

修士論文

指触覚インタフェースによる
滑り刺激の知覚における長期学習効果

指導教員 加藤典彦准教授

令和 元年度

三重大学大学院工学研究科

博士前期課程 機械工学専攻

418M108 稲垣 慎一

目次

第1章 緒言	3
研究背景	3
第2章 長期トレーニング実験	7
2.1 実験	7
2.1.1 実験装置	7
2.1.2 実験条件	8
2.1.3 ランの手順	12
2.1.4 被験者の姿勢	13
2.1.5 実験手順	13
2.2 実験結果・評価	15
2.2.1 速さ知覚・時間知覚	15
2.2.2 角度知覚	20
第3章 線画パターンによるトレーニング効果の評価	22
実験結果	23
第4章 結言	25
謝辞	27
参考文献	28
付録	29
さらなる長期学習の効果	29

第1章 緒言

研究背景

人のハプティクス感覚(皮膚の感覚だけでなく、手や腕などの身体の運動覚を統合した触運動覚や触力覚を含む広義の触覚)の研究やハプティクス感覚を用いたインタフェースの研究は活発に行われている。例えば、Provancher and Sylvester (2009)[1], Koslover et al. (2012)[2], Ho et al. (2015)[3]は小型で指先にも装着可能な視触覚インタフェースを提案している。いずれも機構は工夫されているが、角度、速度または長さしか提示できないなど、性能には改善の余地があった。これらに対して、筆者は、速度や位置の変化を表すベクトルが提示できれば有用であると考え、小円板(以下、「ホイール」と呼ぶ)の回転を利用して指腹部の皮膚に滑りベクトルを提示できる装置としてアクティブホイール式指触覚インタフェース(Active-Wheel-Based Finger-Tactile Interface (AWB-FTI))を開発した。そのホイール形状としては「厚い／薄い」の2水準、および「凸点有り／凸点無し」の2水準による4つの組合せ、すなわち「凸点有り・厚い」、「凸点有り・薄い」、「凸点無し・厚い」、「凸点無し・薄い」を比較し、滑り知覚感度の高さに基づいて「凸点有り・厚い」を採用した。(Nomura and Iwabu, 2014, Nomura and Kato, 2015, Nomura and Oike, 2016, Nomura et al., 2018)[4][5][6][7]。そして、知覚／表現に用いる手については、すなわち、AWB-FTIを用いて提示した滑り刺激を知覚・表現する場合、知覚と表現の二つのタスクを片腕だけで行うのではなく、両腕を使い分けることを検討した。右利き(男性)を前提として、知覚する手として「利手／非利手」の2水準、および表現する手として知覚した手の「同側／反対側」の2水準による4つの組合せ水準、すなわち、「利手-同側(利手で知覚して利手で表現)」、「利手-反対側(利手で知覚して非利手で表現)」、「非利手-同側」、「非利手-反対側」を比較し、「非利手-反対側」を採用した。(Katsuta and Nomura, 2019)[12]。

AWB-FTIの将来の可能性として、視覚障がい者に経路を表示したり、文字を教示するなどの使用例が考えられる。ここで、今までのAWB-FTIを用いた実験では、表現した結果を使用者にフィードバックしていなかったため、提示された滑り刺激を正確に知覚／表現できていたか否かについて、使用者が知ることができなかった。図1に実際の1人の被験者の横軸に提示した速さ、縦軸にスタイラスペンによるストロークとして表現(「ストローク表現」と呼ぶ)した速さを表したデータを示した。黄緑色の破線は提示した量と表現した量が等しいことを表す傾きが1である直線であり、黒色の直線は生データからの回帰直線を表している。この黄緑色の破線に黒色の直線が近

いほど精度が良いことを示す。図 1 からわかるように、滑り知覚を受けてのストローク表現の精度が低いということが課題となっている。従来研究では、Ballardini et al. (2018)[10]は、ハンドルを動かすことで手のひらに滑りの刺激を与えられる装置を用いて、使用者の手先の動きと同じ動きをする滑りの刺激を手のひらに与えることで、滑りの知覚感度が改善するか調査した。その結果、練習前後で滑りの知覚感度の改善が見られた。Wong, et al. (2013)[9]は、視覚障がい者の指の触覚は晴眼者より鋭敏であり、それは、点字の読解レベルと相関があるだろうと予測し、人差し指、中指、薬指について grating orientation task(GOT)と呼ばれる指に触れた格子の方向を回答するタスクを用いて調査した。結果は、全ての指で視覚障がい者の触覚性能が晴眼者を著しく上回った。また、点字を堪能に読むことのできる人は、点字を読んでいる手の方が、反対の手よりも人差し指の触覚性能が良く、その点字読解能力は、毎週の読書時間と相関していた。ここから、触覚は学習もしくは経験によって性能が上がるのがわかる。勝田らによる AWB-FTI の滑り知覚/ストローク表現の実行順序に関する先行研究(Katsuta and Nomura, 2019)[12]においても、少ない学習回数にも関わらず、知覚・表現の精度の向上が期待される系統誤差、すなわち速さの勾配には変化が見られなかったが、偶然誤差、すなわち速さの残差の分散では有意差が見られた。系統誤差に関しては被験者に正解を教示していなかったため、変化が見られないのは自然な結果と考えられる。これらに基づき、本論文では、AWB-FTI における指触覚の滑り刺激の知覚からストローク表現までの知覚表現技能の向上目的とし、長期トレーニング

について検討している.

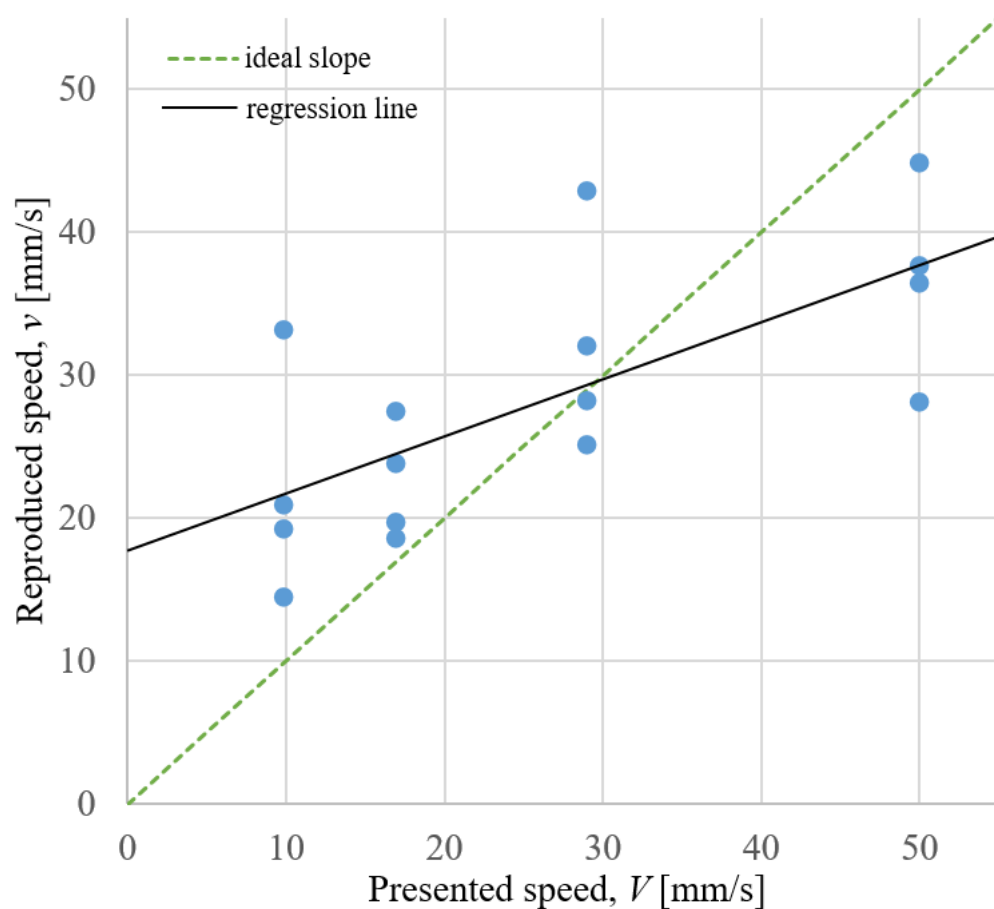


Fig.1 Reproduced speed characteristic of a participant.

以下に、触覚知覚の長期トレーニングについて従来研究を総括する。Wong, et al. (2013)[13]は、10名の被験者(男性4名、女性6名)に対して、溝のある装置を使い、指の触覚による方向知覚について4日間のトレーニングを行い、トレーニング後はトレーニング前と比べ約30%指先の触覚が鋭くなったと報告している。Imai et al. (2003)[14]は、16名の右利き男性の左手薬指について、触覚周波数弁別タスクのトレーニングを計22日間行い、前半の11日で大幅な触覚周波数弁別能力の改善があることを示した。また、Kaas (2013)[15]は、16名の被験者(男性6名、女性10名、右利き14名)に対して4日間、縦に並んだ2つのドットの群を1秒間手で触り、上部のドット群が下部のドット群に対して右か左かを答える指先の凹変形の知覚に関するトレーニングを行った。初日に対する知覚性能の改善度は平均で38.55%、被験者の中で一番改善した人は49.45%だった。

これらの研究結果から、触覚デバイスを用いたトレーニングに十分な可能性があるため、AWB-FTIでも同様に長期トレーニングを行うことで、滑り知覚／ストローク表現の性能が向上すると考えられる。そこで、本研究では、AWB-FTIを用いた長期触覚学習について検討を行った。すなわち、AWB-FTIについて8日間[1.5時間／日(休憩含む)、48ラン(=16×3)／日]のトレーニングを行い、提示した刺激を知覚／表現までのプロセスにおいて、学習前と学習後の知覚特性を比較し、どの程度、学習効果が出るのかについて検討を行った。ここで、単に提示した刺激を知覚するだけでなく、その知覚の表現まで併せて検討することの意味は以下のとおりである。すなわち、認知している線画を他者に伝えるには、それを描画する必要があること、および何らかの刺激により動作を知覚するだけでなく、知覚した動作を実際に表現することが動作学習に効果的であることに対応している。例えば、Lüttgen and Heuer (2012)[8]は、提示した手先の軌道の学習において、①視覚刺激のみにより知覚して学習した後、学習結果を手先のストローク動作(一画の運筆に相当する運動)として表現する方法、および②視覚刺激を受けるだけでなくそれと同時に手先をストローク動作させることで自己受容感覚も併せて用いて学習した後、学習結果をストローク動作として表現する方法を比較した。表現したストローク動作の速度軌道を提示した速度軌道に対する相関係数で評価した結果、①より②の方が有意に優れていることを示した。本研究では滑り刺激の認識の後に自己受容感覚でストロークを表現しているが、このような意味があると考えられる。

さらに、トレーニング効果を実際の使用例に近い形式で評価するために、AWB-FTIを用いて滑り刺激により直線を提示し、それらの組み合わせによっていくつかの線画パターンを提示した。その線画パターンの表現性能における8日間のトレーニングの変化を比較した。すなわち、AWB-FTIを用いて、触覚刺激により提示を受けた直線をストロークにより表現し、その後、自分の表現した直線と正解(提示された)の直線を指触覚を通してそれらの違いを感じることににより、知覚／表現性能を向上させるトレーニングを1日16ランのトレーニングセッション3セットを8日間(可能な限り連続した)、合計384ランのトレーニングを行い、どの程度まで正確に、線画パターンが表現できるようになるのか同様に調査した。

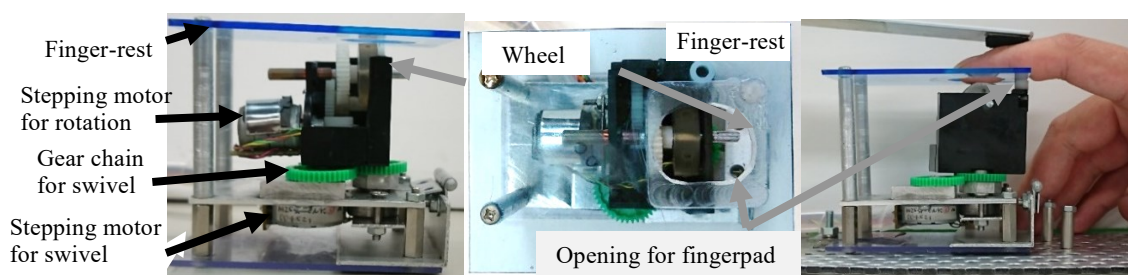
第2章 長期トレーニング実験

2.1 実験

2.1.1 実験装置

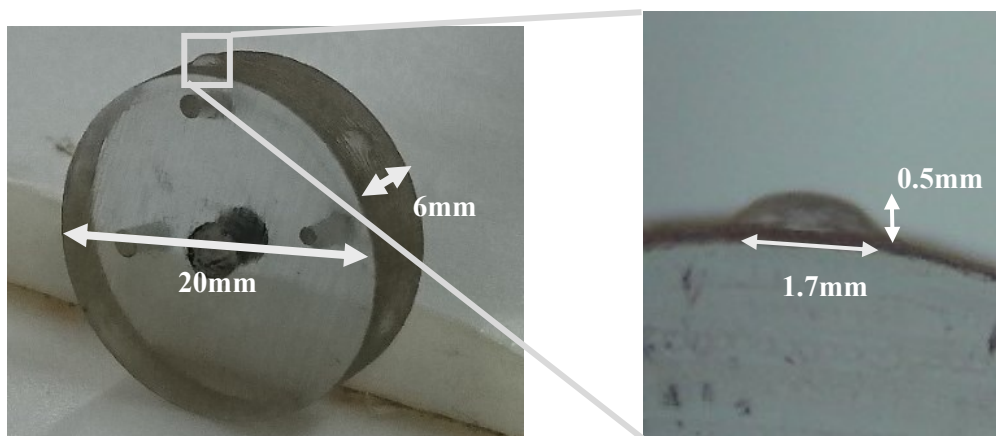
本論文で提案するアクティブホイール式指触覚インタフェース(AWB-FTI)は、水平な軸の周りで回転する薄板ホイールの回転、すなわち、ホイール自身の回転の角度と角速度、そして回転軸の水平面内における旋回角度を制御できる。図 2(a)(b)のように、2つのステッピングモータ、M25SP-6NK、および M15SP-2N(ともにミツミ電機株式会社製)を用いて、それぞれ、ホイールの旋回角の制御、およびホイール自身の回転速度と回転持続時間の制御を行っている。ホイールの旋回角は滑りの方向を定め、ホイール自身の回転の速さと持続時間は、滑りの速さと長さを定める。ホイールの形状に関しては、筆者らの先行研究(Nomura et al., 2014, 2015, 2016, 2018) により、凸点有り(Dot)・厚い(Drum)とした。すなわち、ホイールは、直径 20 mm、厚さ 6mm とし、表面には凸点を取り付けた。凸点は、点字用の凸点の JIS 規格が、高さ 0.3~0.5mm、底部直径 1.3~1.7 mm であることを考慮して、高さ 0.5mm、底部の円の直径 1.7 mm とした。また、隣接する凸点の間隔は、複数の凸点が指腹部に同時に接触しないようにし、10.5mm とした(図 3)。

知覚特性を安定させるため、示指の爪上に 0.5N の錘を載荷することで示指押当力を一定に保てるよう、片端自由梁構造の定荷重載荷機構を取り付けた(図 2(c))。また、知覚した線分の回答にはタッチパネルディスプレイ(TPD, Dell S2240 21.5, 1920×1060)を用いた。



(a) Front view of the finger-tactile interface (b) Top view (c) AWB-FTI in use

Fig.2 AWB-FTI: a wheel is swiveled and rotated by two stepping motors.



a) General view

(b) Geometrical dimensions of a raised dot

Fig.3 Oblique perspective picture of the wheel.

2.1.2 実験条件

実験条件を表 1 に示す．被験者は全員が右利きの男性 8 名(21~25 歳，平均 21.9 歳 ± 1.5 ，右利き)である．可能な限り連続で 8 日間トレーニングを行った．Imai (2003)[16] は，1 日 60~90 分のトレーニングを 30 日実施し，11 日目にして指触覚の周波数弁別能力の大幅な改善があることを示し，11 日目以降パフォーマンスに大きな変化がないことを示した．周波数による振動か，滑り刺激による指の凹変形を感じ取るかの違いはあるが，凹変形の方が実際に刺激をイメージしやすい．また，Kaas (2013)[15]は，1 日約 70 分，5 日間連続で，3 つのドット(ベースで直径 1.3 mm，上部で 0.05 mm，高さ 0.89 mm)を用い指先の凹変形の知覚に関する評価を行った．4 日目のトレーニングの後の評価と 5 日目のトレーニング後の知覚性能に有意差はなく，4 日目に学習が終了したことが示唆されている．

以上のことを踏まえ，本実験では，被験者の都合や休日を考え，被験者 1 人につき約 2 週間で実験を終了できるよう 8 日間のトレーニング期間を設けた．提示した滑りは，速さ因子で 10, 17, 29, 50 mm/s の 4 水準，時間因子で 1.0, 1.7, 2.9, 5.0 s の 4 水準とし，これら 2 因子の他，角度因子は 0° (滑り提示面内で右方向) から反時計方向に 337.5° まで 22.5° 刻みで 16 水準とした．また， $128 (=4 \times 4 \times 8)$ 直交表を用いて，速さと時間の組み合わせ 16 水準(=速さ 4 水準 \times 時間 4 水準)と角度 16 水準が被験者 8 名の間で総当たりとなるように調整し，1 回のトレーニングは 16 ラン(1 回の提示/回答をランと呼ぶ)で構成した．1 日にトレーニングを 3 セッション(16 ランを 1 セッションと呼ぶ)行った．また，途中段階での指触覚の感度の向上を測定するためにトレーニングの前後にテストセッションを 1 回ずつ行った(以後トレーニング前テストをプレテスト，トレーニング後テストをポストテストと呼ぶ)．結局，トレーニングは，1 名で 16 ラン

×3 セッション×8 日間=384 ラン行った．テストセッションに記憶による影響が出ないよう，トレーニングセッションとテストセッションは互いに同じ実験条件にならないようにした．また，各被験者が行うトレーニングセッションとテストセッションの組み合わせは，実際に覚えていないことと，同じ滑りの方が学習の進度を正確に測定できることから，8 日間全て同じである．そして，テストセッションとトレーニングセッションの組み合わせは被験者ごとに異なっている．すなわち，8 人の被験者の中で，実験水準である全ての角度と全ての速さ×時間が総当たりとなるようにした．実験時間は，休憩 30 分も含め，1 名約 90 分であった．実験後，表 2 に実施したアンケート内容と 8 日間の累計結果を示し，図 4 に被験者 8 人のアンケートの結果の 8 日間の推移を示した．

特に，問 3 における実験に関する疲労度の結果，8 日間で最も「④疲労しなかった．」が多く，また，「① 疲労し，知覚/表現が困難になった．」と答えた人は 8 日間で 1 人もいなかった．以上の結果から，疲労による知覚／表現への影響は認められず，8 日間しっかり学習できたと言える．また，被験者には 846 円/時間の報酬が支払われた．

Table 1 Experimental conditions.

Factor	Level
The number of subjects	8
Speed	10, 17, 29, 50 mm/s
Time duration	1.0, 1.7, 2.9, 5.0 s
Direction	0, 22.5, 45, 67.5, ----, 337.5 deg

Table 2 Experimental questionnaire and answer result.

Question	Level	Result(8 days Cumulative)
1 本日の体調はどうですか.	① 悪い., ② 概ね悪い., ③ 概ね良い., ④ 良い.	①:0 ②:5 ③:25 ④:34
2 実験中に眠気はありましたか.	① あった., ② 少しあった., ③ 概ねなかった., ④ なかった.	①:7 ②:18 ③:21 ④:18
3 実験を行っていく中で疲労しましたか. また, 表現に影響はありましたか.	① 疲労し, 知覚/表現が困難になった., ② 疲労し, 知覚/表現にいくらか影響した., ③ 疲労したが, 知覚/表現に影響はなかった., ④ 疲労しなかった.	①:0 ②:9 ③:19 ④:36
4 修正点を理解し, 学習できたと感じましたか.	① 学習できたと感じなかった., ② 学習できたと概ね感じなかった., ③ 概ね学習できたと感じた., ④ とても学習できたと感じた.	①:0 ②:11 ③:48 ④:5
5 トレーニングで, 速さのみを意識して回答したのは何回目のセッションまでですか.	① 慣れたので始めから全て(速さ, 時間, 角度)を意識していた., ② 1セッション目まで., ③ 2セッション目まで., ④ 3セッションとも.	①:24 ②:15 ③:13 ④:12

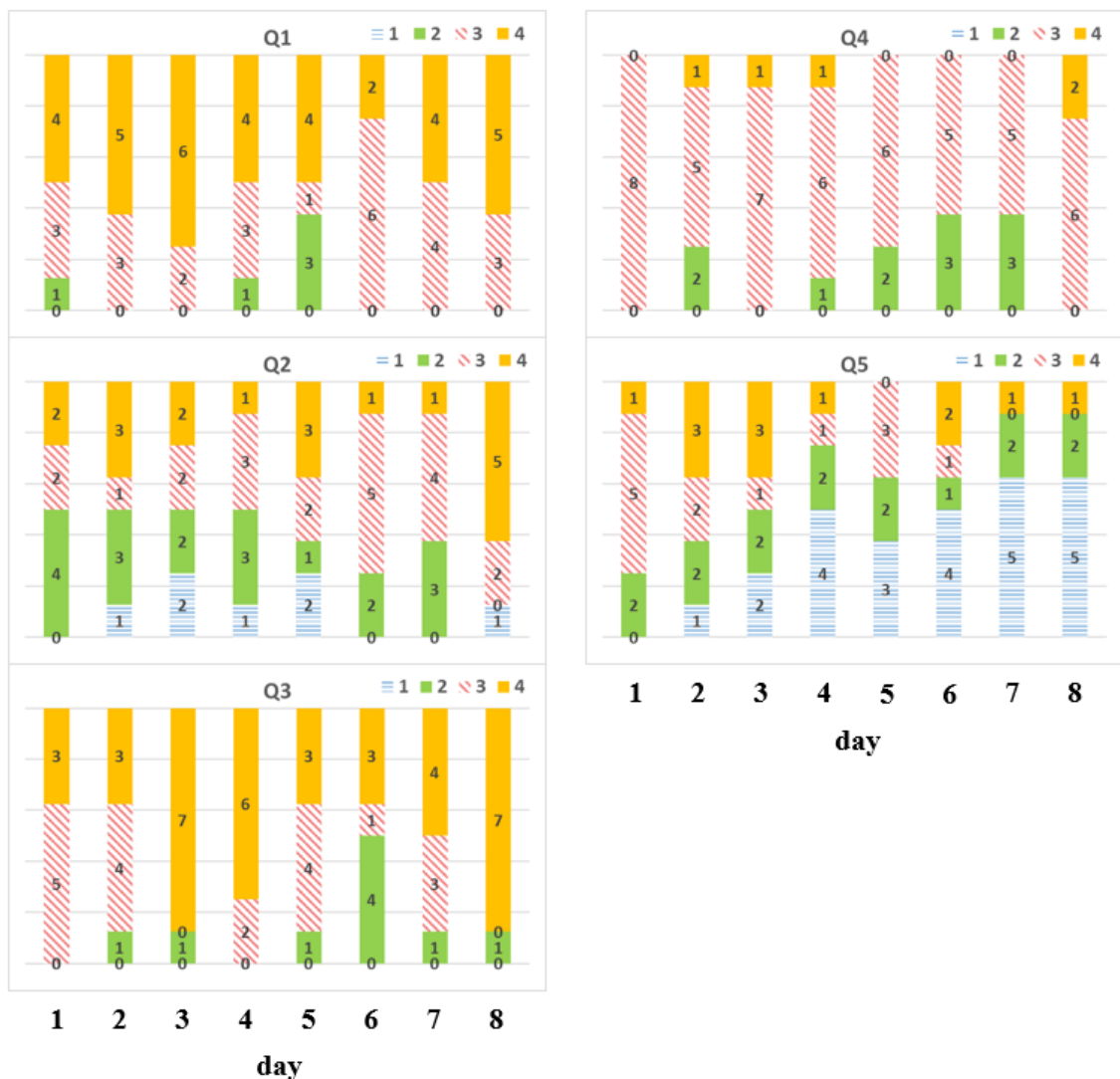


Fig.4 Questionnaire results over 8 days.

問1については、日によって少し差があるものの、8日間の累計でもっとも多かったのが「④ 良い。」であり、次いで「③ 概ね良い。」と大変良い体調で実験に臨めたと思われる。問2では、8日間の累計で最も多かったのは「③ 概ねなかった。」だが、眠気を感じていた被験者も若干名おり、それは朝早くもしくは、昼食後に行った実験が影響しているのかもしれない。問3に関しては上記のとおりである。問4では、8日間どの日にちを見ても、3以上が半分以上を占めており、概ね学習でいるという感覚はあることが分かった。図4の問5では、どのようにして8日間のトレーニングにおける学習の意識が「速さ」のみから他の物理量へと推移していくのかを表している。6日目から被験者の半数以上が最初から「速さ」以外の物理量も意識して

学習しており，8日間を通して徐々に「速さ」に慣れている感覚があることがわかる．

2.1.3 ランの手順

トレーニングセッションは以下の4つのStepで構成され実行される．被験者には，初めに知覚／表現の難しいと思われる「速さ」に注目して学習し，「速さ」に慣れたと感じてきたら，「時間」，「角度」についても注目していくように伝えた．いずれのStepでも被験者は閉眼している．

- **Step1 知覚**：左手人差し指でホイールからタスクとなる滑りベクトルを知覚する．知覚した滑りを，脳内で2次元の変位ベクトル(滑り提示の開始から終了までの総滑り量)および(時々刻々の滑りの)速度ベクトルとして認識する．これにより，メンタルモーションを生成する．
- **Step2 表現**：利き手(右手)でスタイラスペンを持ち，TPD上に知覚した刺激をストロークとして表現する．
- **Step3 回答提示**：Step2で表現したベクトルをAWB-FTIから滑りベクトルとして知覚する．ここで，Step1のメンタルモーションとStep2自分が表現した滑りベクトルの元となっていたメンタルモーションを比較し，両者のギャップを感じることで滑り感度を修正する．
- **Step4 正解提示**：Step3を踏まえて，もう一度Step1で提示した滑りベクトルをAWB-FTIで提示する．ここで，自分の表現した滑りベクトルとタスクの滑りベクトルを比較し，両者のギャップを感じることで滑り感度を修正する．

ここで，自分の回答を提示するナレッジ・オブ・リザルトであるStep3が重要であると考えており，メンタルイメージと滑り触覚刺激を感じながらオンラインで修正することができるので大きな学習効果が期待できると仮定した．Step4は，Step3でメンタルイメージと自分の回答の滑り刺激を比較する際，ストローク表現が入ってしまうため，提示された滑り刺激が曖昧になってしまう傾向があり，再度念押ししてStep1による提示された滑り刺激とStep3による自分の回答の滑り刺激を確認するために用いている．また，追加効果として滑り刺激を受容する経験を単純に積み重ねる

狙いもある。なお、プレ/ポストテストセッションは Step1 と Step2 のみにより構成される。

2.1.4 被験者の姿勢

被験者は、背筋を伸ばして椅子に座り、顎台に顎を乗せ、実験時、上腕は鉛直に、前腕は肩関節を内旋させて前額平行面に対して 45° に向けさせた。手関節は、肩関節の内旋と相殺するように 45° 尺屈させ、示指の遠・近位方向を AWB-FTI の長手方向に一致させた。被験者にはヘッドフォンを装着させ、実験合図を伝えるとともに、モータ音による滑り知覚への影響防止のためホワイトノイズを聴かせた。

2.1.5 実験手順

[被験者に対する教示]

実験の前に被験者に対して行った教示の内、手順の説明に先立って以下を教示した。

- (a) 滑りの知覚について：触れているホイールは鉛直軸の回りで任意の方向に旋回し、その後、ホイールの水平軸の回りで一定の角速度で任意の角度へ回転します。このとき、実際には円筒面が等速回転していますが、平面が台に平行に一定の速度で動いていると感じてください。
- (b) 滑りの刺激について：AWB-FTI から与えられる滑りの刺激は、速さ(方向付き)、時間、線分の長さ向きです。その内、滑りの速さ(方向付き)と時間に注意を向け、それらを組み合わせることで、速さを伴う 1 画の運筆運動と認識、記憶してください。

各ランの滑り提示・ストローク表現の手順を、教示に基づく被験者の応答も含め、説明する。

[手順 1] 準備

- (a) ヘッドフォンから「Number ○○。」の合図が聞こえたら、被験者は示指の指腹部がホイール外周面の上部に当たるように手首を屈曲させて示指の爪の上面に載荷機構を乗せる。次に示指を持ち上げて(伸展させて)ホイールから離し、閉眼する。その後、実験者は提示する滑りの方向にホイールの方向を変化させる。

[手順 2] 線分の知覚・記憶

- (b) ヘッドフォンから「Put your finger.」の合図が聞こえたら、被験者は AWB-FTI 上面の円形開口部を通して、示指を脱力・屈曲させ、その指腹部をホイール外周面上

に置く．この時，被験者は指先でホイールに触れてから「回転」するまでの時間，ホイールに触れた時の曲率の刺激によりホイールの方向を知覚し，これを次に提示される滑りの方向と認知し，記憶する．（注意：この時点では 180° 正反対の滑りの向きのいずれかはわからない）

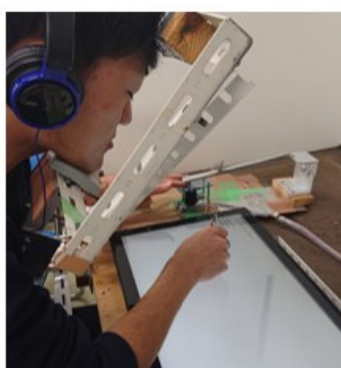
- (c) ホイールが回転を始めたら，被験者は，直前で記憶した始点における方向も参考にして，指先に伝わる滑りの向きを知覚し，さらにこの向きを線分の向きと認知する．その後，回転の速さが一定であるとして滑りの速さを認知する．同時に経過した時間も認知する．このように認知した滑りの向き，速さ，時間の組によりストロークとして記憶する（図 5(a)）．
- (d) 実験者が定荷重载荷機構のレバーを示指から離す．被験者は示指を持ち上げ，その状態で待機する．この間，記憶したストロークを想起する．

〔手順 3〕 知覚・記憶した線分の表現

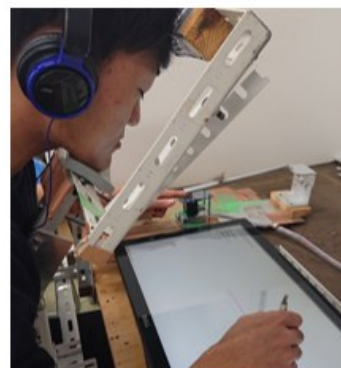
- (e) 提示終了後，「Answer.」の合図がある．この時，被験者は閉眼したまま，知覚・記憶したストロークの始点に相当する TPD 上の点にスタイラスペンを降す(図 5(b))．
- (f) 被験者は，知覚・記憶した線分の向きに，記憶した時間に到達するまで知覚したストロークの速さと向きにスタイラスペンを動かすことで表現する(図 5(c))．



(a) Accepting wheel rotation, a subject creates a mental image of a presented line segment.



(b) Subject put down a stylus pen on a TPD screen.



(c) Subject traces the mental image on the TPD by the stylus pen.

Fig.5 Sequence of procedure for the line-segment presentation/perception experiment.

2.2 実験結果・評価

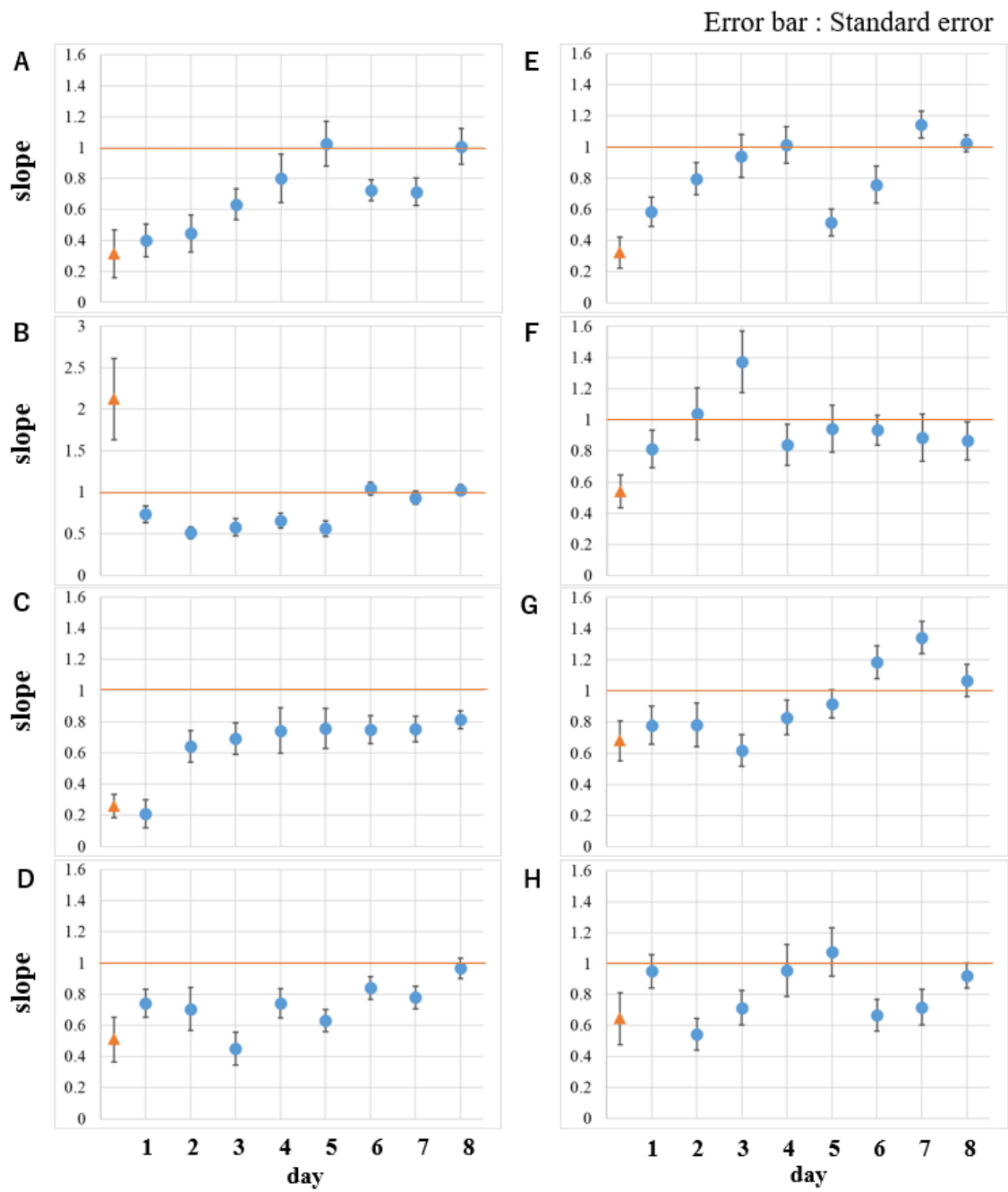
ストロークを知覚・認知・表現する際に被験者に注意を向けさせた速さ・時間・角度の知覚についての実験結果を述べる。

2.2.1 速さ知覚・時間知覚

(1) 実験結果

図 6 に各被験者の 8 日間のトレーニング結果を示す。ここで、図 6(a)は、滑りの提示速さと表現速さの線形回帰によって算出された直線の傾き、図 6(b)は、滑りの提示時間と表現時間の線形回帰によって算出された直線の傾きを表す。両図とも横軸はトレーニング日数を表す。オレンジ色の三角プロット点は、1 日目のプレテストセッション(pre1)の結果を、水色の丸プロット点は、1 日目から 8 日目までの各ポストテストセッション(post1~8)の結果を表す。エラーバーは標準誤差を表す(データ数 $n=16$)。また、オレンジの横線は、提示と知覚/表現が一致する理想の勾配 1 を表し、勾配が 1 に近づくほど知覚/表現精度が良いことを示す。速さに関して、個人差はあるが 8 日間のトレーニングによって直線の傾きすなわち、系統誤差と標準誤差すなわち、偶然誤差の改善があるように見える(post1-post8)。また、1 回のトレーニングでも多少の改善がみられる(pre1-post1)。一方で、時間に関しては、速さより劣るが 1 日間でも 8 日間でも改善しているように見える。

(a)



(b)

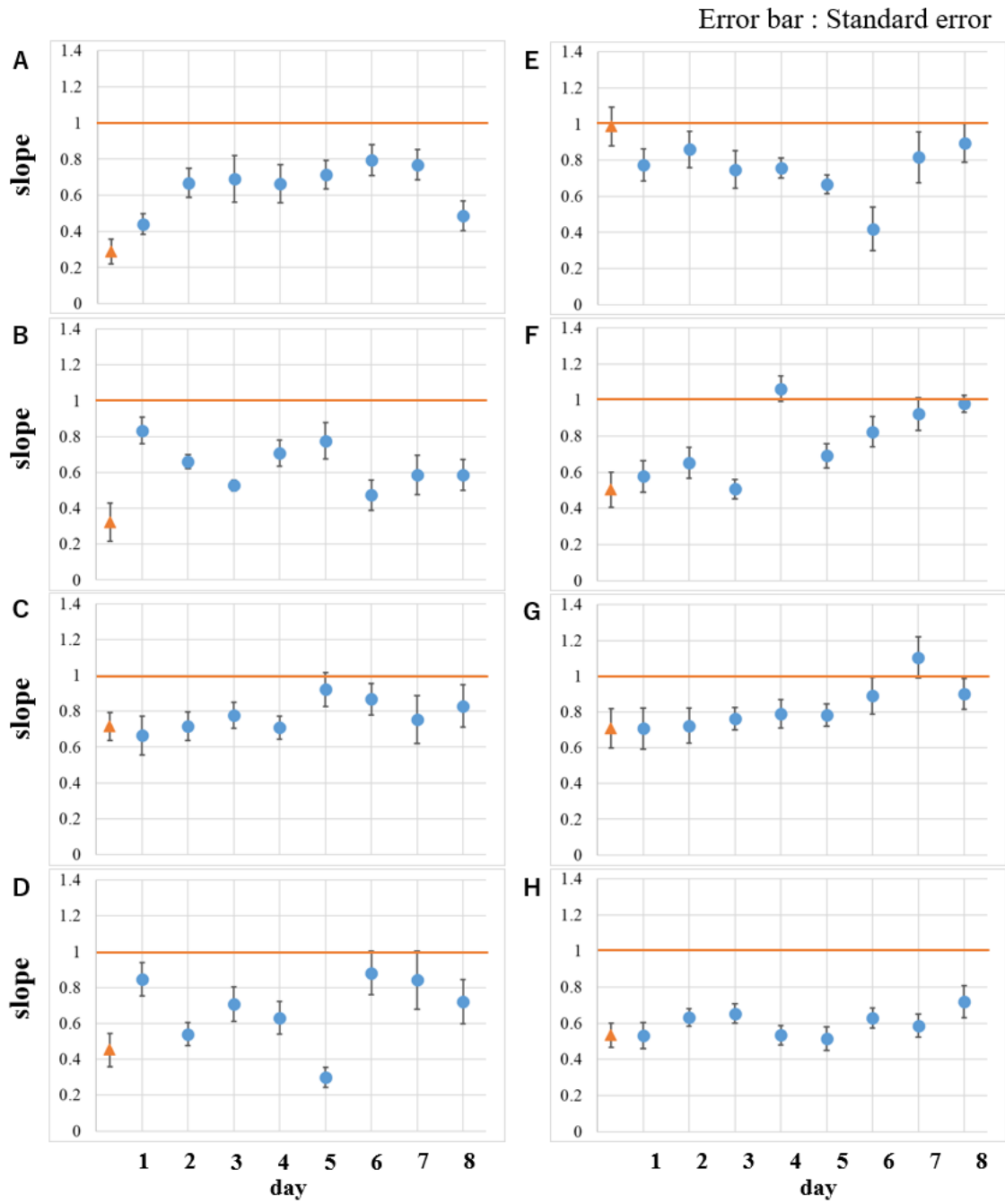


Fig.6 Results of 8 days training for all the eight participants (A to H): (a) Slopes of reproduced speed. (b) Slopes of reproduced time-duration.

(2) 評価

図7に全被験者をまとめたときの初日のプレテストセッションと8日間のポストテストセッションを提示/表現関係データについて回帰によって求めた直線の傾き，すなわち系統誤差を示す．図7(a)，(b)はそれぞれ速さ，時間の評価を表す．オレンジ色の三角プロット点は，1日目のプレテスト(pre1)のT値を表し，水色の丸プロット点は8日間のポストテスト(post1~8)のT値を表す(各データ数 $n=128$)．横軸は，トレーニング日数を，エラーバーは標準誤差，すなわち偶然誤差を示す．そして，本論文では，系統誤差，偶然誤差を統合して評価するため，線形回帰によって求めた直線の傾きすなわち系統誤差を，その傾きの標準誤差すなわち偶然誤差で割ることによってT値を算出し評価値とした．以下，図8に，上記の全被験者における8日間のトレーニングの評価を示す．速さは，8日間のトレーニングで著しい改善があるように見える(post1-post8)．また，1回のトレーニングでも改善があるように見える(pre1-post1)．一方，時間は，速さには劣るが8日間でも，1日間でも改善があるようにみえる．

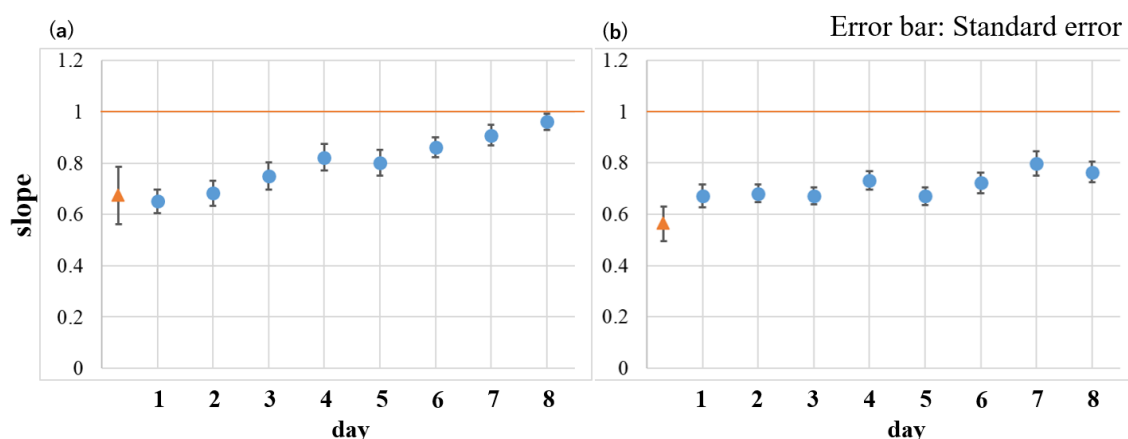


Fig.7 Characteristics of reproduced speed and time-duration of 8days training for all participants. (a) Characteristics of reproduced speed. (b) Characteristics of reproduced time-duration.

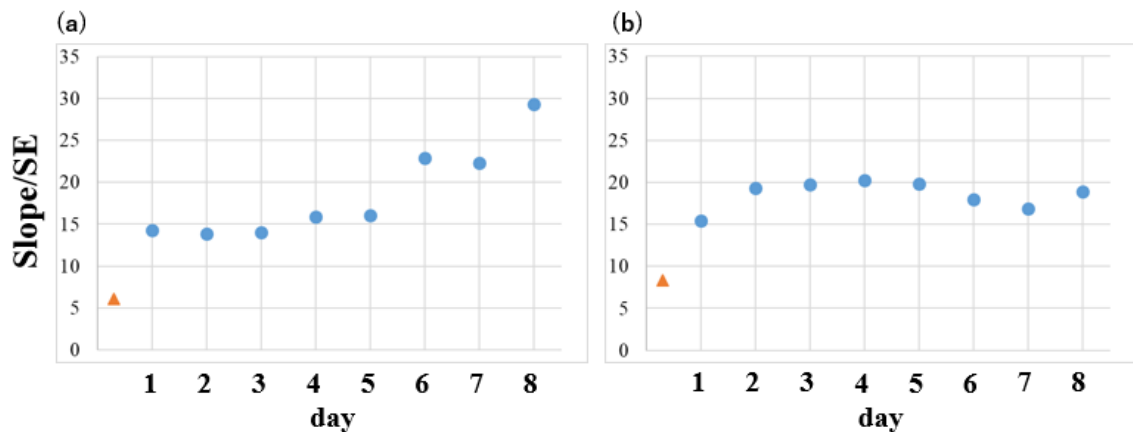


Fig.8 Evaluation of systematic and random errors in 8day training. (a) Characteristics of reproduced speed. (b) Characteristics of reproduced time-duration.

以下では、図 8 における T 値の差を対象として統計的検定を行う。はじめに、算出した T 値は、自由度が大きいため近似的に標準正規分布と見なすことができる。したがって、2 つの標準正規分布の差は、 $N(0,2)$ の正規分布に従う。それに基づき、初日の 1 日間(pre1-post1)と 8 日間(post1-post8)の有意確率を速さ、時間のそれぞれについて求めた。その結果を以下の表 3 に示す。この検定結果には、「検定統計量 T 値」のほかに、サンプルサイズによって変化しない指標である「効果量. d (effect size, Cohen, 1988)[11]」も併せて示してある。結果として、速さと時間、それぞれ 1 日間(pre1-post1)と 8 日間(post1-post8)に有意差があった。しかし、速さの 1 日間(pre1-post1), 時間の 1 日間(pre1-post1), 時間の 8 日間(post1-post8)には、十分な効果量がなかった(効果量(小)未満)。特に速さの 1 日間では、図 7 からわかるように標準誤差が大きいことが原因となっている。一方、速さ 8 日間(post1-post8)の効果量のみ、Cohen の示す効果量(中)である 0.5 を上回り、8 日間のトレーニング効果があることが分かった。

Table.3 Test results on (a) speed perception and (b) time-duration perception.

(a)

pre1-post1	post1-post8
***	***
$T=8.29$ $p=2.33\text{E-}9$ $d=0.0229$ $n=128$	$T=15.0$ $p=0$ $d=0.690$ $n=128$

(b)

pre1-post1	post1-post8
***	**
$T=7.17$ $p=2.01\text{E-}7$ $d=0.167$ $n=128$	$T=3.51$ $p=0.00651$ $d=0.196$ $n=128$

$T = T_1 - T_2$, NS : $p \geq 0.1$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

2.2.2 角度知覚

(1) 各被験者の結果

8 人の各被験者の 8 日間のトレーニングにおける提示角度に対する表現角度の誤差の結果を図 9 に示す。図 9 において、オレンジ色の三角プロット点は 1 日目のプレテストセッション(pre1)を表し、水色のプロット点は 8 日間のポストテストセッション(post1~8)それぞれ表現角度の誤差の平均を、エラーバーは標準偏差を表す。オレンジの直線は、誤差 0° を表す。標準偏差が跳ね上がってしまうところがあるのは、AWB-FTI の使い方に慣れていない被験者が、提示方向と回答方向が 180° 逆になっていることが原因となっている。

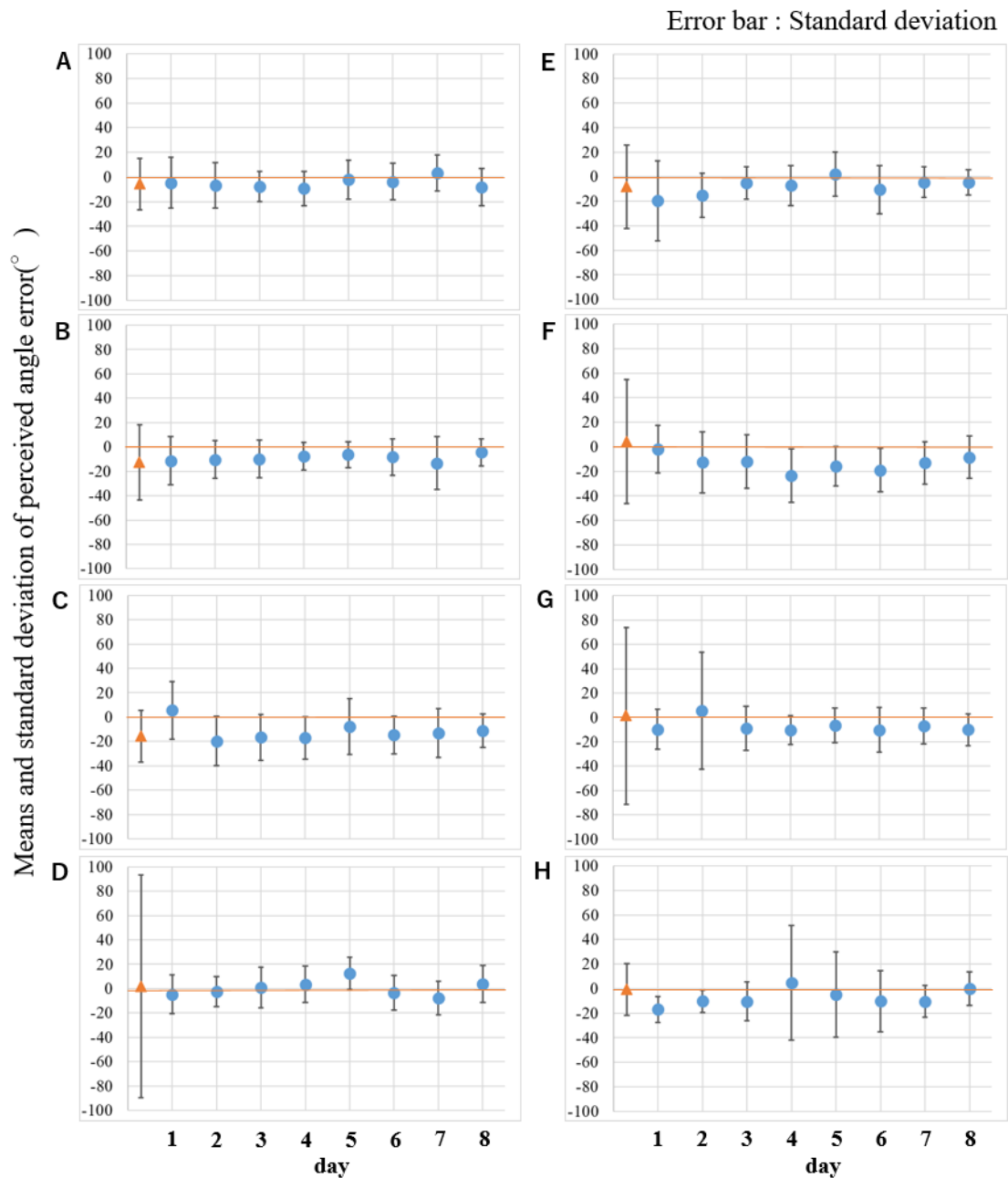


Fig.9 Means and standard deviation of perceived angle error of 8days training for each participant.

(2) 評価

図 9 における, 全被験者の提示角度に対する表現角度の誤差をまとめたものを図 10 に示す. 図 10 において, オレンジ色の三角プロット点は 1 日目のプレテストセッション(pre1)を, 水色のプロット点は 8 日間のポストテストセッション(post1~8), それぞれ

表現角度の誤差の平均を, エラーバーは標準偏差を表す. 図 10 での, 8 日間のまたは, 1 日間の分散比について検定を行ったところ, 8 日間のトレーニング($F=2.30, p=1.91E-6<0.001, n=128$), 1 日のトレーニング($F=5.05, p=2.09E-18<0.001, n=128$)共に偶然誤差, すなわちばらつきの標準偏差の有意な減少がみられた. ここで, この分散比はサンプルサイズの影響は基本的には受けないので効果量としての意味もあり, 1.5 以上またはその逆数以下であれば, 効果量として十分であるとされている(Buchner et al., 2014)[16]. 本実験で有意差が認められた 8 日間または 1 日間の分散比は, 2.30 または 5.05 となっており, 概ねこれを満たしている. 次に, 表現角度の系統誤差, すなわち平均は, 1 日間($t=0.731, p=0.466>0.05, d=0.0913, n=128$)でも 8 日間($t=1.11, p=0.267>0.05, d=0.139, n=128$)でも有意差はなかった.

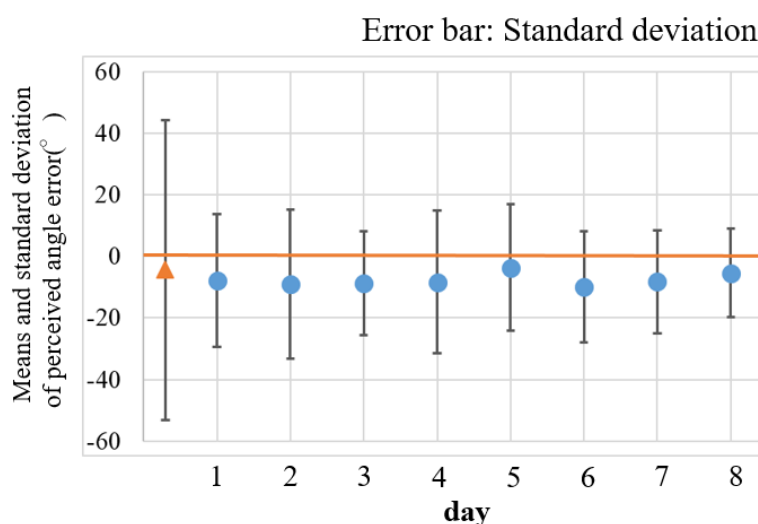


Fig.10 Means and standard deviation of perceived angle error for all participants.

第3章 線画パターンによるトレーニング効果の評価

線画パターンによる知覚表現実験の概要を以下に示す. 実際の使用を意識して, 5 人(学習した 8 人のうちの 5 人)の被験者には閉眼した状態で, 縦横 150 mm スケールの線画パターンを被験者 A と B の 2 名は 3 パターン, 被験者 C ~ E の 3 名は 5 パターン字書いてもらった. そのトレーニング成果を以下に示す. 第 2 章におけるトレーニング

ングの初日と最終日(8日目)での、滑り刺激の知覚・表現の感度を向上の程度を実際の使用方法に近い線画パターンを用いて調査した。本実験で用いた実験装置は、第2章で述べた装置(AWB-FTI)と同じものである。

提示方法は以下の通りである。AWB-FTIを用いて、被験者にスタイラスペンを用いて1画ずつ書いてもらった。なお、描画した線と次に描画する線画が繋がっていない場合は、スタイラスペンを空中に持った状態でAWB-FTIから滑り刺激に対してペン先を移動してもらった。その指示は、被験者にヘッドフォンを装着させ、滑り刺激を提示する前に刺激に対して描画するときは「pen down.」、滑り刺激に対して空中移動を行うときは「pen up.」の音声指示で行った。

実験結果

図11に線画パターンによる評価を行った全被験者の実験結果を示す。画角は全て縦横150mmを表している。一番上の行Referenceで示した線画パターンは、AWB-FTIで提示している線画パターンである。実線は、スタイラスペンを用いて描画する線を表し、破線は、空中移動する経路を表しています。番号は書き順を表す。星の印は線画パターンの開始点を表す。真ん中の行beforeは、トレーニング前を、一番下の行afterは、8日間のトレーニング後の被験者の書いた線画パターンを表す。











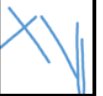
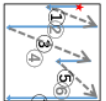










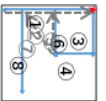










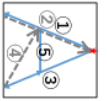
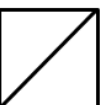
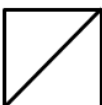
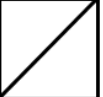
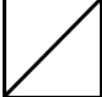






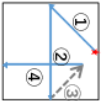
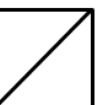
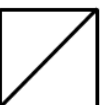
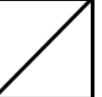
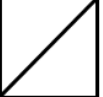






Reference1  150mm 150mm	被験者A before  after 	被験者B before  after 	被験者C before  after 	被験者D before  after 	被験者E before  after 
Reference2 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 
Reference3 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 
Reference4 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 
Reference5 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 	before  after 

Fig.11 Reproduced line-drawings before and after 8 days training.

上達度合いの差には、難易度に差があると考えられる。難易度は画数や辺の角度、さまざまな要因が考えられ、例えば、Reference 1 の線画パターンは、総画数 8 画(描画 5 画+空中移動 3 画)で構成され、3 番の線と 6 番の線が近く、4、5 番の線を挟んで書くことによって難易度が増しているため少し崩れた形となっていると考えられる。

一方で、Reference 5 の線画パターンは、総画数 4 画(描画 3 画+空中移動 1 画)で構成され、隣り合う画の角度は 45° 以内に抑えられていることも難易度がやや低い原因となっていると考えられる。また、1 画描画するごとに一旦、スタイラスペンを TPD から離してもらい、空中で保持しながら次の画の提示を行っていたため、線の終わりと次の線の始まりが一致しないことの原因となり、形が少し崩れてしまっている。そのような要因を除くと、トレーニング後には全体的にサイズ、形ともに正解に近づいているように見え、トレーニング効果があるように見える。

第4章 結言

本研究では、任意の方向、速さ、時間の滑りを指先の指腹部に提示できる装置として、水平な中心軸の周りで回転する小ホイール(直径 20mm)の回転の角度と角速度、そして鉛直な軸周りでのホイール中心軸の旋回の角度を制御できるアクティブホイール式指触覚インタフェース(AWB-FTI)を用いた。AWB-FTI による滑りの提示特性の学習効果(指触覚の感度の向上)を確かめるため、8 日間のトレーニングによる知覚特性の変化を調べた。すなわち、1 日にトレーニングセッションを 3 回行い、8 日間で、1 人当たり、384 ランのトレーニングを行った。また、その日の学習結果を調査するために、トレーニング前後にテストセッションを行った。

8 日間の指触覚トレーニングを実施したときの知覚表現した速さ、時間、そして角度の系統誤差および偶然誤差のそれぞれの評価量について、1 日目のプレテストセッションとポストテストセッション(1 日間)と 1 日目と 8 日目のポストテストセッションについてそれぞれ一対比較を実施した。これらの検定結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 速さ知覚/ストローク表現の感度(表現速さの提示速さに対する勾配に対する勾配の標準誤差)は、8 日間(post1-post8)の比較では、有意差あり、効果量あり(中)となり、トレーニング効果が確認できた($T=15.0, p=0<0.001, d=0.690, n=128$)。また、1 日間(pre1-post1)の比較では有意差はあるが、効果量がなく、標準誤差すなわち、ばらつきの影響が大きいことがわかった($T=8.29, p=2.33E-9<0.001, d=0.0229, n=128$)。つまり、わずかなトレーニングでは十分な効果は期待できないが、長期のトレーニングによって十分に知覚/表現性能が改善することがわかった。

- (2) 時間知覚/ストローク表現の感度(表現時間の提示時間に対する勾配に対する勾配の標準誤差)は 8 日間(post1-post8)の比較($T=3.51, p=0.00651<0.01, d=0.196, n=128$), 1 日間(pre1-post1)の比較($T=7.17, p=2.01E-7<0.001, d=0.167, n=128$)ともに有意差はあるが, 効果量が確認できなかったため, 有意なトレーニング効果は認められなかった.
- (3) 角度の系統誤差, すなわち平均には, 8 日間(post1-post8)の比較($t=1.11, p=0.267>0.05, d=0.139, n=128$), 1 日間(pre1-post1)の比較($t=0.731, p=0.466>0.05, d=0.0913, n=128$)それぞれに有意差は確認できなかった. 一方で, 角度表現の精密さ(偶然誤差, 表現角度の残差のばらつきの標準偏差)は, 1 日間(pre1-post1)の比較($F=5.05, p=2.09E-18<0.001, n=128$), 8 日間(post1-post8)の比較ともに有意差が見られた($F=2.30, p=1.91E-6<0.001, n=128$). その差は, 1 日間の方が大きかった.

速さの方が時間に対して改善がみられたのは, 速さを単に意識させただけでなく, 速さは動的な物理量であるので, 本研究の装置である AWB-FTI の触覚知覚と良く適合していたことが考えられる. 時間に関しては, そもそも脳内に備わっている認知時計が, 長年にわたりトレーニングされてきたと考えられる. それに比して, 8 日間という期間では改善しないと考えられる上, AWB-FTI は指触覚のみを改善するため, 妥当な結果と考えられる. 角度において, 1 日間の上達については, AWB-FTI の構造上, 表現の際に 180° 反転して表現してしまうことがあり, 被験者が単にこの仕様を学んだだけだと思われるが, 8 日間の比較から, トレーニングによって使い方だけでなく知覚/表現の精度が向上することがわかった.

また, 実際の使用を考慮し, 縦横 150 mm スケールの線画パターンを 3 または 5 パターンを 1 日目と 8 日目に書いてもらいどの程度改善されるか調査を行った. その結果, トレーニングによって速さの知覚/表現の精度が大幅に改善できたため, 線画パターンの大きさ(スケール)が正解に近づいた. しかし, 線画パターンを形成するにあたり, 重要な要素である角度は, 偶然誤差であるばらつきの改善がみられたが, 系統誤差の改善がみられていないため, 線画パターン全体の印象という意味では改善が見られなかった. 以上を踏まえて, 日常で使う分には問題のない程度に改善が見られたと言えるだろう. また, 3.3 から 8 日間にとどまらず, AWB-FTI を使い続けてもらおうと更なる改善の可能性があることが示唆された.

今後は, 本実験の結果と既存研究を踏まえ, 実験によって向上した触覚知覚能力の保持がどの程度可能なのかについても調べていきたい.

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧な御指導，御助言を賜りました三重大学工学部 野村由司彦教授に厚く御礼申し上げます．この場をお借りして謹んで感謝の意を表します．

また実験に協力頂いた外部被験者の方々，プロセス解析研究室の方々に御礼申し上げます．

最後に，本論文の作成に当たり，多大な御協力を頂きました野村由司彦教授，加藤典彦准教授に重ねて御礼申し上げます．

本研究は，日本学術振興会科学技術研究費補助金，基盤研究(B) 15H02929「弱い力による「誘発」に着目した動作教示手法の提案と一般手法に対する多次元的比較」の支援による．

参考文献

- [1]Provancher, W.R. and Sylvester, N.D., Fingerpad skin stretch increases the perception of virtual friction, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.2, No.4 (2009), pp. 212-223.
- [2]Koslover, R.L., Gleeson, B.T., De Bever, J.T. and Provancher, W.R., Mobile navigation using haptic, audio, and visual direction cues with a handheld test platform, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.5, No.1 (2012), pp.33-38.
- [3]Ho, C., Kim, J., Patil, S. and Goldberg, K., The slip-pad: a haptic display using interleaved belts to simulate lateral and rotational slip, *IEEE World Haptics Conference (WHC)* (2015), pp.189-195.
- [4]Nomura, Y. and Iwabu, K., Length perceptual characteristics on raised-dot slippages, *Human-computer Interfaces and Interactivity: Emergent Research and Applications*, IGI Global (2014), pp. 286-308.
- [5]Nomura, Y., and Kato, H., Raised-dot slippage perception on fingerpad using active wheel device, *Recent Advances on Using Virtual Reality Technologies for Rehabilitation*, Nova Science Publishers, Inc. New York (2015), pp. 165-172.
- [6]Nomura, Y. and Oike, S., Active-Wheel Mouse for Human-Computer Interface: Slippage-Perception Characteristics on Fingerpad, *10th International Conference, UAHCI 2016, Part II Part of HCI International* (2016), pp. 54-61
- [7]Nomura, Y., Kashino, Y. and Sugiura, T., Line-drawing presentation strategies with an active-wheel mouse, *ACHI 2018: The Eleventh International Conference on Advances in Computer-Human Interactions* (2018), pp.199-203,
- [8]Lüttgen, J. and Heuer, H., Robotic guidance benefits the learning of dynamic, but not of spatial movement characteristics., *Experimental brain research*, Vol.222, No.1-2(2012), pp.1-9.
- [9] Wong, M., Gnanakumaran, V., & Goldreich, D. Tactile spatial acuity enhancement in blindness: evidence for experience-dependent mechanisms. *Journal of Neuroscience*, 2011, 31(19), 7028-7037.
- [10]Ballardini, G., Carlini, G., Giannoni, P., Scheidt, R. A., Nisky, I., and Casadio, M., Tactile-STAR: A Novel Tactile STimulator And Recorder System for Evaluating and Improving Tactile Perception., *Frontiers in neurorobotics*, Vol.12, No.12. (2018)
- [11]Cohen, J., *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.), Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum (1988).
- [12]Katsuta, K., Nomura, Y., Kato, N. and Inagaki, S., Comparison between Four Assignments of slip-perception and stroke-reproduction task to dominant/nondominant hand, *Transactions of the JSME (in Japanese)* , 85.876 (2019): 19-00032.
- [13] Wong, M., Peters, R. M., & Goldreich, D. A physical constraint on perceptual learning: tactile spatial acuity improves with training to a limit set by finger size. *Journal of Neuroscience*, 2013, 33(22), 9345-9352.
- [14] Imai, T., Kamping, S., Breitenstein, C., Pantev, C., Lütkenhöner, B., & Knecht, S. Learning of tactile frequency discrimination in humans. *Human brain mapping*, 2003, 18(4), 260-271
- [15] Kaas, A. L., van de Ven, V., Reithler, J., & Goebel, R. Tactile perceptual learning: learning curves and transfer to the contralateral finger. *Experimental brain research*, 2013, 224(3), 477-488.
- [16]Buchner, A., Erdfelder, E., Faul, F. and Lang, A.-G., *G*Power 3.1 manual* (2014), available from <<http://www.gpower.hhu.de/>>, (accessed on 24 January, 2019) p.41

付録

さらなる長期学習の効果

8日間というトレーニング期間を経て改善が見受けられたが、更にトレーニングを続けるとどの程度まで字が上達するのかを、実験者自身が、3.1と同様に第2章で用いた装置(AWB-FTI)を用いて、触覚学習における限界追及の参考追加実験を行った。実験者は以前にもこの装置を何度も使用したことがあり、どの程度の上達度から始まっているのかは分からない。そのため、実験者のトレーニング結果が変わらなくなったところを限界とした。結果として3日間のトレーニングで、被験者の8日目程度の精度を出せるようになり、合計で9日間にわたりトレーニングを行った。(Kaas, A. 2013)[15]は、一度トレーニングを行った指先の触覚知覚性能が約1.5年後にどの程度保持されるか調べる実験を行い、完全な性能の保持は見られないが、数回のトレーニングにより知覚性能が戻ることを示しており、妥当な回数だと判断した。トレーニング内容は、2章の実験と同じように「速さ」に注目して1日48ラン(=16ラン×3セッション)。また、線画パターンによる上達度の評価のため、存在しない3.2.1とはまた別の6パターンを第三者に作成してもらい、3日ごとに測定した。以下の図12にその結果を示した。Referenceの実線は、スタイラスペンを用いて描画する線を表し、破線は被験者の空中での動作を表しています。番号は書き順を表し、星印は線画パターンの開始点を表す。Baselineは、実験を始める前に実験者が書いた線画パターンである。

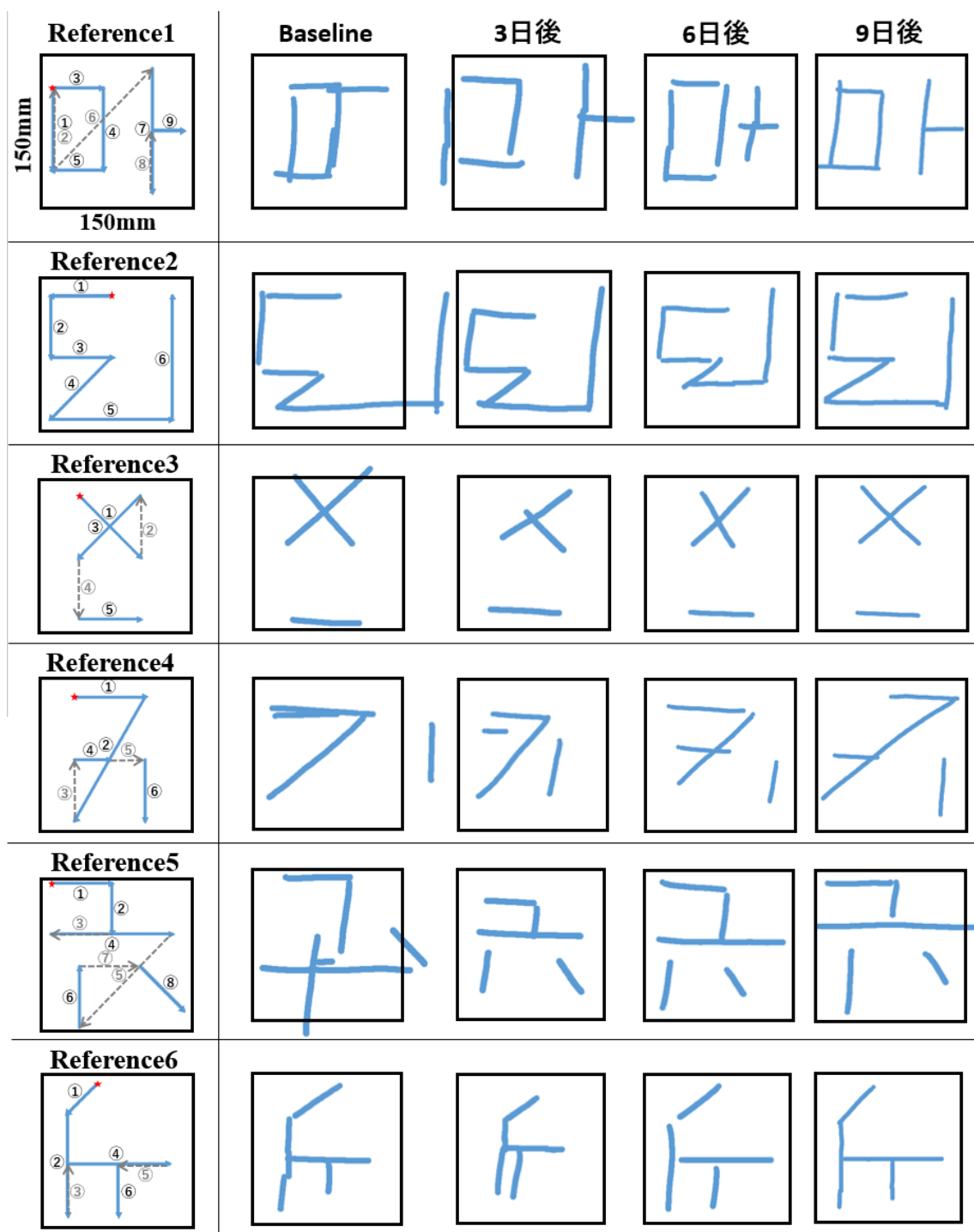


Fig.12 Result of characters limit pursuit.