

修士論文

アクティブホイール式指触覚インタフェースに
おける指腹部滑り知覚特性および線画提示

指導教員 野村由司彦 教授

平成 28 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

415M112 檜野 芳明

目次

第1章	緒言	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	従来研究	2
1.3	本研究の方針	4
第2章	疑似運筆運動提示実験	5
2.1	実験概要	5
2.2	実験装置	5
2.2.1	チンレスト, 走査面	9
2.3	提示方法	10
2.4	実験条件	14
2.5	実験方法	15
2.6	実験結果	20
2.6.1	長さ知覚	21
2.6.2	角度知覚	22
2.6.3	速さ知覚	22
2.7	考察	22
第3章	結言	24
	参考文献	25
	謝辞	26

图目录

Fig. 2-1	Side view of active-wheel device equipped with two stepping motors: one for rotation, and the other for swivel	7
Fig. 2-2	Wheel rotation appearance. The hemisphere-shaped raised dots (that is colored by red in this figure) are moved along with wheel's rolling.	7
Fig. 2-3	Top views of swivel mechanism: the pictures of (a), (b), and (c) correspond to the swivel angle of 0 degree, 45 degrees, and 90 degrees, respectively.	7
Fig. 2-4	Wheel view	8
Fig. 2-5	Active-wheel mouse (AWM) : the active-wheel-based finger tactile interface (AWB-FTI) is attached to mouse interface.	8
Fig. 2-6	Top view of active-wheel device	8
Fig. 2-7	Subject posture: subject put one's chin on the chin rest, so that his visual axis becomes perpendicular to the sweeping-plane, and the perspective projection-related distortion does not occur when move his hand with mental image on the sweeping-plane.....	9
Fig. 2-8	Presentation mode of the "While-perceiving go" method. Slippage is presented momentarily via subject's finger-pad skin. The slippage direction is swivelled to a next sub-goal (shown by the filled-gray circle, Sub-goal_1) and the speed is given as the desired speed at proxy of subject's present position (shown by the green arrow). Subject moves his hand while perceiving the slippage. If subject reaches near to the next sub-goal (Pegging-accession range), the next slippage swivelled to a next sub-goal (Sub-goal_2) will be presented. Repeating above movements, subject reachesthe goal.	11
Fig. 2-9	Presentation mode of the "After perceive go". Firstly, slippage is presented via subject's finger-pad skin. Subject perceive movement direction, speed and length with the slippage direction, speed and duration. After perceive the slippage, subject move them hand with the perceived motion. When subject complete the motion, a next slippage will be presented by subject pushing button.	14
Fig. 2-10	In procedure 2 and 5, subject move the interface while perceiving slippage (a). In procedure 3 and 6, subject move the interface based on the perceived motion.	17
Fig. 2-11	In procedure 2 and 5, firstly, subject perceive slippage, and after then, move interface (a). In procedure 3 and 6, subject move the interface based on the perceived motion (b).	19

Fig. 2-12 Example of motion trajectory when reduction 20

Fig. 2-13 Examples of motion speed trajectories. The black-colored solid line is the subject's actual speed, and the black-colored broken line shows the average of each of the movement speed, and the red-colored solid line shows the desire speed. The speed error of the first movement are shown as (Δv_1) 21

表目次

Table 2-1	Expermental conditions	15
-----------	------------------------------	----

第1章 緒言

1.1 本研究の背景

人は視覚により、外界から多くの情報を得ている。そのため、視覚に障害を持つと日常生活は不自由なものとなる。そのような障害を持つ人たちは、視覚に代わる感覚として聴覚や、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）を用いて情報を得ている。例を挙げると、皮膚感覚により文字の読み取りには点字を、道を知るためには杖や点字ブロックにより情報を得ている。しかし、触覚のみを用いて点字や点字ブロックを探り当てることは非常に困難であり、そして読み取り、認知するのに多くの時間を要する。それに加えて、屋外では障害物や人ごみ、交通量が多い環境では歩行に大きな危険が伴う。また、情報の取得だけでなく伝達にも不都合があり、文字として情報を交換することは困難である。

日常生活における情報伝達を支援するために、ハプティクスのみを用いた文字の提示・学習や、目的位置までの案内を行う研究が進められている。文字学習実験の多くは触力覚デバイスを用いており、被験者の手先や腕を牽引することにより触運動覚や触力覚を併用して学習を行う。装置により被験者自身の腕が動かされるため、視覚を用いずとも文字の提示・知覚の性能は高い。しかし手先や腕を動かすための機構が大がかりなものとなり、製作・使用・携帯が困難であるほかに作業空間に制限があるといった問題が挙げられる。

その一方で、小型化された装置により、装着・携行した状態で運動を提示する研究もまた行われている。こちらは装置に取り付けられた振動子や触覚器を動作させることで、皮膚感覚を通して運動の提示を行う。しかし、装置の小型化に伴い、提示可能な物理量の減少や提示領域の制限がなどの問題が存在する。結果として、装置は移動方向のみ提示し、移動量の知覚は被験者自身の自己受容感覚に依る。また、移動速度については考慮されていない場合が多い。

筆者らは、運筆運動のような腕の移動方向・距離に加え、速さも含めた運動の提示・学習を目標としている。触力覚デバイスと比較すると提示の性能は劣るとしても、小型で利便性の高い指触覚（指先指腹部の皮膚感覚）を用いたインタフェースの開発を目指している。

1.2 従来研究

触覚を通して情報伝達するためのマンマシンーフエースの研究は多く行われており、装着型も含め、携帯することもできる小型インタフェースにより、人に運動を提示することを目的とした研究も数多く進められている。

装着型の運動提示インタフェースとして、振動子を用いた研究がある。Tsudaらは親指・中指・小指・手首の背側面に振動子を取り付け、2次元図形や文字の描画運動を提示する研究を行った[1]。そのインタフェースでは、2リンク機構の装置の手先を書道の筆の様に把持し、運筆運動を行う。被験者が目標軌跡から外れた場合のみ振動が提示され、このとき被験者は目標軌跡に戻るために能動的に運動を行う。図形や文字の学習は可能だが、移動の速さについては考慮されていない。

また、Causoも同様に振動子を用いた運動提示の研究を行った。こちらは前腕の腹掌側・背側・橈側（親指側）・尺側（小指側）の4つの側面に振動子を取り付け、3次元的な移動を提示している[2]。ただし、同時に複数の刺激への対応を求めることは困難であることから、振動の提示は1軸毎に行われ、提示開始から終了までに多くの時間を要した。しかも、提示できるのは移動方向のみであり、移動量や速さの提示に関する考慮はされていない。これらのように振動子を用いて提示機構は比較的単純であり、小さく作成することができる。しかし、提示可能であるのは運動の方向のみであり、移動の量や速さについては考慮すること、また、同時に複数の提示がなされた場合の応答も困難であると考えられる。

Normanは、示指の指腹部に伸張刺激を与えることで運動の方向を提示することができる、掌サイズの装置を開発した[3]。0°から45°刻みの8方向への提示が可能であり、被験者は刺激で示された方向に装置を走査させることで運動の軌跡を知覚することが可能となる。ただし、ここでも提示可能であるのは移動の方向のみであり、移動量の知覚・記憶に関しては被験者が自ら動作させたときに得られる自己受容感覚に依存する。速度についても提示はできない。

Ionらは、2次元的に可動する触覚器を内蔵したリストバンド型の装置を開発したしており、触覚器を前腕背側面に接触させ、触覚器を移動させることで皮膚伸張刺激により方向の提示を行う[4]。この装置は曲線も提示可能であり、線分や英文字の提示実験を行っている。文字として知覚できている結果も示されているが、提示限界範囲がおよそ手のひらサイズとなっており、スケールを含めた提示は困難であると考えられる。

腕や手先の運動の提示の他にも、歩行を提示する装置の開発も行われている。Spiersは、箱型の歩行案内装置を開発した[5]。機構としては、上半分がヨー軸回りに旋回、そして前後方向に伸展可能となっている。

被験者は装置を保持し、上部の旋回方向に移動することで目的地に向かうことが可能である。目的地までの距離が伸展量で示されるが、伸展量の限界が 12mm となっており、絶対量としての移動距離の提示はかなり難しい。Koslover らは、指腹部へ皮膚伸張刺激により方向を提示する装置に、振動刺激や音声ガイドを組み合わせることで歩行を誘導するナビゲーションデバイスを開発した[6]。前後左右への移動方向を提示し、刺激に対する応答までの時間を測定している。音声や振動による提示は皮膚伸張刺激に比して応答時間が短いという点で優位な結果となっている。しかし、この実験では 4 方向のみであり、音声は別として、振動刺激の場合は提示方向を増やす、つまり提示方向の解像度を拡大することは困難と考えられる。このように、提示方向の解像度の観点で、皮膚伸張刺激による提示方式は有効であると期待される。

上記で挙げている通り、小型化された運動提示装置では、使用者の運動を直接矯正できる能力を持たせることはかなり難しく、その開発の目的は運動を示唆して使用者自身による能動的な運動を促すということになる。すなわち、使用者は装置からの提示を知覚し、能動的に反応する必要がある。また、装置の小型化に伴って生じる機構上の制約により、提示可能な物理量や絶対量に制限があり、大部分の装置が方向のみを提示するものとなっている。それらに対して、筆者らが提案する、指触覚インタフェースは小径ホイールを採用している[7]。ホイールの回転方向、速さ、持続時間を制御することで、指腹部へ直接的に任意方向の滑り提示を行う。これにより、使用者に対して、移動の方向だけでなく、運動、つまり移動の方向、距離、速さを提示が可能となることを期待している。

1.3 本研究の方針

本研究では、使用者の示指の指腹部に滑り刺激を提示することで、マウス走査の方向・速度・量を使用者に教示できるシステムの開発を目指す。使用者は、滑りの知覚に基づいて、マウスを走査させる。使用者は、自ら走査させたマウスの軌跡から、線画などの空間的なパターンや運筆に代表される手の運動などの時空間的なパターンを知覚できる。

実験は、具体的には、線画（運動）提示・知覚に関して、以下に述べるように、3段階で実施した。

- (1) 提示方式選定実験(最適なホイールを選択するための実験)：はじめに、ホイール形状を最適化することを目的として、ホイールの厚さ（厚い Drum／薄い Disc）や凸点の有／無を変更した4種類のホイールを比較する実験を行った。具体的には、4種類のホイールのそれぞれに対して、滑り提示時間一定条件の下で滑り速さのみを変化させて、「滑り長さ」（間接的には「滑り速さ」）と「滑り方向」の知覚特性を調べ、最も知覚特性の優れたホイール形状を選定した。
- (2) 滑り知覚特性測定実験(知覚長さをモデル化するための実験)：次に、選定したホイールを用いて、すべり提示持続時間と滑り長さ（間接的には「滑り速さ」）を組み合わせて変えて、滑り知覚特性測定実験を行った。滑り速さと滑り持続時間との関連で、「知覚速さのべき乗」と「知覚時間のべき乗」の積の形式による長さ知覚モデル式を作成した。
- (3) 実証実験(アクティブホイールマウスおよび長さ知覚モデルの有効性を確認するための実験)：(1)の提示方式選定実験により選定したホイールを用いた指触覚インタフェースをマウス前部に設置した「アクティブホイールマウス」を製作した。次に、複数の等速直線運動からなる疑似的な運筆運動提示実験を行い、使用者の運動知覚・記憶性能を検証し、指触覚インタフェースの線画、運動提示への可能性を調査する。

本論文では (3)の実証実験について記述する。

第2章 疑似運筆運動提示実験

2.1 実験概要

本実験の目的は、指触覚インタフェースにより被験者へ運動を提示し、提示された運動を知覚・記憶させることである。運動の提示には、筆者らが開発したアクティブホイール式指触覚インタフェース：アクティブホイールマウスを使用する。この装置は、薄板ホイールの回転により生成される滑り刺激を、指腹部皮膚感覚を通して使用者に与えることが可能であり、滑りの速度・持続時間を制御することで移動の方向・量・速さを変化させて提示することができる。

本実験では、単一の等速直線運動、および複数の等速直線運動を接続させた運動を提示した。被験者はインタフェースにより滑り刺激提示を受け、知覚した滑り刺激に応じて運動を行った。

提示した運動は、単一の等速直線運動2種、2本の等速直線運動を接続した運動2種、3本の等速直線運動を接続した運動2種の計6種である。また、被験者の現在位置のフィードバックの有無、それぞれにおいて提示を行った。運動のパターンや本数、提示方法による知覚・学習の性能や難度を測定するとともに、インタフェースとしての有用性を検証した。

2.2 実験装置

本研究で提案している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))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。このホイールの外周面に使用者の示指指先指腹部を押し当てることにより、使用者は指腹部の皮膚触覚を通して、滑りの方向と速さを知覚できる。なお、指腹部で触れているホイール外周面は円筒面であり、その回転により提示される滑りの速度と量は、物理的には周速度と円弧長である。しかし、回転に伴う滑り量の知覚に際し、知覚の心的表象である弧のメンタルイメージは再現し難いし、ましてや 360° を越す弧長はイメージが困難である。そこで、「滑りは円筒面ではなく平面の滑りと感じるよう」教示した。(この教示に関しては、いずれの被験者からも違和感はなかったと報告を受けた。)したがって、以下では、「滑った弧」の長さではなく、「滑った直線状の線分」の長さとして扱う。このことを含め、本インタフェースを用いることで、時々刻々、任意の方向への、任意の速さでの平面上の「滑り」が提示・知覚でき、その滑りの累積としての滑り軌跡を提示・知覚できる。さらに軌

跡を接続させることにより，字や図形，歩行経路などの線画も提示・知覚できると期待される．

次に，本インタフェースの構造について説明する．図 2-1 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，ホイールのスイベル（旋回）角度の制御，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．ホイールのスイベル角度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，滑りの速さと距離を定める．ホイールの形状に関しては，筆者らの先行研究（Kashino et al., 2016）を基に設計を行った．ホイールは，指触覚インタフェースがマウスと同程度以下に小さくなり，マウスなどに取り付けられるよう，直径を 20 mm とした．厚さに関しては，薄いホイールが指腹部に押し入ることによる溝様の皮膚変形刺激が強く感じられ，この溝様の皮膚変形刺激が却って長さ知覚に悪影響を及ぼすとの先行実験の結果をふまえ，ホイールの厚さは溝様の皮膚変形刺激が感じられない 6 mm のものを選定した．また，ホイール表面には凸点を形成した．この凸点により，皮膚に凹変形を引き起こし，さらに，ホイールの回転に伴いその凹変形部が変位（以下，「凹部変位」と呼ぶ）する．先行実験の結果，この凹部変位により，滑り方向の知覚性能が格段に向上したことを確認している．凸点は点字用の JIS 規格（高さ 0.3~0.5mm，底部直径 1.3~1.7 mm）に基づいて，高さ 0.5 mm，底部の円の直径 1.7 mm とした．また，凸点間隔については，筆者らのこれまでの研究（Yusoh et al, 2012; Nomura et al.; 2014; 岩部他, 2012, [8][9][10]）により，単一の凸点が触れる条件で，滑り知覚性能が最も高いことが分かっている．本実験では，上記の指腹部接触弧長が約 10 mm であることを考慮し，凸点間隔をそれより大きい 10.5 mm とし，単一凸点接触条件を実現した(図 2-4)．なお，本インタフェース(AWB-FTI)には，図 2-5 のように一端にマウスを取り付けた．以下，このマウスをアクティブホイールマウス（active-wheel mouse (AWM)）とよぶ．被験者は通常のマウス操作のように上面に手掌を載せて把持することで，自分の手や前腕にかかる重力を支えられ，使用に伴う疲労を低減できる．指に関しては，屈曲筋に力を入れず，自然に弱屈曲した状態で，指腹部がインタフェース上面に対して略平行，かつホイール上面に軽く触れるようにする．なお，機構上，ホイール上面は上記の手掌を載せるマウス上面より，35 mm 高い位置としたが，被験者から違和感なく操作することができたとの報告を受けている．

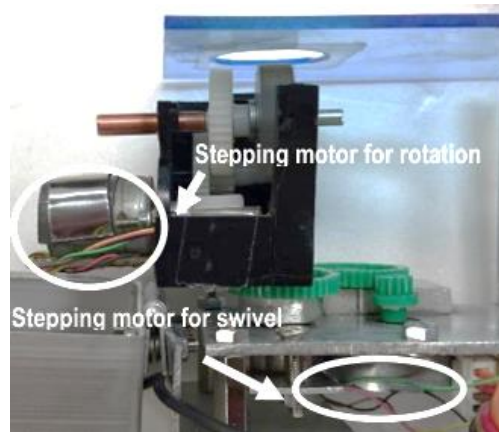


Fig. 2-1 Side view of active-wheel device equipped with two stepping motors: one for rotation, and the other for swivel

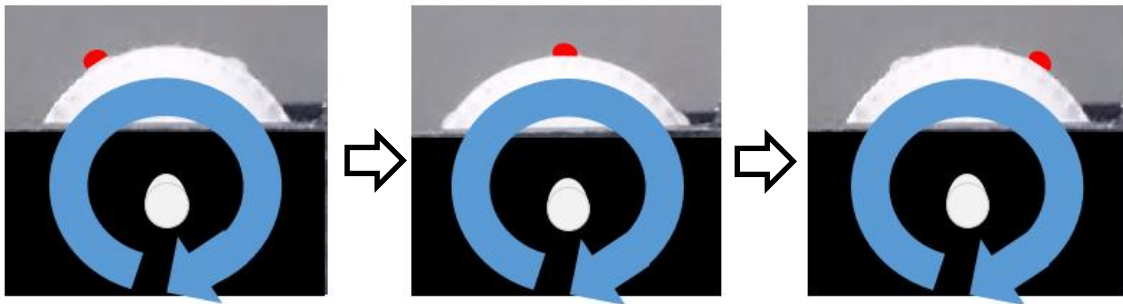


Fig. 2-2 Wheel rotation appearance. The hemisphere-shaped raised dots (that is colored by red in this figure) are moved along with wheel's rolling.

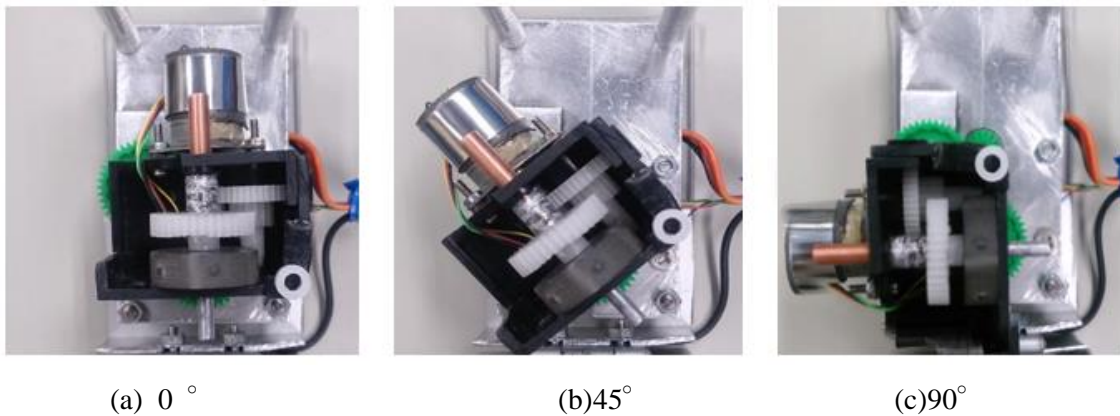
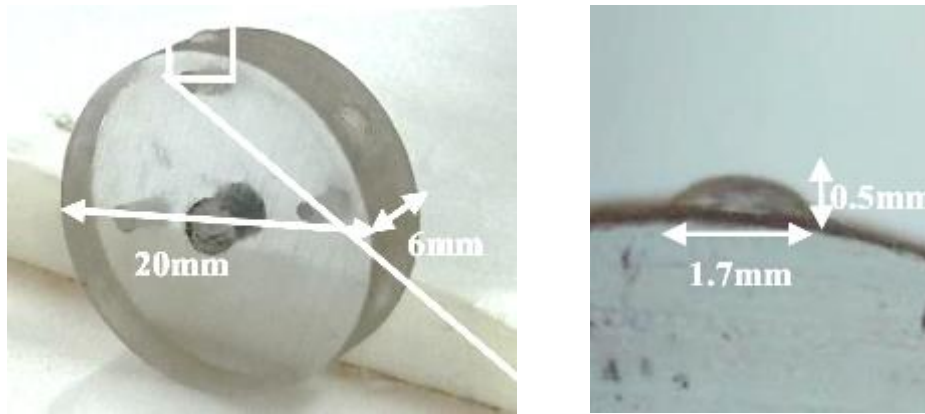


Fig. 2-3 Top views of swivel mechanism: the pictures of (a), (b), and (c) correspond to the swivel angle of 0 degree, 45 degrees, and 90 degrees, respectively.



(a) Oblique perspective picture of a wheel (b) Magnification of a raised dot
 Fig. 2-4 Wheel view

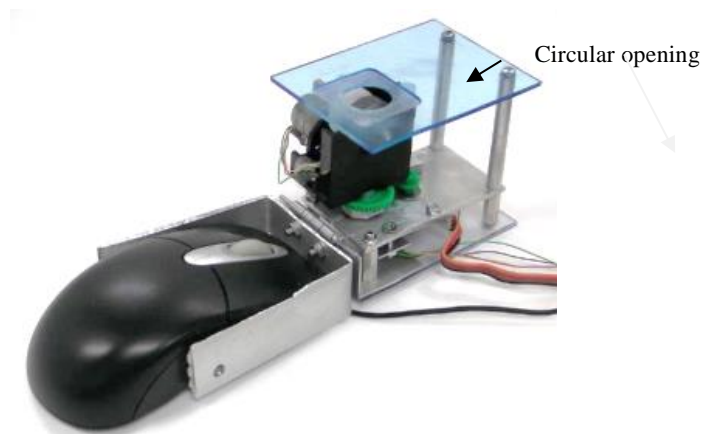


Fig. 2-5 Active-wheel mouse (AWM) : the active-wheel-based finger tactile interface (AWB-FTI) is attached to mouse interface.

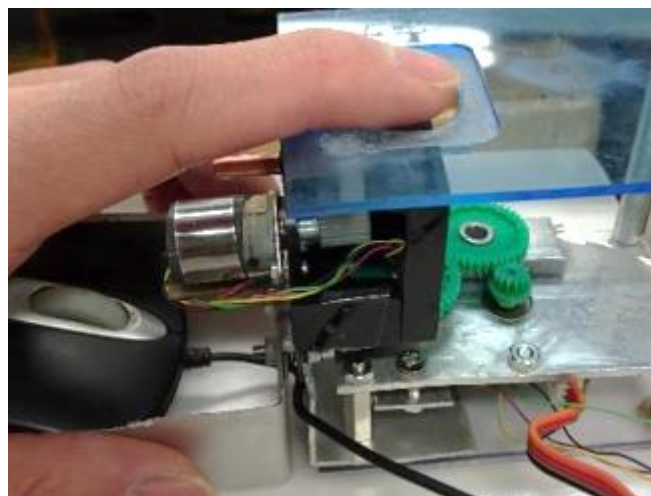


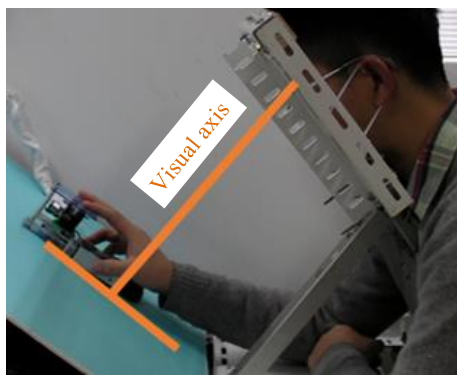
Fig. 2-6 Top view of active-wheel device

2.2.1 チンレスト，走査面

実験時の被験者の姿勢を図 2-7 に示す。被験者は、姿勢を一定に保つため、背筋を伸ばして椅子に座り、顎台に顎を乗せた状態で実験を行った。また、スマートフォンからホワイトノイズを流すことで、装置から発生するモータ駆動音などの外乱が知覚に影響を与えないようにした。インタフェース走査面を水平面に対して 30° 傾斜させた。さらに、被験者の視軸が走査面に垂直になるように、顎台を水平面に対して 60° 傾斜させた。このように走査面に対して視軸を垂直にすることで、AWM により提示される滑り刺激により知覚する移動方向・量と、自身のメンタルイメージ上での走査方向・量の間における歪みの発生を抑えた。実験を行う上で AWM の初期位置は走査面の中心位置とした。なお走査面横軸中心は、普段のマウス走査時を模して脱力時における利き腕の肩中心の前方に位置するように調整した。実験中、示指の遠・近位方向を AWB-FTI のホイールに一致させ、可能な限り AWM の向きが自身の正面となるように保持するように教示した。走査面の大きさは 600×600 mm であり、AWM の走査が十分に行える広さとした。また、光学式マウスを採用しており、配色の観点でマウス走査量の取得差異を低減させるため、走査面には青色のケント紙を貼付した。



(a) A photograph taken obliquely from behind



(b) Side view

Fig. 2-7 Subject posture: subject put one's chin on the chin rest, so that his visual axis becomes perpendicular to the sweeping-plane, and the perspective projection-related distortion does not occur when move his hand with mental image on the sweeping-plane.

2.3 提示方法

運動の提示には様々な手法が考えられる。触力覚デバイスを用いた運動学習に関する研究において、一般的な手法としては、目標値と被験者の現在値、つまり時々刻々における位置や速度の誤差を修正させる手法が挙げられる。これにより、被験者はリアルタイムで誤差を修正しながら正しい運動を学習することができる。しかし、この方式が有効に作用するのは、装置が修正力を加えることができ、手先や腕を牽引、または運動を矯正できる状況が必要である。一方で、我々が開発した AWM のような提示装置を用いての運動学習の場合、装置自体には被験者の手先を牽引する能力はなく、運動の指標となる刺激（本研究では滑り刺激）を提示して運動を示唆することのみが可能である。すなわち、被験者は刺激を知覚・認知したうえで、それに準じた運動を能動的に行う必要がある。しかし、人間の応答性能上、刺激を知覚した後、運動の認知・応答するまでには時間差があり、誤差修正の提示を行っても被験者は即時には反応できない。特に時系列的に変化する目標値への修正は極めて困難であり、学習には多くの時間を要すると考えられる。

このことを踏まえ、筆者らは運動の提示方法として、以下の2種の提示方法を採用した。

(1) **While-perceiving go method:** 被験者の手先（実際には、アクティブホイールマウス、AWM）の現在位置のみフィードバックを行う。この場合には、刺激の知覚から応答までの時間差に左右されないという利点がある。その一方で、時系列的な情報を得ることはできない。

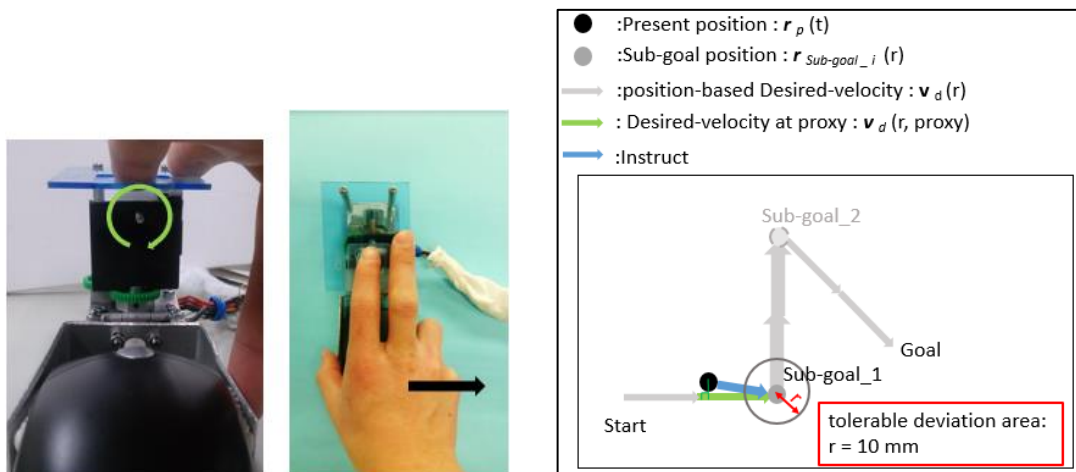
(2) **After-perception go method:** 被験者の現在値によらない。この場合には、時系列的な情報を得ることができる。その一方で、刺激の知覚に要する時間差などのため、知覚が追いつかない傾向がある。

(1) While-perceiving go method (図 2-8)

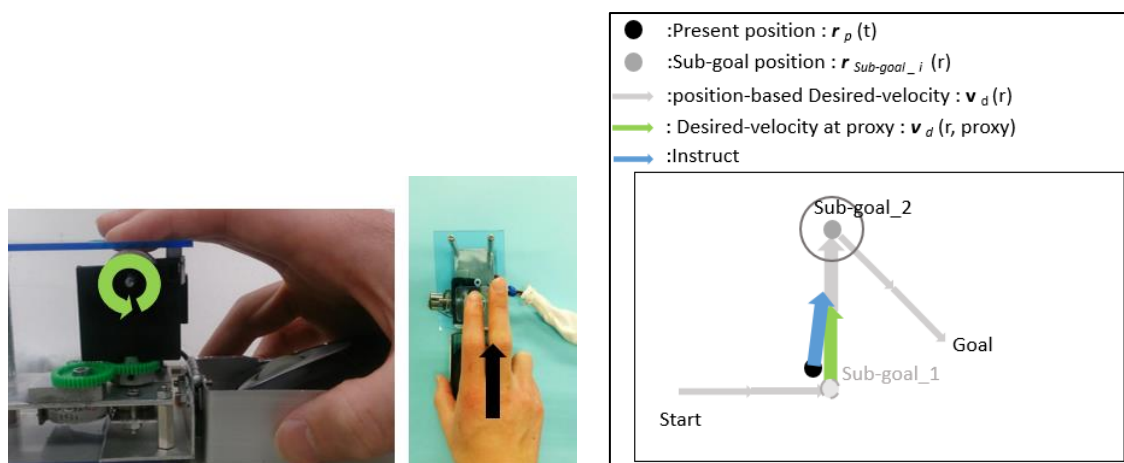
提示開始位置から最終目標位置間の経路上に複数の準目標位置 (Sub-goal) を設ける。なお、本実験では各等速直線運動の接続位置を準目標位置として設定した。滑りの方向は時々刻々、準目標位置に向かうように提示される(図 2-8, a)。また、滑り速度は被験者現在位置(Present position)に対応した目標経路上の最近接点における目標滑り速度(Desired-velocity at proxy)の絶対量が提示される。

被験者は、時々刻々滑り刺激を知覚しながら運動の速度を認知し、AWM を走査させる。被験者が準目標位置付近に到達したとき、次の到達位置へ向かう提示がなされる(図 2-8, b)。ただし、人間の自己受容感覚の *precisoin*(精密度)を考慮して、目標位置

から 10 mm までの範囲を到達の判定とした(tolerable deviation area wrt ending positions).



(a) Subject perceives slippage shown by the left figure of Fig.2-8 (a) and moves the interface(shown by the right figure of Fig.2-8 (a)).



(b) Subject perceives slippage shown by the left figure of Fig.2-8 (b) and moves the interface(shown by the right figure of Fig.2-8(b)).

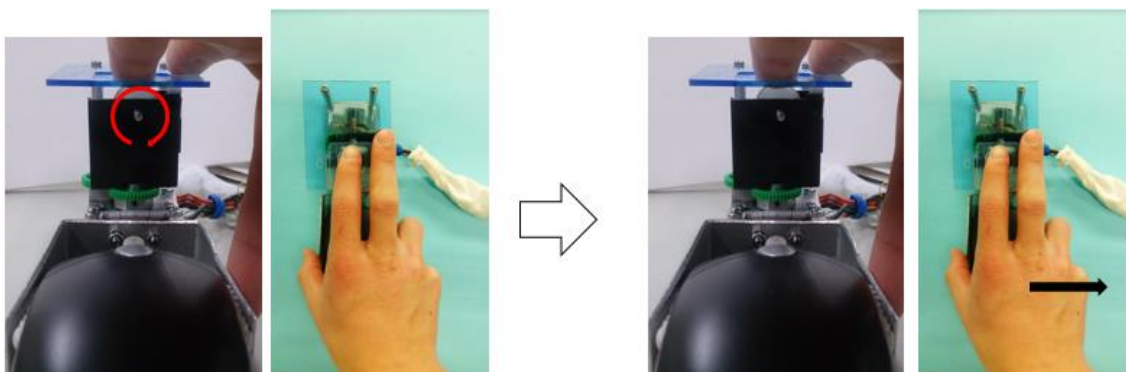
Fig. 2-8 Presentation mode of the “While-perceiving go” method. Slippage is presented momentarily via subject’s finger-pad skin. The slippage direction is swivelled to a next sub-goal (shown by the filled-gray circle, Sub-goal_1) and the speed is given as the desired speed at proxy of subject’s present position (shown by the green arrow). Subject moves his hand while perceiving the slippage. If subject reaches near to the next sub-goal (Pegging-accession range), the next slippage swivelled to a next sub-goal (Sub-goal_2) will be presented. Repeating above movements, subject reachesthe goal.

(2) After-perception go method (図 2-9)

本方法では、被験者は、線分毎に、逐次、滑り刺激の提示を受け、滑りを認知し、さらに AWM を走査することを繰り返す。すなわち、

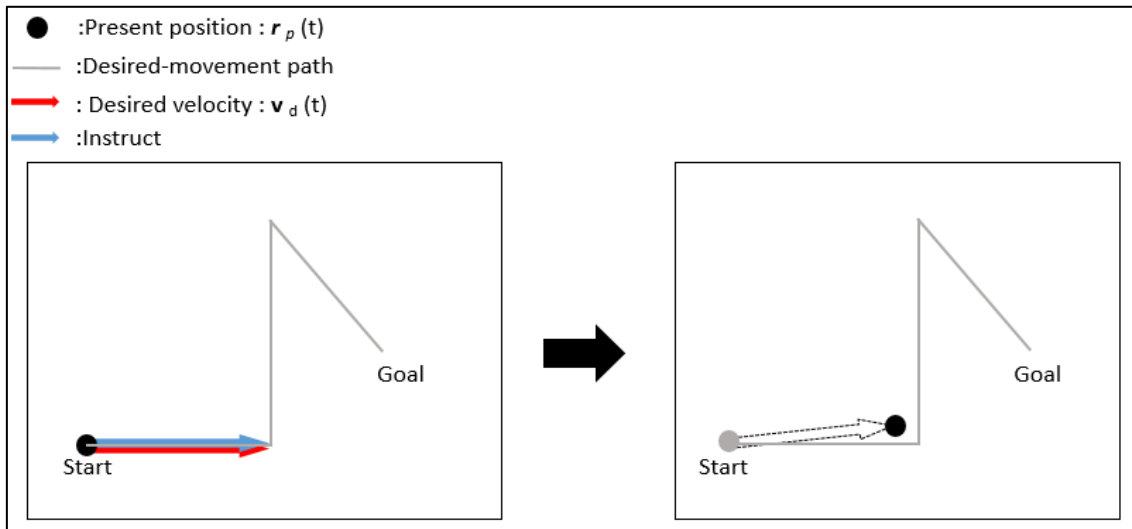
- ① 静止した状態で滑り刺激を知覚し、滑りを認知する(図 2-9, c-1, 左図)
- ② 提示終了後、知覚した運動に準じてインタフェースを走査する(図 2-9, c-1, 右図)。
- ③ 走査完了後、実験者に合図を送り、その場に静止して次の滑り刺激の提示を受ける (図 2-9, d-1, 左図)。

上記①～③を繰り返す。なお、被験者の提示を受けている腕とは逆の手元にあるボタンを押すことにより、2 本目以降の滑り刺激の提示への合図とした。

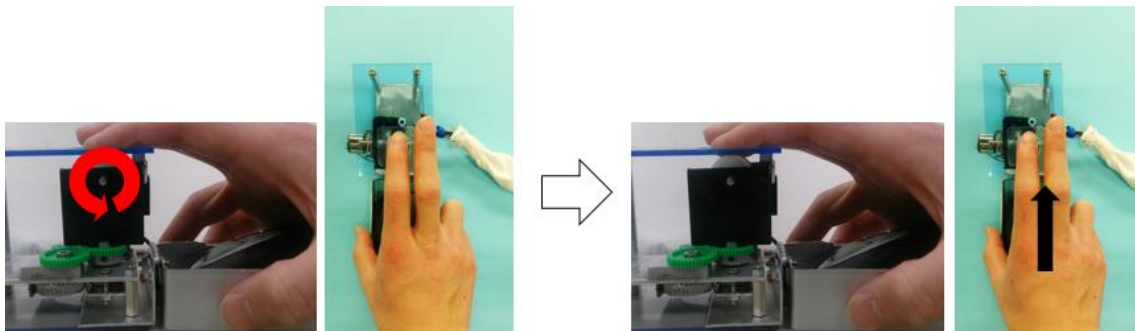


(c-1) Perceive slippage(left), and after then, move interface(right)

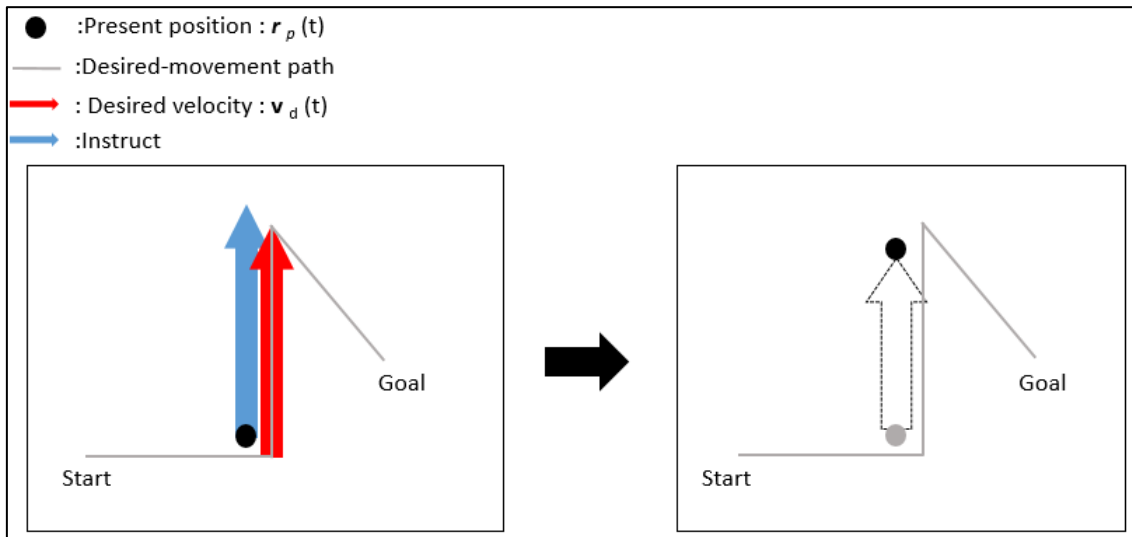
(c-1) Perceive slippage(left), and after then, move interface(right)



(d-2) Diagram



(d-1) Perceive slippage(left), and after then, move interface(right)



(d-2) Diagram

Fig. 2-9 Presentation mode of the “After perceive go”. Firstly, slippage is presented via subject’s finger-pad skin. Subject perceive movement direction, speed and length with the slippage direction, speed and duration. After perceive the slippage, subject move them hand with the perceived motion. When subject complete the motion, a next slippage will be presented by subject pushing button.

なお、両提示方法ともに、各線分の提示開始時は、方向提示のためのスイベルの回転のため1秒だけ間合いを設けた後、ホイールによる滑り刺激が与えられる。

本実験では1~3本で構成される等速直線運動を提示した。各線分の提示開始時には音声により”First”, ”Second”, および”Third”と合図が流される。また、提示方法(1): While-perceiving go method では、目標位置 (Goal) 到達時にはAWMによる滑り刺激が止まり、提示終了となる。これにより、被験者は各線分の開始位置及び提示終了位置 (またはAWM走査終了位置) をメンタルイメージとして直線で補間することで、より正確に運動の軌道が知覚可能となる。また、軌道に加え、速度の知覚・記憶を目標としているが、予備実験の結果、軌道と速度を同時に学習するのは困難であることがわかった。そこで、運動の提示は2段階に分けて行った。第1段階では軌道に注目して、第2段階では速度に注目して、運動の知覚・記憶するように被験者へ教示した。また、各段階における知覚性能を検証するため、それぞれの提示終了後に被験者はAWMを走査させ、運動の再現を行った。

2.4 実験条件

実験条件を表2-1に示す。被験者はいずれも健常な20代、右利きの男性5名(22~24歳、平均 22.6 ± 0.9 歳)である。提示方法は、2.3提示方法で記述した”While-perceiving go method”, “After-perception go method”の2水準とし、順序の効果が均等になるように、5名の被験者間で提示方法2種の順序はバランスをとって提示した。提示する運動は、1本の等速直線運動による運動 (以下、これを運動パターン1とよぶ) を2種、2本の等速直線運動の接続による運動 (以下、これを運動パターン2とよぶ) を2種、そして3本の等速直線運動の接続による運動 (以下、これを運動パターン3とよぶ) を2種、計6種の運動とした。いずれも2種からなる運動パターン1, 2, 3についても、順序の効果が均等になるように、提示順を被験者間でバランスをとった。ただし、各運動パターンの中の2種の運動については、相互の順序の効果は問わないので、被験者間、運動パターン間で同一とした。

全6種の運動における、各等速直線運動の方向や提示持続時間と長さ（間接的に速さ）はランダムに設定した。ただし方向に関しては、筆者らの先行研究において、指先皮膚感覚による方向の知覚誤差の標準偏差が15度前後であったことから、線分の接続部における角度変化が30°以上となるように設定した。長さ・速さに関しては、提示速さ・提示持続時間と知覚性能の観点から、知覚が著しく困難とならないように、線分の長さは50~150 mm、提示速さは12~50 mm/sの範囲で設定した。上記の条件を満たしたうえで、ディスプレイ内でのワークスペースの都合上、200×400 mmの範囲に収まる線画を設定した。

運動の提示は、運動パターン1:提示2回、運動パターン2:提示4回、運動パターン3:提示6回とし、各運動提示後に再現を行う。運動パターン1では1回目の提示、1回目の再現、2回目の提示、2回目の再現を1ランとした（運動パターン2では1回目の提示...4回目の再現を1ラン、運動パターン3では1回目の提示...6回目の再現を1ラン）。したがって、一人につき計12ラン（=2提示方法×3運動パターン×2ラン/(提示方法・運動パターン)）の実験を行った。

Table 2-1 Experimental conditions

Factor	Level
Subject	5
Presentation mode	While perceiving go, After perceive go
Presented line-drawings	6 line-drawings
Number of line-segments	1, 2, 3
Length	Randomly chosen between 50 - 150 mm
Speed	Randomly chosen between 12 - 50 mm/s
Direction	Randomly chosen between 0 - 359 deg.

2.5 実験方法

実験では、指先皮膚感覚に加え、AWMを走査することに関わり、被験者自身の自己受容感覚も併用して運動を知覚・記憶していくことになる。実験前の準備として、初めに、指腹部が知覚するホイールによる滑り速さと、AWMを走査させる速さ、つまり被験者自身の自己受容感覚との間の差異を低減させる作業を行った。具体的には、設定した速さの範囲から代表的な値4つ(12, 25, 37, 50 mm/s)を遅いものから順に提示し、更に設定した速さで移動する目標位置、および被験者現在位置をディスプレイ上に点として表示する。被験者は知覚する滑り速さに準じてAWMを走査し、時にはディスプレイ上に表示される目標位置および自身の現在位置の関係を目視して

運動速さの誤差を修正していく。それぞれの速さに対して最低3回の練習を行い、被験者が運動速さを十分習熟できたと判断できるまで繰り返し行った。

次に、2種類の提示方法それぞれに慣れるために、本実験と同様の手順で実験を行った。速度調整と同様、最低3回の練習を行い、被験者が運動速さを十分習熟できたと判断できるまで繰り返し行った。

以下では、実験の手順を提示方法毎に記述する。

➤ While-perceiving go method

【第一段階：軌道注意】

[手順1] 準備：被験者はAWMを走査面中央に移動させる。このとき、AWMの向きは自身の正面と一致させ、ホイール部、つまり利き手示指が走査面中央に位置するように調整する。その後、AWB上面の円形開口部を通して、右手示指の指腹部をホイール外周面上に置き閉眼する。このとき、モータの発する音によって滑りの知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着させてホワイトノイズを聴かせる。

[手順2] 運動の知覚・記憶：実験者の合図とともに1本目の運動の提示が開始される。このとき、ヘッドフォンより”First”と音声流れる。被験者は、示指の指腹部皮膚感覚を通してホイールからもたらされる刺激を受容し、提示されている滑りの方向と速さを知覚し、運動を認知しながらAWMを走査させる(図2-10, a)。なお、基本的には運動の移動方向・距離・速さの記憶が目標ではあるが、この手順2では移動方向・距離に注意して提示を受け、運動を学習するように教示した。

複数の等速直線運動を組み合わせた運動パターン2,3では、準目標位置に到達後、”Second”, ”Third”の音声と同時に、2本目、3本目の運動の提示が開始される。目標位置到達により、滑り刺激提示が止まり、実験者は提示終了の合図を送る。被験者は、脳内の心理的な3次元空間内で、被験者は各運動の提示開始位置及び提示終了位置を直線で補間することで、運動の軌道が知覚可能となる。

[手順3] 知覚・記憶した運動の再現：被験者は初期位置に戻り、実験者からの合図を待機する。なお、提示終了後の移動量を目視させないため、被験者には閉眼状態で被験者の感じる初期位置へ移動した後、開眼して[手順1]と同様に、AWMの向き・位置の微調整を行った。

実験者の合図により，メンタルイメージとして知覚・記憶した運動を，AWM を走査して再現した(図 2-10, b)．再現終了後，被験者は実験者へ合図を送る．

手順 1～3 を，運動パターンに応じた既定の回数（パターン 1：1 回，パターン 2：2 回，パターン 3：3 回）繰り返す．

その後，次は運動の速度に注意して提示を受ける．

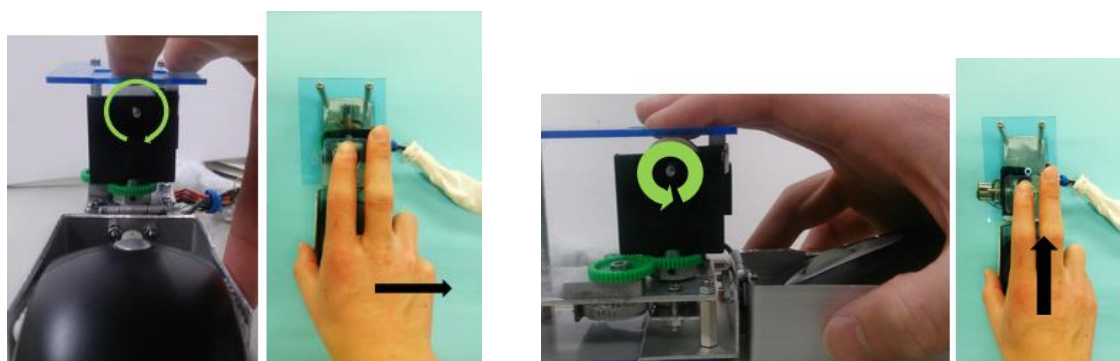
【第二段階：速度注意】

[手順 4] 準備：手順 1 と同様

[手順 5] 運動の知覚・記憶：手順 2 と同様の提示を行う．ただし，速度に注意して提示を受け，運動を学習するように教示した．

[手順 6] 知覚・記憶した運動の再現：手順 3 と同様．

手順 4～6 を，運動パターンに応じた既定の回数繰り返す．その後，次の運動の提示を受ける．



(a) Perceive slippage and move interface

(b) Move interface

Fig. 2-10 In procedure 2 and 5, subject move the interface while perceiving slippage (a). In procedure 3 and 6, subject move the interface based on the perceived motion.

➤ After-perception go method

【第一段階：軌道注意】

[手順 1] 準備：AWM を走査面の中央に移動させる．このとき，AWM の向きは被験者の正面方向に一致させ，さらにホイールの位置（被験者の利き手の示指の位置に一致している）が走査面中央に位置するように調整する．被験者は閉眼し，AWM の上面の円形開口部を通して，右手示指の指腹部をホイール

外周面上に置く。次に、モータの発する音によって滑りの知覚に影響を与えることのないように、ヘッドフォンを装着させてホワイトノイズを聴かせる。

[手順2] 運動の知覚・記憶（位置軌跡重視）：初めに提示される運動が何本の線分から構成されているか、被験者に伝える。その後、実験者の合図とともに1本目の運動の提示が開始される。このとき、ヘッドフォンより”First”と音声流れる。被験者は、示指の指腹部の皮膚感覚を通してホイールからもたらされる刺激を受容し、提示された滑りの方向・速さ・持続時間から、マウス走査の運動に対応付けられる滑りの方向・距離・速さを知覚する。すなわち、被験者は、脳内の心理的な3次元空間内で、同一地点に留まっている指腹部において、触れている対象の面（実際には、ホイール上の小領域。以下、単に「触面」とよぶ）が次々と滑り込んでくると感じるとともに、最初の触面が移動する感覚で知覚しこれを追跡するように教示した。例えば、触れているホイール外周面が前方に回転しているときには触面が滑りながら前方に動くこと知覚することになる。このように、被験者は、最初の触面の位置としての意味を持つ指先現在位置（以下、「始点」とよぶ）とともに、移動後の触面の位置（以下、「終点」とよぶ）をメンタルイメージとして記憶する。このとき、滑りは始点から終点までの運動として表現されたことになる。

実験者は、1本目の運動が提示された後、被験者はメンタルイメージとして知覚・記憶した運動を、AWMを走査して再現した（図2-11, a）。運動パターン2,3の学習では、被験者は運動再現後、その場に静止して2本目の運動の提示を受ける。3本目の運動も同様、2本目の運動の提示・再現終了後に静止した状態で提示を受ける。なお、2本目、3本目は、それぞれ被験者が手元に持っているボタンを押すことで、”Second”, ”Third”の音声と同時に提示が開始される。最後の運動を再現後、被験者は実験者へ合図を送る。

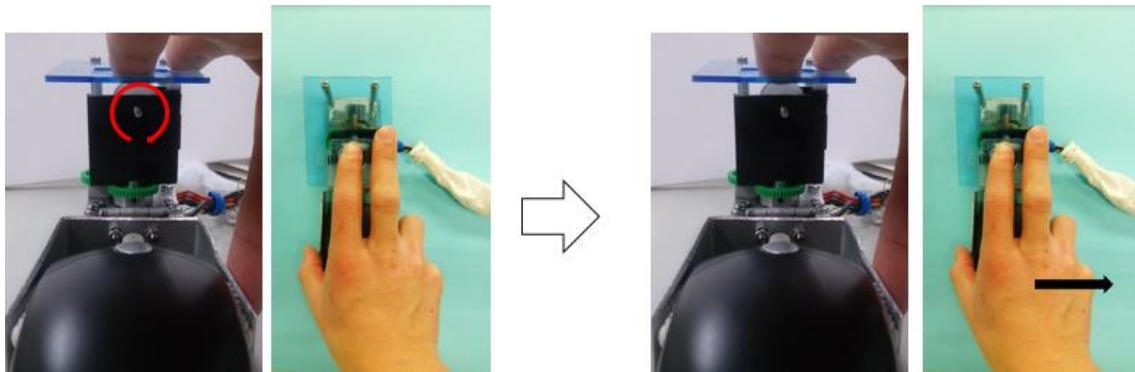
[手順3] 知覚・記憶した運動の回答：被験者は初期位置に戻り、待機する。なお、提示終了後の移動量を目視させないため、被験者には閉眼状態で大体の初期位置へ移動後、開眼して微調整を行った。実験者の合図により、メンタルイメージとして知覚・記憶した運動を、AWMを走査して再現した（図2-11, b）。再現終了後、被験者は実験者へ合図を送る。

【第二段階：速度注意】

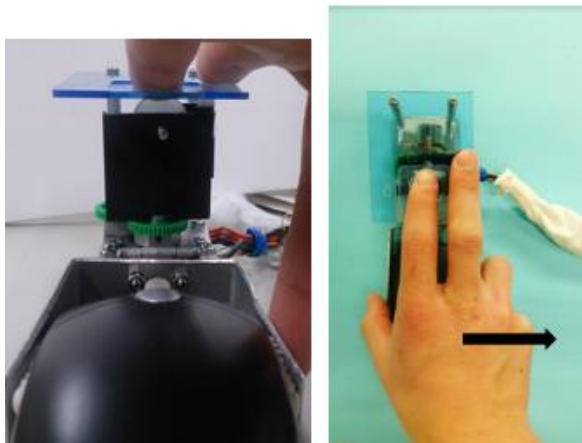
[手順4] 準備：手順1と同様

[手順 5] 運動の知覚・記憶：手順 2 と同様の提示を行う。ただし，手順 5,つまり 2 回目の提示では速度に注目して提示を受け，運動を学習するように教示した。

[手順 6] 知覚・記憶した運動の回答：手順 3 と同様。再び手順 1 へ戻り，次の運動を学習する。



(a) Perceive slippage (left) and move the interface (right)

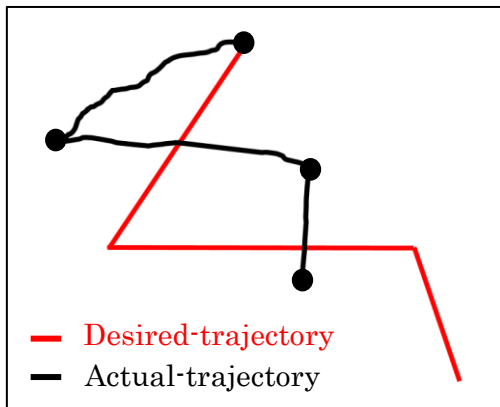


(b) Move interface

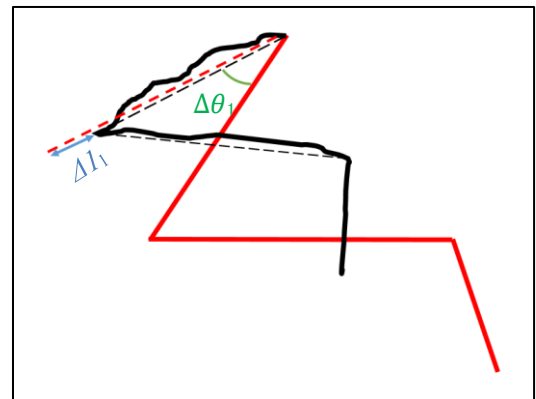
Fig. 2-11 In procedure 2 and 5, firstly, subject perceive slippage, and after then, move interface (a). In procedure 3 and 6, subject move the interface based on the perceived motion (b).

2.6 実験結果

結果の評価にあたって、各ランにおける再現時の運動を、以下のように、等速直線運動を接続した運動に変換する。具体的には、1本目,2本目,そして3本目それぞれの運動開始位置と終了位置を直線で結び、得られた線分の長さ、角度に基づいて、知覚・再現性能を評価する(図2-12)。なお、実験者が被験者の運動を確認して、運動の開始または終了のタイミングを判断し、その時刻、および位置を記録した。また、移動速さについては、各運動の開始から終了までの平均値を用いた(図2-13)。



(a) Trajectories of actual motion (black line) and desire motion (red line). Filled-orange circle is the start and the end position for each movement.



(b) A modified trajectory by connecting the start and the end position for all the segments. The length and the angle error of the first movement are shown as $(\Delta l_1, \Delta \theta_1)$

Fig. 2-12 Example of motion trajectory when reduction

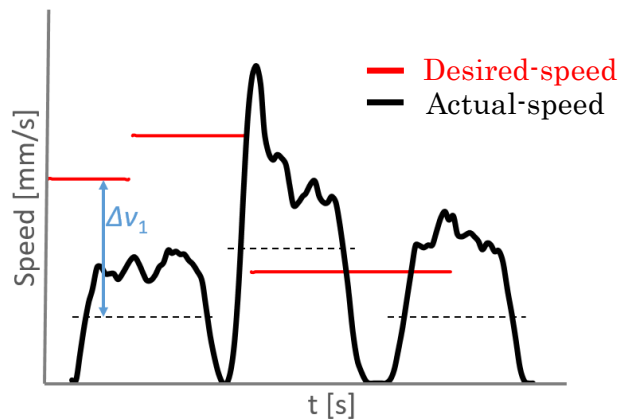


Fig. 2-13 Examples of motion speed trajectories. The black-colored solid line is the subject's actual speed, and the black-colored broken line shows the average of each of the movement speed, and the red-colored solid line shows the desire speed. The speed error of the first movement are shown as (Δv_1)

2.6.1 長さ知覚

すべての被験者、およびすべての線分についてまとめた形で、提示方法の因子における2水準、すなわち、「While-perceiving go」、「After-perception go」のそれぞれに対して、各等速直線運動における提示長 L と知覚長 l との誤差を求め、それぞれの標本平均、水準間の平均平方、並びに検定統計量を求め、提示方法の因子効果の有無を検定する。具体的には、提示方法間の知覚長誤差の系統誤差、偶然誤差を対象として統計的検定を行う。

系統誤差については両提示方法の間に有意差は認められなかった。なお、系統誤差の観点で考慮すると、一般に人の知覚特性上、提示長に対して知覚長が短くなる傾向があるが、今回、検討した両提示方法についても、同様の傾向が見られた。特に「While-perceiving go」は「After-perception go」と比較して、知覚長が短くなる割合が小さい結果となった。次に、偶然誤差の観点から考慮すると、「After-perception go」と比較して、「While-perceiving go」がより誤差のばらつきが有意に小さいことが確認された。これは、「While-perceiving go」で提示された場合には、時間がかかっても目標到達位置付近を必ず通過することが理由と考えられる。つまり、「While-perceiving go」では、各運動に際して自己受容感覚を働かせることができるので、開始・終了位置がより正確に認知可能となっている。このことから、「While-perceiving go」提示方法では、長さの知覚を正確に行える可能性が考えられる。

2.6.2 角度知覚

すべての被験者、およびすべての線分についてまとめた形で、提示方法の因子における2水準、すなわち、「While-perceiving go」, 「After-perception go」のそれぞれに対して、各等速直線運動における提示角度と知覚角度との誤差を求め、それぞれの標本平均、水準間の平均平方、並びに検定統計量を求め、提示方法の因子効果の有無を検定する。具体的には、提示方法間の知覚角度誤差の系統誤差、偶然誤差を対象として統計的検定を行う。

系統誤差については両提示方法の間に有意差は認められなかった。系統誤差については、筆者らの先行研究での知覚特性と同様にいずれも0に近い値となった。次に、偶然誤差の観点から考慮すると、「After-perception go」と比較して、「While-perceiving go」がより誤差のばらつきが有意に小さいことが確認された。これは、長さ誤差で記述したように「While-perceiving go」で提示された場合には、時間がかかっても目標到達位置付近を必ず通過することが理由と考えられる。また、偶然誤差に関して、「After-perception go」は筆者らの先行研究でのホイール条件：「Dot・Drum」と近い値となった。

2.6.3 速さ知覚

すべての被験者、およびすべての線分についてまとめた形で、提示方法の因子における2水準、すなわち、「While-perceiving go」, 「After-perception go」のそれぞれに対して、各等速直線運動における提示速さと再現時の平均移動速さとの誤差を求め、それぞれの標本平均、水準間の平均平方、並びに検定統計量を求め、提示方法の因子効果の有無を検定する。具体的には、提示方法間の速さ誤差の系統誤差、偶然誤差を対象として統計的検定を行う。

系統誤差、偶然誤差ともに両提示方法において有意差は見られなかった。なお、偶然誤差の値は大きいですが、系統誤差は0に近い値となっており、大きさの観点では、速さの提示・知覚・記憶はある程度可能であると考えられる。

2.7 考察

「While-perceiving go」, 「After-perception go」の両提示方法において, 線分の長さ・角度の偶然誤差を除き, 全体としては, 運動の知覚・記憶について有意差は見られなかった。まず, 運動の軌跡, つまり運動の方向と距離の知覚に関して, 実験前には, 「While-perceiving go」は, 「After-perception go」に比べ, その方式上, 運動の開始・終了位置がより正確に認知できると思われた。すなわち, メンタルイメージとして各開始位置と終了位置を繋ぎ合わせることで知覚性能が向上すると考えていた。しかしながら, この予想通り, 正確に知覚できた被験者が存在する一方で, 目標位置の到達判定を 10 mm 以内としていたため, 被験者によっては到達位置の周りを彷徨うような事態も生じた。その結果, 運動開始位置の忘却, 心理的負担など, 却って悪影響を及ぼすこともあったと考えられる。また, 速さに注意した知覚の段階でも, 同様の事態が生じ, 意図する知覚・記憶が不可能となった被験者も存在した。

提示における被験者の心理的状态に関しても考慮する必要が見られた。「While-perceiving go」では, 上記に挙げている到達位置付近を彷徨う可能性があるのに加え, 常に指腹部へ滑り刺激が与えられている状態である。実験後の被験者からの反応として, この2つの要因のため5人中4人が「While-perceiving go」がより心理的負担が大きいと回答した。一方で, 到達位置を正確に知覚できるため, 運動軌跡の認知は「While-perceiving go」が容易であると全ての被験者が回答した。

上記の特定の違いを考慮すると, 被験者の学習度合いに応じて, 提示方法を変更する疑似運筆運動提示戦略も考えられる。具体的には, 初めに「While-perceiving go」により, (速さや提示時間には注意の資源は投入せず) 専ら運動の軌跡(空間的なパターン)に注意を集中し, それを知覚・記憶し, その後「After-perception go」により, 速さの知覚・学習を行う方法が考えられる。

第3章 結言

本論文では、筆者らの先行研究で開発したアクティブホイール式指触覚インタフェース；アクティブホイールマウスを用いて疑似的な運筆運動の提示を行った。提示方法は人の刺激に対する知覚・応答特性を考慮して、以下の2種類を用意した。

- (1) **While-perceiving go method:** 被験者の手先現在位置のみフィードバックを行う。この場合には、刺激の知覚から応答までの時間差に左右されず、被験者自身のペースで知覚できるという利点がある。その一方で、提示時間のような時系列的な情報を得ることはできない。
- (2) **After-perception go method:** 被験者の現在値によらない。この場合には、時系列的な情報を得ることができる。その一方で、刺激の知覚に要する時間差などのため、知覚が追いつかない傾向がある。

上記の提示方法2種における運動の知覚・記憶性能において、運動軌跡（長さ、方向）の偶然誤差を除いて有意差は見られなかった。しかし、およその運動としては知覚・記憶はできたと考えられる。さらに、それぞれの提示方法の特徴が確認できた。今後は、学習段階に応じて提示方法を変え、早く正確に運動を知覚・記憶できる方法を考える。さらには、接続する線分の数を増やし、運筆運動の提示実験を進める予定である。

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比較」の支援による。

参考文献

- [1] Tsuda, N., Kato, N., and Nomura, Y. , “Instruction of arm motion for calligraphy using vibrotactile stimulations. ”, In Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference, pp. 677-682.
- [2] Causo, A., Yeo, S. H., and Chen, I. M., “Vibrotactile motors on stationary arm as directional feedback to correct arm posture. “, In Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2012 IEEE/ASME International Conference, pp. 202-207
- [3] Norman, S. L., Doxon, A. J., Gleeson, B. T., & Provancher, W. R. , “Planar hand motion guidance using fingertip skin-stretch feedback.”, IEEE transactions on haptics, Vol.7, No.2, pp.121-130.
- [4] Ion, A., Wang, E. J., & Baudisch, P. , “Skin drag displays: Dragging a physical factor across the user's skin produces a stronger tactile stimulus than vibrotactile.”, In Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 2501-2504
- [5] Spiers, Adam, and Aaron Dollar., Design and evaluation of shape-changing haptic interfaces for pedestrian navigation assistance.”, IEEE transactions on haptics (2016).
- [6] Koslover, R. L., Gleeson, B. T., De Bever, J. T., & 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, pp.33-38.
- [7] 檜野芳明, 野村由司彦, ホイール回転による指腹部滑りの知覚特性, 日本機械学会 2016年度年次大会
- [8] Yusoh, S.M.N.S., Nomura, Y., Sakamoto, R. and Iwabu, K., A Study on the Duration and Speed Sensibility via Finger-Pad Cutaneous Sensations, Procedia Engineering, Vol.41, (2012), pp.1268-1276.
- [9] Nomura, Y. and Iwabu, K., Length Perceptual Characteristics on Raised-Dot Slippages, Human-Computer Interfaces and Interactivity: Emergent Research and Applications: Emergent Research and Applications, IGI Global (2014), pp. 286-308.
- [10] 岩部和樹, 野村由司彦, Syed Muammar Najib Syed Yusoh, 坂本良太, 指先皮膚感覚による凸点滑り長さの知覚特性, 日本機械学会 2012年度年次大会

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プロセス解析研究室のメンバーにお礼申し上げます。

本研究においてアクティブホイールマウスの作成に用いたステッピングモータを御提供頂きました，ミツミ電機株式会社様にも深く御礼を申し上げます。

最後に，本論分の作成に当たり，多大な御協力を頂きました 野村由司彦教授に重ねて御礼申し上げます。