

# 線引き課題を用いた運動制御ならびに 運動のなめらかさ評価への試み

澁谷 智久・光川 眞壽

## 要 旨

本研究は、日常的な運動技能である線引き課題について運動制御ならびに運動のなめらかさを評価しうるか検討した。

健康な大学生8名を対象にフリーハンドないしは定規を用いた12cmの線引き課題を行い、課題遂行中の運動の様子について動作分析法を用いて速度や加速度を求めた。実験条件は丁寧に描画する丁寧描画条件となるべく速く描画する高速描画条件の2つであった。

その結果、丁寧描画条件と高速描画条件によって、速度や加速度の振動の様子に大きな違いが観察され、丁寧描画条件では振幅の上下動が課題遂行全体に密にみられ、顕著にぎこちなさがみられた。高速描画条件では振動の頻度が少なく、全体的に非常になめらかであったが、振幅の大きさについては高速描画条件のほうが明らかに大きいことがわかった。

以上のことから、運動制御の様子や運動のなめらかさについて線引き課題から動作分析法を用いて観察可能であることが示唆された。

Key words：運動制御，なめらかさ，線引き課題，動作分析，加速度

## I. はじめに

運動技能 (motor skill) は、経験や練習を積んだ結果、獲得されたもの、つまり学習された能力である。運動技能はSchmidt (1991) によれば「比較的複雑な運動を最小の時間とエネルギー消費によって効率的かつ確実に遂行する学習された能力」と定義し、Fitts (1964) は「技能とは知覚を手がかりとして運動を目的に合うよう制御する学習された能力 (知覚-運動協応)」と定義している。つまり、運動技能とは練習によって養われた合目的的でなおかつ効率的な動きを確実に遂行する能力ということである。

我々の生活の周りは運動技能で満ち溢れている。その最も身近で意識されるのはスポーツである。選手たちは技術向上に向けて日々練習に励み、次第に運動技能の水準を高め、10年もすれば熟達の域に達するような選手も現れてくる。運動技能は日常生活においてももちろん存在する。例えば、包丁さばきや料理・仕事の手際と枚挙すればきりが無い。つまり、人が行動するところすべてに運動技能が関わっており、人がより良く生きるために必要な能力であるとも言えるのである。

この運動技能の問題を扱うのは運動制御や運動学習である。運動制御と運動学習の研究はウィーナー (1962) のサイバネティクスに端を発し、発展したAdamsの閉回路理論 (1979)、Schmidtのスキーマ理論 (1991)、さらにこれまでとは異なるアプローチとしてアフォーダンス理論 (Lee : 1980) や熱

力学を援用したダイナミカルシステムアプローチ（山本：1999）が提唱されている。臨床心理の立場からは成瀬（1985, 1995）が、脳性まひ者の動作不自由や幼児の動作の検討を通して、運動を制御し遂行する本人を行動の主体者と設定し、運動を遂行する際の主体者の体験という認知的側面から運動制御を検討するなど実に学際的な色彩の強い研究分野となっている。近年では、脳の機能解明が進むにあたりさらなるモデル（川人：2005）が提唱され、さらなる発展を遂げようとしている。

本論文では、人の運動制御と運動学習について情報処理モデルに立脚する。端的に情報処理モデルを説明すれば人を一種の情報処理システムと考えるものである。このアプローチは情報科学の概念に基づいている。目や耳など外部受容器（感覚器）に入った刺激は中枢へと伝達し、認知的な処理がなされる。それに応じて出力される行動が決定し、筋骨格系に情報が伝達され、行動が発現するとしている。この情報処理モデルにおいて重要な概念はフィードバックとフィードフォワードである。

運動制御と学習の理論にサイバネティクス概念が導入された以来、スキル（skill）に関連する種々な感覚情報のフィードバック（Feedback）という認知的活動は、運動制御・学習を調整し、パフォーマンスを最適ならびに最大にする上で、欠かすことのできない要素となっている。フィードバックについて、運動と関連して述べれば、運動遂行に（出力）に伴うさまざまな情報を中枢（入力）に戻すことである。このフィードバックを利用し、ある目標に向かって特定の制御（control）を行うことをフィードバック制御と呼ぶ。フィードバックが運動制御・学習とパフォーマンスとの関係を最適にするかということ、フィードバックを利用したエラー（Error）検出という認知的機構が働くからである。フィードバックされる情報は、まず内在的（intrinsic）フィードバックと外在的（extrinsic）フィードバックに大きく分類される。内在的フィードバックは、遂行された運動自体から得ることのできるフィードバックであり、運動感覚といった固有受容感覚や視覚・聴覚などの情報を指す。外在的フィードバックは、運動そのものには本来に存在せず、外部から特別に付与された情報であり、結果の知識（KR: knowledge of results）やパフォーマンスの知識（KP: knowledge of performance）が含まれる。これらはさらに受容される感覚様式により、内-外受容器に分類される。外在的フィードバックは、付与される時間的、質的、手続き的關係によりさらに細分化される。

一方、フィードフォワード制御はあらかじめ目的とする運動に必要な運動指令を計算しておき、フィードバック制御に頼ることなく運動を遂行する制御である。フィードバック制御の場合、その処理と反応に数10msecから100msecかかるために速い対象への対応や素早い運動の制御に対応することができない。例えば、野球のバッティングではボールを打つ位置にボールが来てからバットを振り下ろしてもボールを打つことはできない。あらかじめどのようにバットを振るのかを決めているのである。このような場合では、フィードバックを用いた制御では対応できないために、予測したボールが違っていればそれに気づいたとしてもバットを振る軌道を修正することはほとんどできない。したがって、フィードフォワード制御ではあらかじめ用意される運動指令、またはその決定づけるシステムが重要となってくる。

さて、運動技能について研究する場合、その測定では、運動の制御が運動のできればえ（performance）にどのように表れるかが問題となる。それは、速さ、正確さ、フォーム、安定性という側面からアブ

ローチされる (Johnson : 1961)。このフォームは、優れたフォームはそうではないフォームに比べ、エネルギー消費量が少ない、換言すれば運動の効率が高いということを意味する。例えば、Cavanagh ら (1977) は、一定の走行スピードにおける酸素摂取量の差は、ランニングフォームに起因すると述べている。運動技能が高い水準である者、いわゆる熟達者や上級者のフォームをよく観察するとその動きは実になめらかである。このなめらかさ (smoothness) は運動制御研究の特に巧緻的な運動課題の中でいくつか行われており、運動のなめらかさは運動技能の重要な一側面であると考えることができる。これについて、永田 (1974) は巧緻能を身体諸機能の統合された結果の運動現象とみると述べている。運動のなめらかさについては、リハビリテーションの分野において、運動制御方式の異なる運動訓練が患者の動作に及ぼす影響について検討されており (Flash ら : 1985, Uno : 1989), 新しいリハビリテーション方法への提言がなされている。

このようにみると運動の滑らかさに着目することは、運動制御と運動技能との関係を直接観察する重要な“窓”になるのではないだろうか。前述した研究では上肢の到達運動課題が良く用いられている。そこで、本研究は到達運動課題の一つであり、なおかつ非常に慣れ親しんだ日常的な運動技能である線引き課題を用いて、課題遂行中の運動をつぶさに観察することで運動制御や運動のなめらかさを評価するか検討した。

## II 方 法

被験者は21歳から22歳までの健常な大学生8名 (男性7名, 女性1名) であった。その内、上肢の運動に支障されるような整形外科的問題を有する者は無かった。実験に先立って、口頭にて実験内容の説明をし、参加の了解を得た者だけを対象とした。

被験者はA4用紙の左端に3箇所のスタート位置のポイントが書かれている測定用紙の前に着席し、全長15cmの定規を用いて12cmの直線を書いてもらった。その際、鉛筆を利き手で持ち、撓側から尺側方向に線を引いてもらった。直線を描画するにあたっては、はじめに丁寧に描画する試行を3回行い (定規—丁寧描画条件)、次になるべく速く描画する試行を3回 (定規—高速描画条件)、計6試行を行った。次に、3箇所のスタート位置のポイントと水平方向に12cmのところポイントが書かれた測定用紙を用いて、フリーハンドで直線を書いてもらった。その際にもはじめは丁寧に (フリー—丁寧描画条件)、次になるべく速く描画する条件 (フリー—高速描画条件) で計6試行を行った。したがって、全試行12回であった。

計測は動作遂行中の反射マーカー (鉛筆の先端から2cmの位置に設置) の位置について高速度カメラ (CASIO 社製 EX-F1) を用いて300fpsにて記録した。その際に高速度カメラと同じ位置からLEDライトにて照射した。

分析は何度か描画することによる学習効果を避けるために第1試行目のみを対象とした。また、本研究の目的を鑑み、線引き課題遂行における運動制御要因をなるべく少なくするために定規を用いた条件のみを対象とした。さらに、高速度カメラに記録された映像はコンピュータに移し、鉛筆の先端に取り付けられた反射マーカーの位置を動作分析ソフト (DKH 社製 Frame Dias ver.3) を用いて進行

方向への X 変位が 1mm 以上に到達時点を分析開始点、さらに X 変位が 12cm に最も近づいた時点を分析終了点としてデジタイズしその座標データに基づいて、線引き課題遂行中の速度・加速度を求めた。

### Ⅲ 結果と考察

表 1 は定規—丁寧描画条件、表 2 は定規—高速描画条件における線引き課題遂行結果をまとめたものである。

課題に要した時間について条件による差異を検討したところ、丁寧描画条件のほうが有意に長く ( $t(7)=6.99$ ,  $p<.01$ )、高速描画条件の 3.5 倍近く時間がかかっていることがわかる。こうした傾向については速度データにも表れている ( $t(7)=6.35$ ,  $p<.01$ )。そして、被験者間での違いはそれほど大きくなかった。これについて、本実験では「丁寧に」行う条件と「速く」行う条件の種類を提示した。両者ともに明確な数量的基準を設けておらず、いわば感覚的経験的で個人的な基準となっている。本実験の被験者はほぼ同じ世代の大学生であった。こうした背景の一致や定規で直線を引くという比較的誰もが日常的に行うような行動だったからこそ、このような偶然的結果になったのではないかと考えられる。しかし、もしも今後さまざまな年齢層や背景を持った人を対象とするときには客観的な基準を設ける必要があると思われる。または、その逆に今回のように「速さは自由だが、きちんと 12cm の線を引く」と最終結果だけ示すことで、個人特性の運動制御への影響が見て取れるようになる可能性もあるだろう。

次に、速度と加速度のデータは 2 次元の座標データから算出された 0.0033 秒毎の速度と加速度を用いて、平均、標準偏差、最高値、最低値を求めたものである。全遂行中の平均速度や加速度とその変動を表している。本研究の目的を勘案すれば標準偏差の値に着目すべきである。この視点から観察すると、高速描画条件と比較して丁寧描画条件においては速度と加速度ともに変動が小さく、動き始めてから動作が終了するまでほぼ一定の動きで修正を繰り返しながら課題を遂行していることがわかる。また、丁寧描画条件では被験者間の動きのばらつきが小さいが、高速描画条件では比較的に被験者間のばらつきが大きい様子がうかがえる。

表1 定規一丁寧描画条件における各被験者の遂行結果ならびに各物理量の平均と標準偏差

被験者	性別	年齢	課題遂行に要した時間 (s)	速度 (cm/s)				加速度 (cm/s <sup>2</sup> )			
				平均	標準偏差	最高	最低	平均	標準偏差	最高	最低
A	男	21	4.41	2.63	1.68	6.46	-0.05	-0.19	6.43	16.68	-16.84
B	男	21	3.52	3.16	1.55	6.85	0.62	-0.30	6.88	13.35	-25.62
C	女	22	4.46	2.89	1.58	4.88	-0.21	-0.35	4.90	19.48	-9.71
D	男	22	5.36	2.00	0.92	4.45	-0.05	-0.21	4.87	11.56	-14.80
E	男	22	5.74	2.13	1.00	5.40	-0.04	-0.29	7.97	21.52	-27.44
F	男	22	7.14	1.67	0.68	3.01	-0.02	0.04	4.16	17.77	-12.53
G	男	22	2.96	4.12	2.06	6.94	-0.06	-0.26	10.13	19.56	-26.57
H	男	22	4.34	3.02	2.38	8.62	-0.21	-0.58	10.23	31.06	-20.29
M	21.75	4.74	2.70	1.48	5.82	0.00	-0.27	6.95	18.87	-19.23	
SD	0.46	1.32	0.78	0.59	1.75	0.26	0.17	2.34	5.93	6.80	

表2 定規一高速描画条件における各被験者の遂行結果ならびに各物理量の平均と標準偏差

被験者	性別	年齢	課題遂行に要した時間 (s)	速度 (cm/s)				加速度 (cm/s <sup>2</sup> )			
				平均	標準偏差	最高	最低	平均	標準偏差	最高	最低
A	男	21	0.84	13.85	12.38	32.56	-0.80	-4.99	94.62	161.38	-156.92
B	男	21	1.36	8.34	6.34	18.47	-0.36	1.05	33.14	60.86	-50.46
C	女	22	1.98	6.56	2.38	9.57	0.10	-1.96	11.96	62.61	-30.85
D	男	22	1.33	8.46	8.60	22.72	-0.27	-0.83	46.96	103.26	-77.23
E	男	22	0.94	13.22	8.51	26.72	0.04	-5.02	61.09	126.85	-85.53
F	男	22	1.76	7.12	4.65	15.34	0.09	-0.96	18.66	41.32	-26.90
G	男	22	1.57	7.97	8.08	23.75	-0.25	-1.92	40.05	58.10	-103.17
H	男	22	1.34	9.21	5.30	17.97	-0.01	-3.00	36.03	83.59	-71.51
M	21.75	1.39	9.34	7.03	20.89	-0.18	-2.20	42.81	87.25	-75.32	
SD	0.46	0.38	2.72	3.05	7.12	0.31	2.08	25.96	40.70	42.25	

図1から8は定規一丁寧描画条件における各被験者の課題遂行中の速度・加速度曲線である。図9から16は定規一高速描画条件における各被験者の課題遂行中の速度・加速度曲線である。これは実際に被験者がどのように動かしていたかを視覚的に表している。永田(1973)によれば、運動のなめらかさ(Smoothness)を評価するには加速度を主に振動状態を観察するのが妥当であるとしている。

丁寧描画条件と高速描画条件の最も大きな違いは、速度・加速度変化、つまり速度・加速度曲線の振動の様子である。速度と加速度ともに丁寧描画条件はどの被験者でも振幅の上下動が課題遂行全体に密にみられ、顕著にぎこちなさが観察できる。ところが、高速描画条件は振動の頻度が少なく、ど

れも非常になめらかである。その一方で、丁寧描画条件の振幅は高速描画条件と比較して上下動の範囲が狭く、高速描画条件のほうが明らかに大きい。これは丁寧描画条件では動きがゆっくりと、かつ少しでもずれたりしないよう細かく制御されていて、ひとつひとつの動作に対しフィードバック制御を適用しながら動作を遂行していると思われる。このような常に修正が入りながら動作が遂行されていることを密で小さな変動は表しているものと考えられ、フィードバック制御は動作の正確さをもたらす制御方式ではあるが、リアルタイムな制御としてのフィードバック制御だけではいわゆるぎこちなさが表れる（道免：2001）ことを支持する結果であると考えられる。その一方で、高速描画条件では弾道的に動き始め、12cm先の目標位置に近づくとところで大きく減速し、目標位置に到達するように動かしている様子が分かる。これは、高速描画条件ではまずフィードバック制御にて運動が開始され、その後フィードバック制御がなされていることが変動の大きさとグラフの形によって推測される。フィードフォワード制御はあらかじめ目標を達成するための運動指令が作成されて効果器に出力され実行される運動制御方式である。したがって、動作遂行中にフィードバック制御が挿入されないため動きそのものはなめらかである。これはトップスポーツ選手の動きの美しさそのものである。永田（1973）を参考に今回の実験をサイバネティクスの観点から考察すれば、被験者の手が操作部で鉛筆が制御対象、実際に引かれた線分が制御量、検出部は主に視覚ならびに筋感覚で、これにより閉回路を形成して制御量をフィードバック情報として時々刻々と中枢の調節部へ伝達しながら動作を遂行しているものと考えられる。しかし、「速く」という条件の場合にはリアルタイムのフィードバック制御では目標が達成できないためにフィードフォワード制御が選択されることになる。フィードフォワード制御の場合には事前に定める運動指令は膨大な練習によって適切な制御量を経験し獲得していなければならないが、とりあえず目標に近いところまでの制御としてフィードフォワード制御を採用し、その後フィードバック制御を用いて目標を達成するよう運動が制御されたのだと考えられる。このように考えるとフィードフォワード制御とフィードバック制御はお互いが長けている部分とそうではない部分を補完しあうようにハイブリットの人が用いているものとするのが自然のように思える。

以上のことから、線引き課題について動作分析手法を用いて検討することにより、課題遂行中の運動から運動制御の様子や運動のなめらかさについて観察可能であることが示唆された。今後は得られた速度・加速度についてより精緻な分析を加えることで視覚的な印象を数値化して、客観的に評価できる仕組みを構築することが求められる。

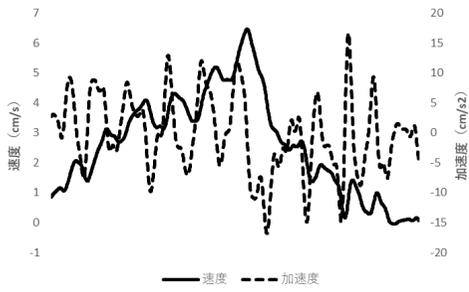


図1 被験者A

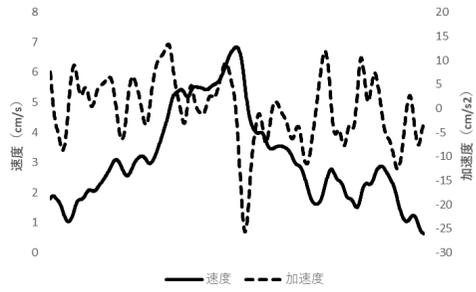


図2 被験者B

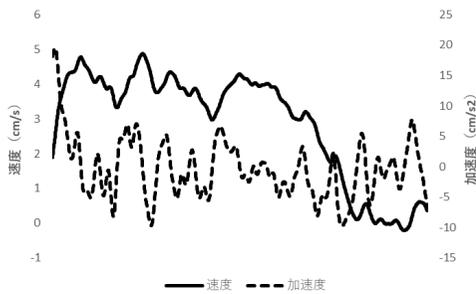


図3 被験者C

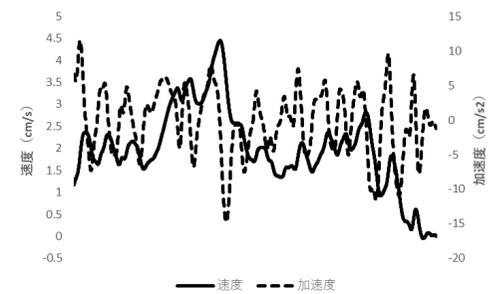


図4 被験者D

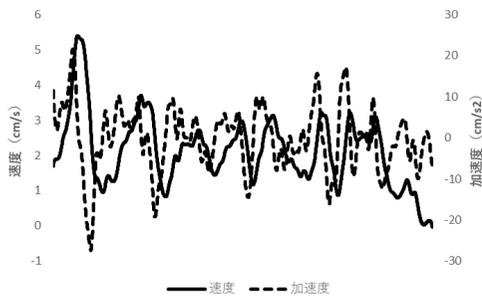


図5 被験者E

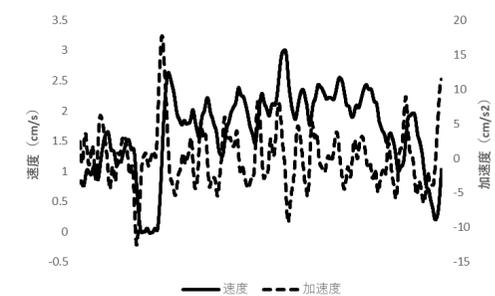


図6 被験者F

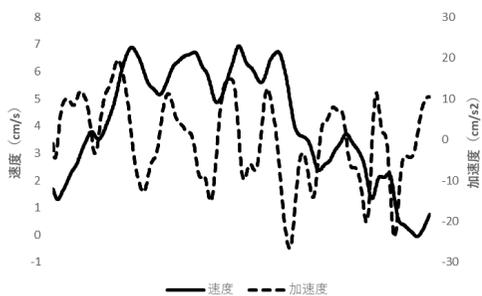


図7 被験者G

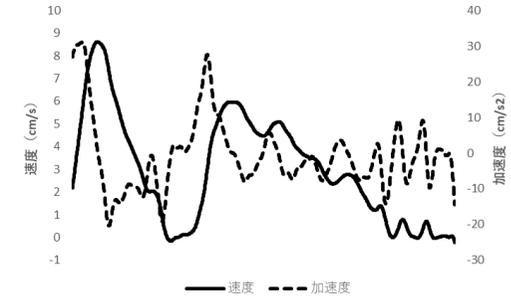


図8 被験者H

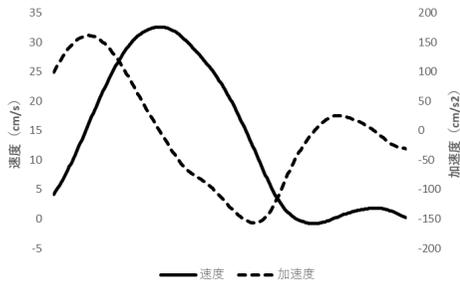


図9 被験者A

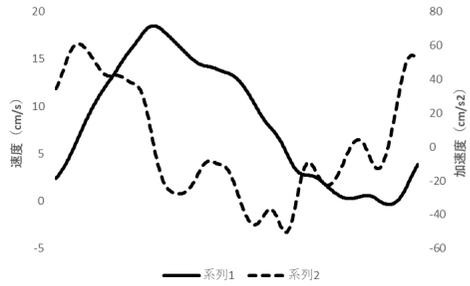


図10 被験者B

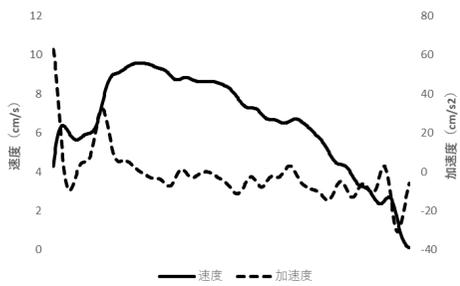


図11 被験者C

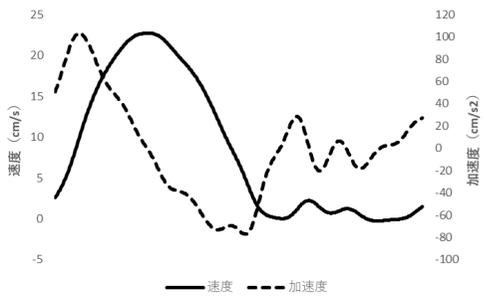


図12 被験者D

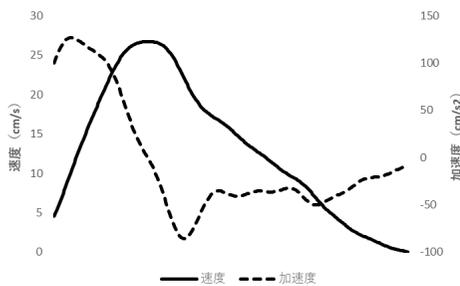


図13 被験者E

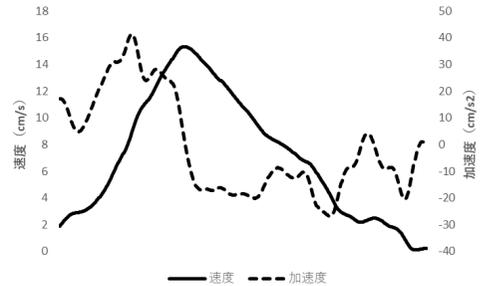


図14 被験者F

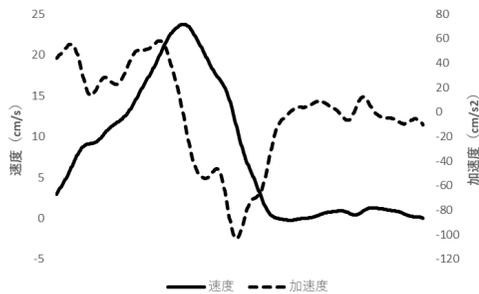


図15 被験者G

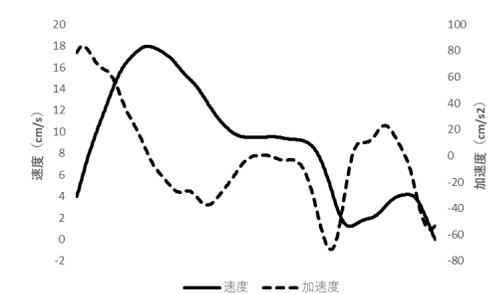


図16 被験者H

## IV おわりに

今回の研究によって、観察的ではあるが、線引き課題を用いて人の運動制御の様子やなめらかさを観察することができたことは大変意義があると思われる。しかしながら、今後同様の研究を行う際には条件設定によっては期待される運動制御方式が発現されない可能性もあることから、線引き課題をどのように行うのかという条件設定についてはより深い洞察が必要である。

今後は、さまざま年齢層や背景を持った人々まで対象を広げ、個人特性が運動制御に及ぼす影響について検討することが求められよう。

### 謝辞

本研究で用いられた実験機器の一部は、平成25年度および26年度東洋学園大学特別研究費（スポーツ科学研究会 研究代表 澁谷智久）にて購入したものである。

### 参考文献

- ウィーナー, N. (1962), 『サイバネティックス』2nd ed 池原他訳, 岩波書店.
- 川人光男 (2005), 『脳の計算理論』第5版 産業図書.
- 道免和久 (2001), 「運動学習とリハビリテーション」『バイオメカニズム学会誌』25: 4, 177 - 182.
- 永田 晟 (1973), 「手運動の動的解析—トレース動作のなめらかさについて—」『日本体育学会大会号』24: 177.
- 永田 晟 (1974), 「巧みな調整能について—一手運動中のなめらかさの解析—」『日本体育学会大会号』25: 520.
- 成瀬悟策 (1985), 『動作訓練の理論—脳性マヒ児のために—』第2版 誠信書房.
- 成瀬悟策 (1995), 『臨床動作学基礎』第1版 学苑社
- 山本裕二 (1999), 「テニス—連続性が生み出す動き多様性」『体育の科学』49: 10, 811-816.
- Adams, J. A. (1979). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, 111-149.
- Cavanagh, P. R., Pollock, M. L. and Landa, J. (1977). Abinomechanical comparison of elite and gooddistance runners. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 301: 328-345.
- Fitts, P. M. (1964). *Perceptual-motor learning*. In Melton, A. W. (Ed) *Categories of human learning*. Academic Press.
- Flash, T. and Hogan, N (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*. 5, 1688-1703.
- Johnson, H. W. (1961). Skill=Speed×accuracy×form×adaptability. *Perceptual and Motor Skills*. 13, 163-170.
- Lee, D. N. (1980). *Visuo-motor coordination in space-time*. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds) *Tutorials in motor behavior*. North-Holland.
- Schmidt, R.A. (1991). *MOTOR LEARNING AND PERFORMANCE: from principles to practice*. 1<sup>st</sup> ed. Human Kinetics Books.
- Uno, Y., Kawato, M., and Suzuki, R. (1989). *Formation and control of optical trajectory in human multi-joint arm movement—minimum torque-change model*. *Biological Cybernetics*, 61 89.