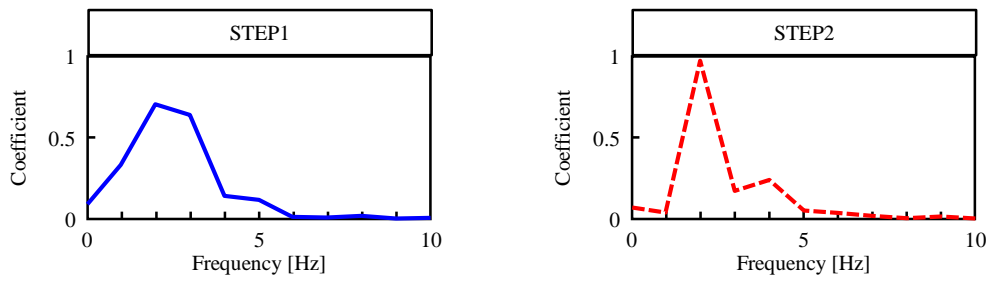
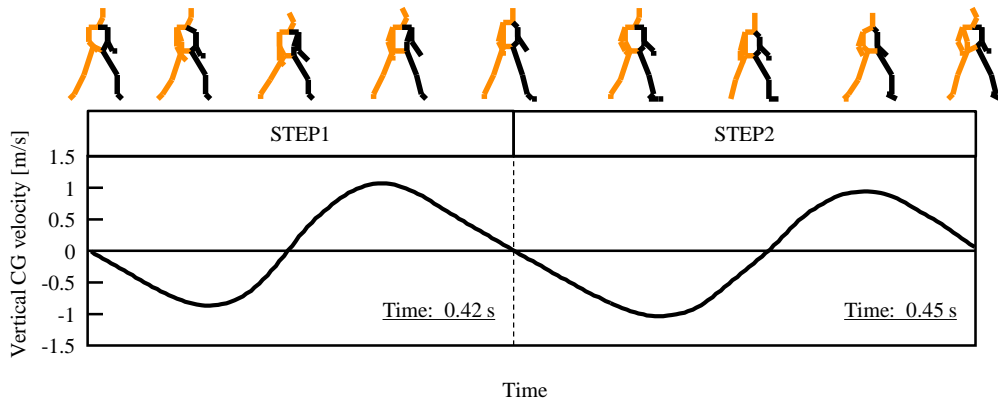
Evaluation value: 1.41

Minimum differences: 0.03

Timing: 100 %



Subject No. 34



Kicking speed: 15.96 m/s

Kicking time: 0.48 s

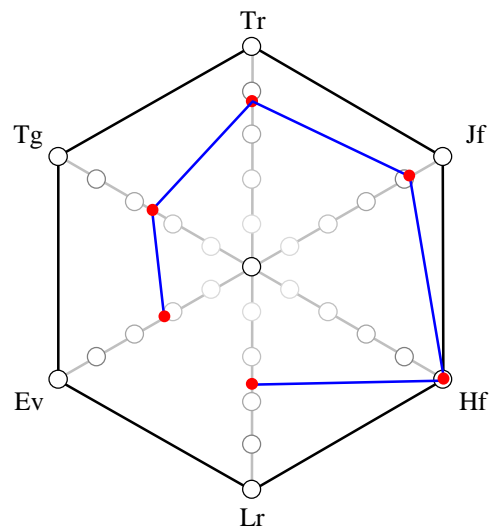
Affinity of amplitude: 0.74

Affinity of period: 0.51

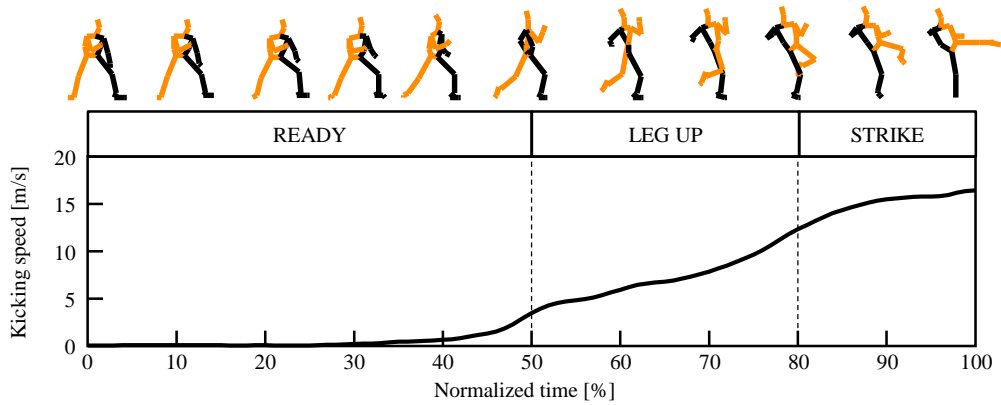
Evaluation value: 1.80

Minimum differences: 0.18

Timing: 73.5 %



Subject No. 35



Kicking speed: 16.46 m/s

Kicking time: 0.50 s

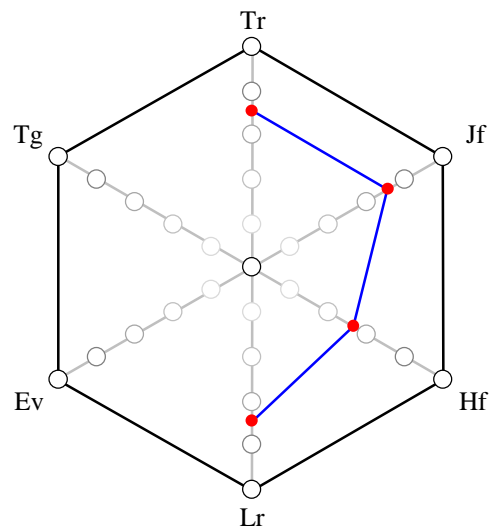
Affinity of amplitude: -

Affinity of period: -

Evaluation value: -

Minimum differences: -

Timing: - %



参考文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性特性. *Jpn J Sports Sci*, 15 (3), 155-162.
- 阿江通良, 藤井範久 (2002) : スポーツバイオメカニクス 20 講. 朝倉書店.
- Albuquerque, MR. , Lage, GM. , and Costa. VT. (2012) : Relative age effect in Olympic Taekwondo athletes. *Perceptual and Motor Skills*, 114 (2), 461-468.
- Ball, K. (2013) Loading and performance of the support leg in kicking. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 16, 455-459.
- Chew-Bullock, T. , Anderson, D. , Hamel, K. , Gorelick, M. , Wallace, S. , and Sidaway, B. (2012) Kicking performance in relation to balance ability over the support leg. *Human Movement Science*, 31, 1615-1623.
- Elliot, B. , Marshall, RN. , and Noffal, G. (1995) : Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *J Appl Biomech*, 11, 433-422.
- Emmermacher, P. Witte, K. , Bystryzkycki, S. , and Potenberg. J. (2007) : Difference variations of the Karate technique Mawashi-Geri. *Proc ISBS Symp*, 289-292.
- Estevan, I. , Alvarez, O. , Falco, C. , and Molina-Garcia, J. (2011) Impact force and time analysis influenced by execution distance in a roundhouse kick to the head in Taekwondo. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25 (10), 2851-2856.
- Estevan, I. , Jandacka, D. , Farana, R. , and Falco, C. (2011) Kinematical analysis of a roundhouse kick according to the stance position. *Scientific proceedings of the 30th Annual Conference of Biomechanics in Sports*, 189-192.
- Estevan, I. , Jandacka, D. , and Falco, C. (2013) : Effect of stance position on kick performance in taekwondo. *J Sports Sci*, 31 (16), 1815-1822.

- Falco, C., Alvarez, O., Castillo, I., Estevan, I., Martos, J., Mugarra, F., and Iradi, A. (2009) : Influence of the distance in a roundhouse kick's execution time and impact force in Taekwondo. *J Biomech*, 42, 242-248.
- Falco, C., Landeo, R., Menescardi, C., Bermejo, JL., and Estevan, I. (2012) : Match analysis in a University Taekwondo Championship. *Adv Physical Educ*, 2 (1), 28-31.
- Falco, C., Garci, J. Alvarez, O., and Estevan, I. (2013) : Effects of target distance on select biomechanical parameters in taekwondo roundhouse kick. *Sports Biomech*, 12 (4), 381-388.
- Feltner, EM. (1989) : Three-Dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part II : Application to the throwing arm in baseball pitching, 5, 420-450.
- Feltner, EM. and Dapena, J. (1989) : Three-Dimensional interactions in a two-segment kinetic chain. Part I : General model, 5, 403-419.
- Fife, G., Pieter, W., O'sullivan, D., Cook, D., and Kaminski, T. (2011) : Effects of Olympic style taekwondo kicks on an instrumented head-form and resultant head injury measures. *Br J Sports Med*, 45, 318-319.
- Fong, SSM., Fu, NS., and Ng, GYF. (2012) : Taekwondo training speeds up the development of balance and sensory functions in young adolescents. *J Sci Med Sport*, 15 (1), 64-68.
- Fujii, K., Yamashita, D., Yoshioka, S., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2014) : Strategies for defending a dribbler: categorization of three defensive patterns in 1-on-1 basketball. *Sports Biomech*, 13 (3), 204-214.
- Fujii, K., Yoshioka, S., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2015) : The preparatory state of ground reaction forces in defending against a dribbler in a basketball 1-on-1 dribble subphase. *Sports Biomech*, 14 (1), 28-44.
- Gordon, BJ. and Dapena, J. (2006) : Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. *J Sports Sci*, 1 (24), 31-49.
- 広瀬茂男 (2001) : ロボット工学 - 機械システムのベクトル解析 - (改訂版). 裳華房.

- Inoue, K., Nunome, H., Sterzing, T., Shinkai, H., and Ikegami, Y. (2014) : Dynamics of the support leg in soccer instep kicking. *J Sports Sci*, 32 (11), 1023-1032.
- Jakubiak, N. and Saunders, DH. (2008) : The feasibility and efficacy of elastic resistance training for improving the velocity of the Olympic Taekwondo turning kick. *J Strength Conditioning Research*, 22 (4), 1194-1197.
- Kim, JW., Kwon, MS., Yenuga, SS., and Kwon, YH. (2010) : The effects of target distance on pivot hip, trunk, pelvis, and kicking leg kinematics in Taekwondo roundhouse kicks. *Sports Biomech*, 9 (2), 98-114.
- Kim, KK., Kim, YK., and Im, SJ. (2011) : Inter-joint coordination in producing kicking velocity of Taekwondo kicks. *J Sports Sci Med*, 10, 31-38.
- Kim, YK. and Kim, YH. (2014) : Effects of rhythmic hop on response times and kicking velocities of Taekwondo kicks. *Korean J Sport Biomech*, 24, 367-373.
- Kim, YK. and Hintichs, RN. (2006) : Biomechanical classification of Taekwondo kicks. *Proc Annu Meet Am Soc Biomech*.
- 木下まどか (2014) : テコンドーの前回し蹴りに関するバイオメカニクス的研究. 平成 25 年度筑波大学大学院修士学位論文.
- 木下まどか, 藤井範久 (2014) : テコンドーの前回し蹴りにおけるバイオメカニクス. *バイオメカニズム* 22, 143-154.
- 木下まどか, 藤井範久 (2015) : テコンドーの前回し蹴りにおける力学的エネルギーフロー. *バイオメカニズム学会誌*, 39 (1), 37-46.
- 木下まどか, 藤井範久 (2015) : テコンドーの回し蹴りのバイオメカニクス. *バイオメカニクス研究*
- Kinoshita, M. and Fujii, N. (2015) : Biomechanical case study on roundhouse kick in Taekwondo focused on the phase before Toe-off. *International journal for Taekwondo research*.

- 小林一敏 (1992) : スポーツにおける心理的イメージと運動の制御. 計測と制御, 31 (3), 413-419.
- 倉林準, 持丸正明, 河内まきこ (2003) : 股関節中心推定法の比較・検討. バイオメカニズム学会誌, 27 (1), 29-36.
- Levanon, J. and Dapena, J. (1998) : Comparison of the kinematics of the full-instep and pass kicks in soccer. Med Sci Sports Exerc, 30 (6), 917-927.
- Luk, TC., Hong, Y., and Chu, DPK. (2001) : Analysis of strategy used in Taekwondo competition. Proc Biomech Symp, 166-169.
- 宮西智久, 藤井範久, 阿江通良, 功力靖雄, 岡田守彦 (1996) : 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究. 体育学研究, 41 (1), 23-37.
- 村田厚生, 杉足昌樹 (2000) : スポーツビジョンと野球の打撃能力の関係. 人間工学, 36 (4), 169-179.
- 内藤耕三, 福井洋介, 丸山剛生 (2007) : サッカーインステップキック動作におけるセグメントエネルギーの生成および伝達に関する入出力機構の解析. 日本機械学会, ジョイント・シンポジウム 2007 講演論文集, 374-379.
- 布目寛幸 (1999) : サッカーキック動作のバイオメカニクス-インサイドキックにおける関節トルクと 3 次元動態-. バイオメカニクス研究, 3 (2), 104-110.
- Pollock, WT. (1995) : The visibility of target as a function of its speed of movement. J Exp Psychol, 45, 449-454.
- Robertson, DGE. and Mosher, PE. (1985) : Work and power of the leg muscles in soccer kicking, In : Biomechanics IX-B, Winter, DA., Norman, RW., Wells, RP., Hays, KC., and Patla, AE. (Eds.), Champaign, IL : Human Kinetics, 533-538.

- 島田一志, 阿江通良, 藤井範久, 川村卓, 高橋佳三 (2004) : 野球のピッチング動作における力学的エネルギーの流れ. *Jpn J Biomech Sports Exerc*, 8 (1), 12-26.
- Sprigings, E. , Marshall, R. , Elliott, B. , and Jennings, L. (1994) : A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed. *J Biomech*, 27 (3), 245-254.
- Tanabe, S. and Ito, A. (2007) : A three-dimensional analysis of the contributions of upper limb joint movements to horizontal racket head velocity at ball impact during tennis serving. *Sports Biomech*, 6 (3), 418-433.
- Tang, WT. , Chang, JS. , and Nien, YH. (2007) : The kinematics characteristics of preferred and non-preferred roundhouse kick in elite Taekwondo athletes. *J Biomech*, 40 (S2).
- 田山忠行, 川崎健一郎 (1994) : 速度知覚をめぐる近年の運動知覚研究. 北海道大学文学部 紀要, *The annual reports on cultural science*, 43 (1), 155-200.
- 手島貴範, 角田直也 (2010) : 発育期男子サッカー選手における下肢スイング速度がボールキック能力に及ぼす影響. *発育発達研究*, 47, 1-9.
- トランスナショナルカレッジオブブレックス編 (1988) : フーリエの冒険. 言語交流研究所ヒップファミリークラブ.
- Wells, RR. and Winter, DA. (1980) : Assessment of signal and noise in the kinematics of normal, pathological, and sporting gaits. *Human locomotion I* , 92-93.
- Winter, DA. and Robertson, DG. (1978) : Joint torque and energy patterns in normal gait. *Biol Cybern*, 29, 137-142.
- 吉福康郎, 池上康男 (1984) : 格闘技における打の動作. *Jpn J Sports Sci*, 3 (3), 188-198.

博士論文における業績一覧

原著論文

- 木下まどか, 藤井範久 : テコンドーの前回し蹴りにおけるバイオメカニクス. バイオメカニズム 22, 143-154 (2014).
- 木下まどか, 藤井範久 : テコンドーの前回し蹴りにおける力学的エネルギーフロー. バイオメカニズム学会誌, 39 (1), 37-46 (2015).
- Madoka KINOSHITA and Norihisa FUJII : A biomechanical case study of Taekwondo roundhouse kick focused on preparatory motion. The Journal of the International Association for Taekwondo Research, 2 (2), 15-25 (2015) .
- 木下まどか, 藤井範久 : テコンドーの前回し蹴りにおける素早さとは. バイオメカニズム 23, 151-160 (2016)