

修士論文

運動主体感と筋活性度に基づく  
動作学習特性の分類と比較

指導教員 野村由司彦 教授

平成 29 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

416M101 赤塚 史洋

# 目次

第1章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	従来研究	2
1.3	本研究の方針	2
第2章	手の1線分動作の学習再現実験	5
2.1	実験概要	5
2.2	実験装置	5
2.2.1	ハプティックデバイスの作用力による目標運動提示	7
2.3	目標運動の学習方法	9
2.3.1	Vision	9
2.3.2	Flexible actuator-induced haptic	10
2.3.3	Rigid actuator-induced haptic	11
2.4	実験条件	12
2.5	実験方法	13
2.5.1	実験手順	13
2.5.2	学習試行および再現試行の手順	14
2.5.1	評価方法	15
2.6	実験結果	17
2.6.1	短期記憶の再現誤差	17
2.6.1	長期記憶の再現誤差	19
第3章	考察	21
3.1	提示方法による違い	22
3.2	誤差のフィードバック方式による違い	22
第4章	結言	24
	謝辞	25
	参考文献	26

# 第1章 緒言

## 1.1 研究背景

人は、運筆やスポーツ技能といった身体技能を行う。身体技能を学ぶ際には、映像や本といった視覚的な手本を参考にすることや、指導者による指導が学習手段として考えられる。視覚的な手本をもとに学習する場合、手本を見ながら実際に手を動かし真似をしながら見比べる手法があげられる。しかし、自身のおこなう運動の間違いに気づきづらいことや、指導者の手取り足取りによる学習と比べれば目標とする身体運動を実感として得ることは難しい。指導者による指導を受ける機会があれば、実際におこなった運動の間違いの指摘や、手取り足取りを順々に受けることができる。

近年では、指導者の代わりとなるようなツールとしてハプティックデバイスを用いることが研究されている。ハプティックデバイスは、指導者による手取り足取りのように使用者に身体運動を強制することで運動感覚を与えたり、反発力の付与による力感覚を使用者に与える装置である。これら運動感覚や力感覚は総称して自己受容感覚と呼ばれる。

本研究では人が運動を学習する際の、目標運動の提示方法（ディスプレイ/ハプティックデバイス）による分類、筋活性の有/無による分類、学習時に行う運動の主体（デバイス/人）による分類に着眼する。実験では、短期記憶および長期記憶の観点から、分類ごとの学習効果特性の検証を試みる。

## 1.2 従来研究

多くのハプティックデバイスを用いた動作教示手法では、学習者の身体運動を強制するのに十分なパワーを持つデバイスが、学習者の身体運動を目標運動で強制する手法がとられる(Wong et al., 2012)(Lönn et al., 2001). 強制運動提示による学習において、学習者はデバイスにより強制されることで生じる自身の「受動運動」の位置・速度を知覚し、目標動作の認識することができる。

近年では身体技能の向上について、学習者自身が実際におこなった運動の誤差を修正したり、これからおこなう運動の誤差を予測することが重要との報告がある(Shadmehr et al., 2010)(Takiyama et al., 2015). このことを踏まえると、前述の強制運動の提示により学習を行う場合、目標運動の認知は可能かもしれないが、自身では運動を行わないことから自身が行う再現運動の誤差を修正・予測することが困難であると考えられる。そのことから、再現運動の誤差低減や運動の身体的な定着にはつながらないことが懸念される。したがって、学習者が筋力を発揮させて「能動運動」を行うことが重要であると考えられる。

これまでの運動学習に関する研究においても「能動運動」，「受動運動」という着眼点はあるものの、能動学習は視覚的な目標運動提示に被験者が手を追従させる手法、受動学習はハプティックデバイスによる目標運動の強制に伴う手の運動として位置づけられていることが多い。すなわち、ハプティックデバイスを用いる際に学習者が「筋力を発揮させる/させない」ということにはあまり考慮されていない。

## 1.3 本研究の方針

本研究では、ハプティックデバイスを用いて行う運動学習において、学習時の学習者の「筋活性の有り/無しによる分類」に着眼した。

本実験においてハプティックデバイスは時々刻々の目標位置と学習者の手先位置の間の誤差に応じた力フィードバックを学習者に与える。学習者の筋活性の有り/無しによらずハプティックデバイスからの力は、学習者の運動、すなわち位置や速度に変化をもたらすことが考えられる。このことから、学習者は目標運動をそれらの変化から認識することができる。加えて、学習者の筋活性有りの場合では、人は、筋を活動させることで外界から与えられる力を知覚することができるため、ハプティックデバイスからの与えられる力の知覚を介して、学習者は自身が能動的に行った運動に生じた誤差を認知し、運動の修正が可能と期待される。したがって、ハプティックデバ



















イスによる目標運動の手がかりである力が与えられないような状況下でも、目標運動を行うことができる、すなわち動作の定着が期待される。

ここでさらに、筋活性有りの場合における学習者の誤差修正方式として「学習時に行う運動の主体性による分類」に着眼した。すなわち、「ハプティックデバイスから与えられる誤差のフィードバックを主体とし、学習者は学習時に時々刻々誤差を修正」する場合（本論文では **On-line Feedback** と呼ぶ、以下 **On-line FB** と表記する）と「学習者自身が行う動作を主体とし、学習時にデバイスから与えられる誤差のフィードバックをふまえて動作終了後に誤差を修正」する場合（本論文では **Off-line Feedback** と呼ぶ、以下 **Off-line FB** と表記する）とで区分した。これらの差異としては、**Off-line FB** 条件下では、学習の繰り返しによってハプティックデバイスから力が与えられない程度に動作を学習させられれば学習時には自律的に運動を行うこととなるため、筋活性有り/無しの差異と同様に、ハプティックデバイスから力が与えられないような状況下でも、目標運動を行うことができる、すなわち動作の定着が期待される。

また、ディスプレイ映像を用いた視覚的な目標運動提示による学習は、ハプティックデバイスを用いた運動学習に関する研究で対比的に用いられることが多い。そのことから本論文では、ハプティックデバイスを用いた提示手法とディスプレイを用いた提示手法というように、「目標運動の提示手法による分類」も対象とした。

それらの分類を以下の表で整理し、それぞれの説明を記す。ただし、本実験においてハプティックデバイスを用いて学習を行う場合、ハプティックデバイスから与えられる、位置の誤差に応じた力の大小はバネ剛性に由来し、学習時におこなわれる運動の主体性に影響を与える可能性がある。これは、学習者が学習時に運動を行う際、与えられる力に伴う受動的な運動の大小や、力そのものの知覚の大小が、バネ剛性の大小により変化するためである。例えばバネ剛性が低い場合には、学習者が行う運動に誤差が生じたとしてもデバイスから与えられる力は弱く、学習者はある程度思い描いた運動を行うことができるが、目標運動の手がかりである力は知覚しづらい。バネ剛性が大きい場合には、学習者が行う運動にわずかでも誤差が生じると力の知覚が生じ目標運動を認識しやすいが、学習者の運動を目標運動に向かって押し戻す力も大きくなる。結果としてそれは学習者の運動を目標運動に近い運動で強制することとなり、学習者の意図した運動を反映させられない。したがって自律的な運動を行うことが困難となる可能性がある。そこで、本実験においても低バネ剛性および高バネ剛性のそれぞれの条件を設け、表に示される分類に基づく運動学習効果の特性検証実験を行う。なお、検証実験では、短期記憶に基づく学習効果および長期記憶に基づく学習効果の双方を行う。

Table 1-1. Motor learning classification based on presentation method, muscle activity and error feedback mode

	Guidance mode	Sensation			Muscle activity (Active/Passive)	Error Feedback		
		Hgaptic	Vision	Clue for target motion		Major division	Minor division	Discription
  	Vision No Feedback	○	○	Visual cursor	Active 	No feedback		目標位置だけを見て（自分の手は見ずに、）手を動かす。
	Vision On-line Feedback				Active 	With feedback	On-line Feedback 各試行の中で動きながら誤差を修正する。	目標位置だけでなく、自分の手も見える。
	Vision Off-line Feedback				Active 		Off-line Feedback 各試行における一連の動作を終えてから、次の試行で誤差を修正する。	目標位置だけでなく、自分の手も見える。
  	Flexibly-haptic No Feedback	○	×	Flexible actuator-induced haptic	Passive 	No feedback		筋活動なしで（自分では運動を行わず）、デバイスにより運動を生じさせられる。
	Flexibly-haptic On-line Feedback				Active 	With feedback	On-line Feedback 各試行の中で動きながら誤差を修正する。	圧覚、力覚、運動覚を通してフィードバックされた運動誤差を知覚し、改善を繰り返す。
	Flexibly-haptic Off-line Feedback				Active 		Off-line Feedback 各試行における一連の動作を終えてから、次の試行で誤差を修正する。	圧覚、力覚、運動覚を通してフィードバックされた運動誤差を知覚し、改善を繰り返す。
  	Rigidly-haptic No Feedback	○	×	Rigid actuator-enforced haptic	Passive 	No feedback		筋活動なしで（自分では運動を行わず）、デバイスにより運動を生じさせられる。
	Rigidly-haptic On-line Feedback				Active 	With feedback	On-line Feedback 各試行の中で動きながら誤差を修正する。	圧覚、力覚、運動覚を通してフィードバックされた運動誤差を知覚し、改善を繰り返す。
	Rigidly-haptic Off-line Feedback				Active 		Off-line Feedback 各試行における一連の動作を終えてから、次の試行で誤差を修正する。	圧覚、力覚、運動覚を通してフィードバックされた運動誤差を知覚し、改善を繰り返す。

## 第2章 手の1線分動作の学習再現実験

### 2.1 実験概要

本実験では、被験者は、肩の高さの水平面上で手が1線分を描く動作の学習および再現を行う。学習と再現は交互に繰り返され、その後マスク刺激を受けてから再度再現を行う。前者の学習と交互に行う再現は短期記憶に基づく再現、後者のマスク刺激提示後の再現は長期記憶に基づく再現として位置づけられる。

学習する運動の提示には以下の3手法が採用された。

- (1) Vision: ディスプレイに表示されるターゲットカーソルによる視覚を介した目標運動提示を受けながら学習者も手の運動を行う。
- (2-1) Flexible actuator-induced haptic: 低バネ剛性で設定された、肘・肩関節用 2-DOF 外骨格型ハプティックデバイスから時々刻々の目標位置に向かう作用力による付与される。作用力に伴う位置や速度の変化、作用力そのものの知覚を介して目標運動を認識しながら学習者も手の運動を行う。
- (2-2) Rigid actuator-induced haptic: 高バネ剛性で設定された、肘・肩関節用 2-DOF 外骨格型ハプティックデバイスから時々刻々の目標位置に向かう作用力による付与される。作用力に伴う位置や速度の変化、作用力そのものの知覚を介して目標運動を認識しながら学習者も手の運動を行う。

上記の運動提示手法のいずれにおいても、学習者が学習時に行う運動誤差の比較・修正方法について以下の3手法が採用された。

- (1) No Feedback: 学習者が能動的に行う運動を、目標運動と比較・修正しない。
- (2) On-line Feedback: 学習者が能動的に行う運動を、時々刻々目標運動と比較・修正する。
- (3) Off-line Feedback: 学習者が能動的に行う運動を、時々刻々目標運動と比較する。比較して認識した誤差を、次の学習時に能動的に行う運動へ反映させ修正する。

### 2.2 実験装置

学習者が行う運動の計測およびハプティックデバイスを用いた目標運動提示のために、肩関節の水平屈伸運動および肘関節の屈伸運動を制御するサーボモータが取り付けられた二自由度の SCARA 型ハプティックデバイスが用いられた。学習者に装着されたハプティックデバイスを Fig. 2-1 に示す。肩関節部および肘関節部に取り付け



られたモータはそれぞれ DCX35L, EC-4pole 30（ともに Maxon Motor 社製）を用いた。肩関節部モータの出力軸にはギア比 100 : 15, 肘関節部モータにはギア比 4.3 : 1 の減速機が取り付けられている。肩関節および肘関節の角度はエンコーダ（肩関節 : HEDL 5540, 肘関節 : ENC 30 HEDL, ともに Maxon Motor 社製）を用いて計測された。なお, 本実験に用いられたギアを取り付けられた状態のモータはバックドライバビリティを備えており, 被験者は装置による抵抗感を受けることなく動作できる。また本装置は, 学習者が脱力をしてしても, 学習者の腕の重力を支えられる強度を持つ。

視覚を介して目標運動を提示するディスプレイは横幅 50.83cm, 縦幅 28.63cm の画面表示サイズのものを用いた。ディスプレイの中心位置は, 学習者から見て肩関節から 45cm 前方に位置されている。視覚を介した目標運動提示において, On-line Feedback および Off-line Feedback 条件では, 学習者が自身の運動を目標運動カーソルと視覚的に比較する必要がある。そのために, Fig. 2-2 に示されるように手の位置に対応してディスプレイを指示する棒がハプティックデバイスに取り付けられている。

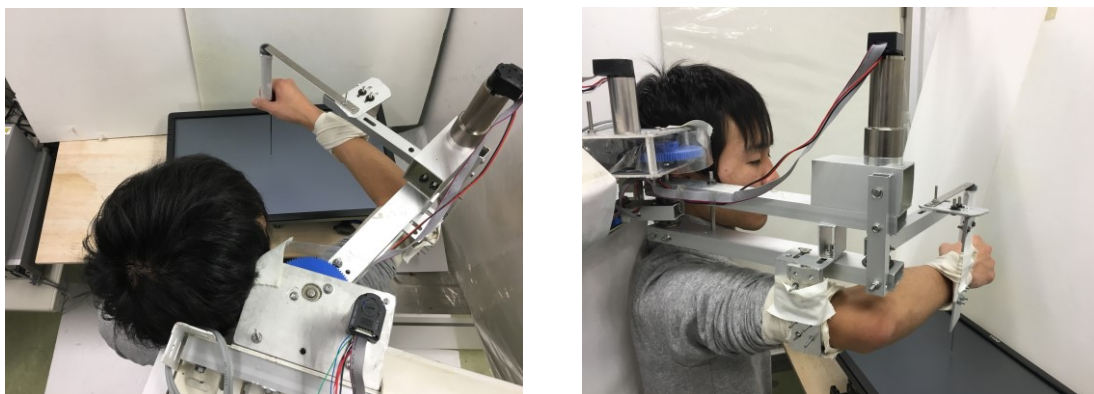


Fig. 2-1. Experimental device in use



Fig. 2-2. Experimental device without / with pointer



### 2.2.1 ハプティックデバイスの作用力による目標運動提示

ハプティックデバイスを用いて学習する場合、学習者に与える力は、動作における現在の「目標位置」に対する「学習者の再現位置」の誤差に応じた力、すなわち双方の間の誤差と、それらをつなぐ仮想的なバネ剛性によって定められ、以下の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{human}(t) - X_{target}(t) \\ Y_{human}(t) - Y_{target}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中の $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ は x 軸, y 軸方向の動作開始から  $t$  秒後の装置の作用力,  $K$ はバネ剛性,  $X_{human}(t)$ ,  $Y_{human}(t)$ は x 軸, y 軸方向の,  $t$  秒後の学習者の位置,  $X_{target}(t)$ ,  $Y_{target}(t)$ は x 軸, y 軸方向の,  $t$  秒後の目標運動の位置を意味する。

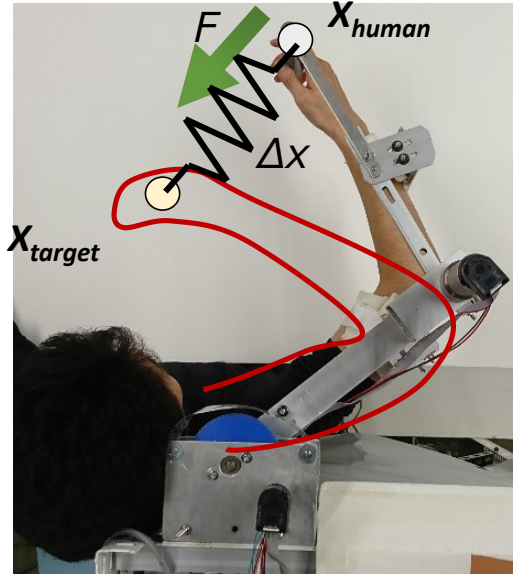


Fig. 2-3. Device force

本研究のデバイスは二自由度の SCARA 型デバイスであるため、各関節に取り付けられたモータの回転トルクが動力源となる。したがって前述の式は以下の式で与えられる。

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_{h_1} - l_2 \sin(\theta_{h_1} - \theta_{h_2}) & -l_2 \sin(\theta_{h_1} - \theta_{h_2}) \\ l_1 \cos \theta_{h_1} + l_2 \cos(\theta_{h_1} - \theta_{h_2}) & l_2 \cos(\theta_{h_1} - \theta_{h_2}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} = J^{-T} \begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1(t) \\ \tau_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K' & 0 \\ 0 & K' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{h_1}(t) - \theta_{target_1}(t) \\ \theta_{h_2}(t) - \theta_{target_2}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

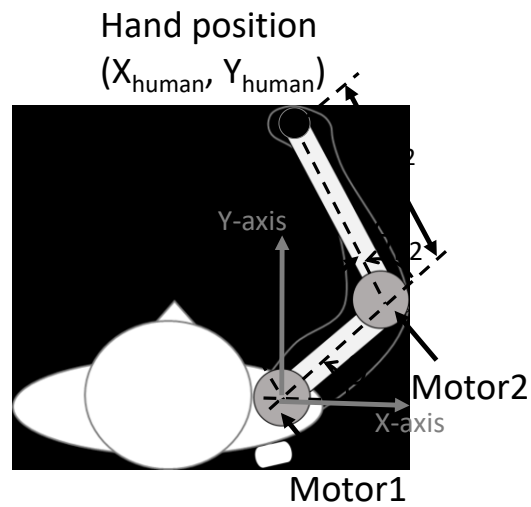


Fig. 2-4. The parameters of human arm in the equation.

式の $J$ はヤコビ行列,  $\tau_1(t)$ ,  $\tau_2(t)$ はそれぞれ肩関節, 肘関節のモータトルク,  $\theta_{h1}$ ,  $\theta_{h2}$ はそれぞれ学習者の肩関節, 肘関節角度を意味する.  $l_1$ ,  $l_2$ はそれぞれ上腕, 前腕の長さである.

本実験のハプティックデバイスを用いた学習方法において, バネ剛性の条件は関節のモータトルク式中の $K'$ に対応する.

## 2.3 目標運動の学習方法

### 2.3.1 Vision

ディスプレイに表示されるターゲットカーソル運動による視覚を介した提示を受けて学習するについて、誤差のフィードバック方式ごとに説明する。なお、すべての方式において目標運動がディスプレイにターゲットカーソルとして示される。再現時には目を閉じて手の運動を行う。

#### (1) No Feedback

学習者に装着されたハプティックデバイスから学習者の手の位置を示す支持棒が取り除かれた状態で学習を行う。学習者は、ディスプレイに示されるターゲットカーソルの運動を追従するように自身の手を動かす。この時、支持棒が取り除かれていることにより、視覚的に自身の手の位置をターゲットカーソルと比較および修正することができない。

短期記憶に基づく再現を行う際には、直前の学習試行で認識した運動を行う。

#### (2) On-line Feedback

学習者に装着されたハプティックデバイスに学習者の手の位置を示す支持棒が取り付けられた状態で学習を行う。学習者は、ディスプレイに示されるターゲットカーソルの運動を追従するように自身の手を動かす。この時、支持棒があることにより、学習者は視覚的に自身の手の位置をターゲットカーソルと比較および修正することができる。学習時、それらを「時々刻々比較し、誤差が生じるたびに修正する」ことで、できる限り目標運動と同じ運動を行うことを意識する。

短期記憶に基づく再現を行う際には、直前の学習試行で認識した運動を行う。

#### (3) Off-line Feedback

学習者に装着されたハプティックデバイスに学習者の手の位置を示す支持棒が取り付けられた状態で学習を行う。学習者は、ディスプレイに示されるターゲットカーソルの運動に関係なく、自身がこれまでに認識した運動を行うように自身の手を動かす。ただし、初学習時には運動を全く認識しておらず認識した運動を行えないため、学習 1 回目に限り **On-line Feedback** と同様にターゲットカーソルを追従するように自身の手を動かす。学習時、支持棒があることにより、学習者は

視覚的に自身の手の位置をターゲットカーソルと比較することができる。また、「誤差が生じたとしても修正せず、単に認識する」。

短期記憶に基づく再現を行う際には、「直前の学習試行で認識した誤差を修正」した上で運動を行う。

### 2.3.2 Flexible actuator-induced haptic

低バネ剛性 ( $0.150 \text{ Nm / deg}$ ) で設定された、肘・肩関節用回転 2-DOF 外骨格型ハプティックデバイスから付与される時々刻々の目標位置に向かう作用力による自己受容感覚を介した提示を受けて学習を行う。下記に誤差のフィードバック方式ごとに説明する。なお、すべての方式において、学習者は学習時、再現時ともに目を閉じて手の運動を行う。なお、本論文では以下、Flexibly haptic と呼ぶ。

#### (1) No Feedback

学習者は腕の筋を脱力させた状態で、ハプティックデバイスから与えられる力により生じる受動的な運動により学習を行う。したがって学習者自身が筋を活性させて行う再現運動を目標運動と比較・修正することができない。受動的に生じる運動を目標運動とし学習する。低バネ剛性で設定されることから実際には目標運動で学習者の腕を強制することができないことが想定される。

短期記憶に基づく再現を行う際には、直前の学習試行で認識した運動を行う。

#### (2) On-line Feedback

学習者は腕の筋を活性させて運動を行う。ハプティックデバイスから与えられる力そのものや、与えられる力により生じる受動的な運動を時々刻々知覚し、「知覚するたびに誤差を認識・修正する」。時々刻々誤差を修正することで、できる限り目標運動と同じ運動を行うことを意識する。

短期記憶に基づく再現を行う際には、直前の学習試行で認識した運動を行う。

#### (3) Off-line Feedback

学習者は腕の筋を活性させて運動を行う。ハプティックデバイスから与えられる力そのものや、与えられる力により生じる受動的な運動を時々刻々知覚し、知覚するたびに誤差を認識する。この時、「誤差の修正はせず、自身がこれまでに認識している運動を行う」ように自身の手を動かす。ただし、初学習時には運動を全く認識しておらず認識した運動を行えないため、学習 1 回目に関し On-line

Feedback と同様に、時々刻々誤差を修正することでできる限り目標運動と同じ運動を行うことを意識する。

短期記憶に基づく再現を行う際には、「直前の学習試行で認識した誤差を修正」した上で運動を行う。

### 2.3.3 Rigid actuator-induced haptic

高バネ剛性 ( $0.450 \text{ Nm / deg}$ ) で設定された、肘・肩関節用回転 2-DOF 外骨格型ハプティックデバイスから付与される時々刻々の目標位置に向かう作用力による自己受容感覚を介した提示を受けて学習を行う。なお、すべての方式において、学習者は学習時、再現時ともに目を閉じて手の運動を行う。誤差のフィードバック方式ごとの説明は上記の Flexible actuator-induced haptic による教示方法と基本的には同じである。異なる点として、(1) No Feedback において、高バネ剛性で設定されることから目標運動で学習者の腕を強制することとなる。なお、本論文では以下、Rigidly haptic と呼ぶ。

## 2.4 実験条件

健常な 20 代，右利きの男性 9 名（22~25 歳，平均  $23.4 \pm 1.0$  歳）が実験に参加した．実験条件を表 2-1 に示す．提示方法（Presentation method）は，2.3 目標運動の学習方法 で記述した” Vision”，” Flexibly haptic”，” Rigidly haptic” の 3 水準である．誤差のフィードバック方式（Error feedback mode）についても同様に記述した” No Feedback”，” On-line Feedback”，” Off-line Feedback” の 3 水準である．したがって被験者 1 人につき，提示方法 3 水準×誤差のフィードバック方式 3 水準，計 9 条件のそれぞれについて 1 線分ずつ異なる動作を学習した．学習する動作は，肩の高さの水平面上で手が描く 1 線分動作である．1 線分動作の速度は，人が生成する運動軌道に近い関数としてしられている躍度最小軌道を用いた．これは，1 線分において長さおよび最高速度が設定されると定義される速度軌道である．動作を学習するに際して 1 線分は長さ因子，角度因子，最高速度因子で構成される．長さ因子は，ランダムに設定される手の初期位置からの長さである．角度因子は肩関節水平屈曲角度に対応する角度である．長さ，角度，最高速度因子をそれぞれ 9 水準の条件を設けた．提示方法および誤差のフィードバック方式の組み合わせ 9 条件に対する長さ因子，角度因子，最高速度因子の水準の組み合わせは 27 ランの直交表に基づいて決定した．

Table 2-1 Experimental conditions

Factor	Level
Subject	9
Presentation method	Vision, Flexibly haptic ( $K'$ : 0.150 Nm / deg), Rigidly haptic ( $K'$ : 0.450 Nm / deg)
Error feedback mode	No Feedback, On-line Feedback, Off-line Feedback
Length	10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 cm
Angle	0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 deg
Max. velocity	10, 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38, 42 cm/s

## 2.5 実験方法

### 2.5.1 実験手順

被験者は実験前にまず、学習方法および誤差のフィードバック方式について説明をうけた。その後、長さ因子、角度因子、最高速度因子が以下のフェーズで行う実験とは異なる条件のもと同様の手順で練習を行った。その後、学習-短期記憶再現フェーズおよび長期記憶再現フェーズで構成される実験を行った。Fig. 2-5、実験全体の流れを図示する。学習-短期記憶再現フェーズでは、設定された条件下で学習試行と再現試行が交互に 10 回ずつ行われる。長期記憶再現フェーズでは、学習-短期記憶再現フェーズの終了後、異なる条件下で行う学習-短期記憶再現フェーズをマスク刺激として受けた後、再現試行を 5 回繰り返す。手順をすべての条件で統一するために、実験において 1 つ目の条件下で学習した後に行う長期記憶再現フェーズのために、練習時に学習した動作を再現するようにした。3 つ目の条件下のマスク刺激として用いられる学習-短期記憶再現フェーズも同様に実験とは異なる条件のもと同様の手順で行った。



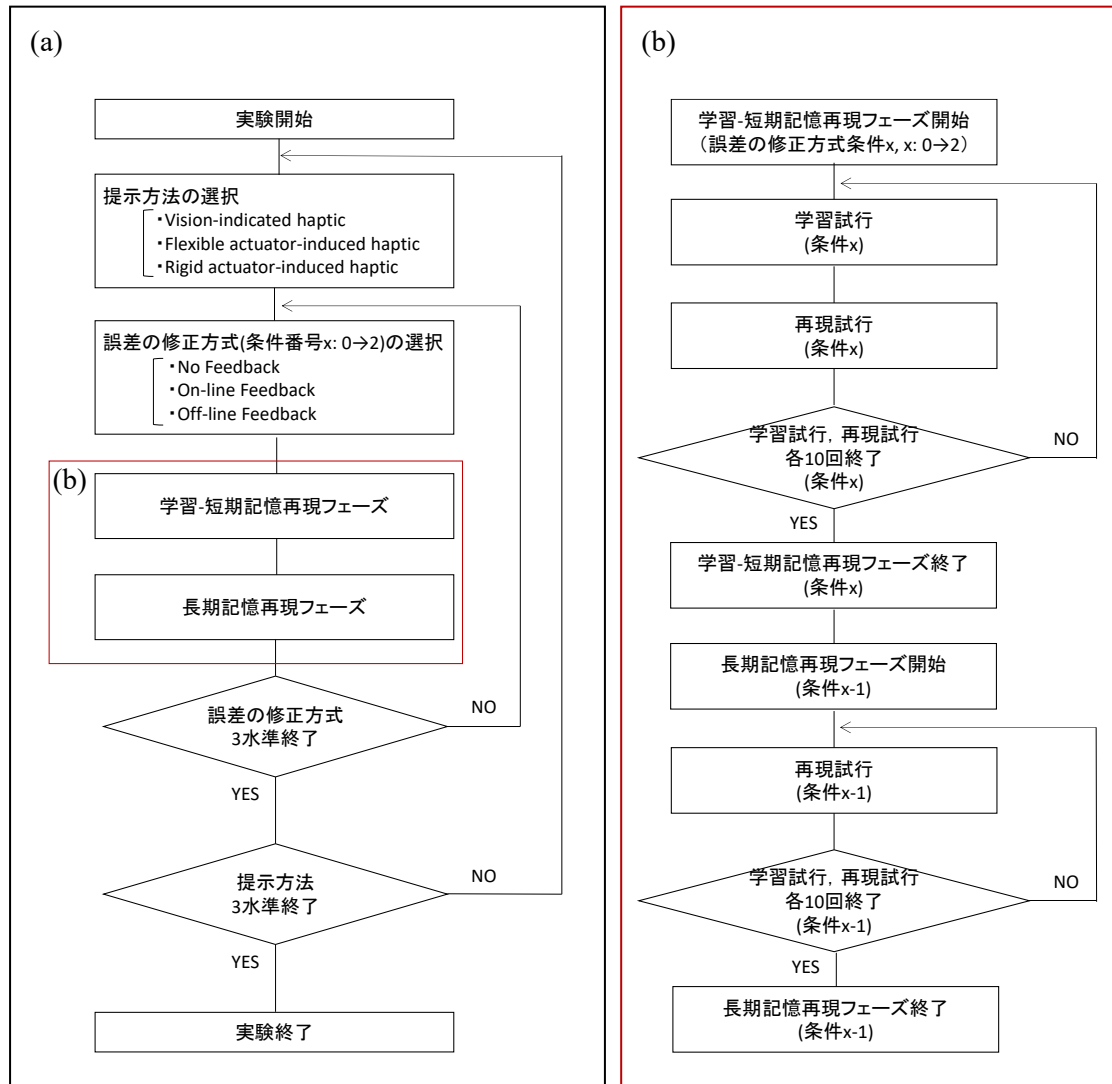


Fig. 2-5. (a) Experimental procedure, (b) The procedure for learning / short-term recall phase and long-term recall phase.

### 2.5.2 学習試行および再現試行の手順

学習-短期記憶再現フェーズにおける学習試行は以下の手順で行われた。

[Step 1] 被験者自身が手を毎試行ランダムに移動させ動作開始位置を設定した。

[Step 2] Vision による提示方法で視覚的に示されるターゲットカーソルもしくは Flexibly / Rigidly haptic による提示方法の仮想的な目標運動が、被験者のマウスクリック操作とともに開始した。マウスクリック操作と同時に学習者は各提示手法および誤差のフィードバック方式の条件に従う運動を開始した。

[Step 3] 目標運動の提示中は、各条件に従って学習者は目標運動を学習する。

[Step 4] 目標運動提示の終了時，Vision による提示方法では視覚的に示されるターゲットカーソルが消失する．Flexibly / Rigidly haptic による提示方法では，装置から被験者へのトルク付与が終了した．これに伴い学習者も運動を終了した．

再現試行は以下の手順で行われた．

[Step 1] 被験者自身が手を毎試行ランダムに移動させ動作開始位置を設定した．

[Step 2] 実験者の合図の後，学習者は学習試行で認識した動作を再現した．学習者は自身が行う運動が終了したらその旨を実験者に知らせた．被験者の運動の間，装置のトルク発揮はなしで行われた．

### 2.5.1 評価方法

Fig. 2-6 に実験で実際に行われた再現動作の例を示す．学習-短期記憶再現フェーズ，長期記憶再現フェーズ共に，再現試行で行われた学習者の手先が描く線分の長さ，角度，最大速度の誤差を学習効果の評価に用いた．動作中に実現された手先の位置は，エンコーダから出力される各関節角度を Savitzky-Golay filter による平滑化した上で，手の位置の時系列データとして算出された．被験者の動作開始は手先の動作速度が 1cm/s を超えた時点，終了は 1cm/s を下回った時点とした．長さの誤差は，線分の始点と終点を結ぶ直線の長さを被験者が再現した長さとして，実験条件で定められる提示長さの差が用いられた．角度の誤差は，各線分の始点と終点を結ぶ直線と，実験条件で定められる提示角度との差が用いられた．最大速度の誤差は，被験者が行った動作の最大速度と，実験条件で定められる提示最大速度の差が用いられた．

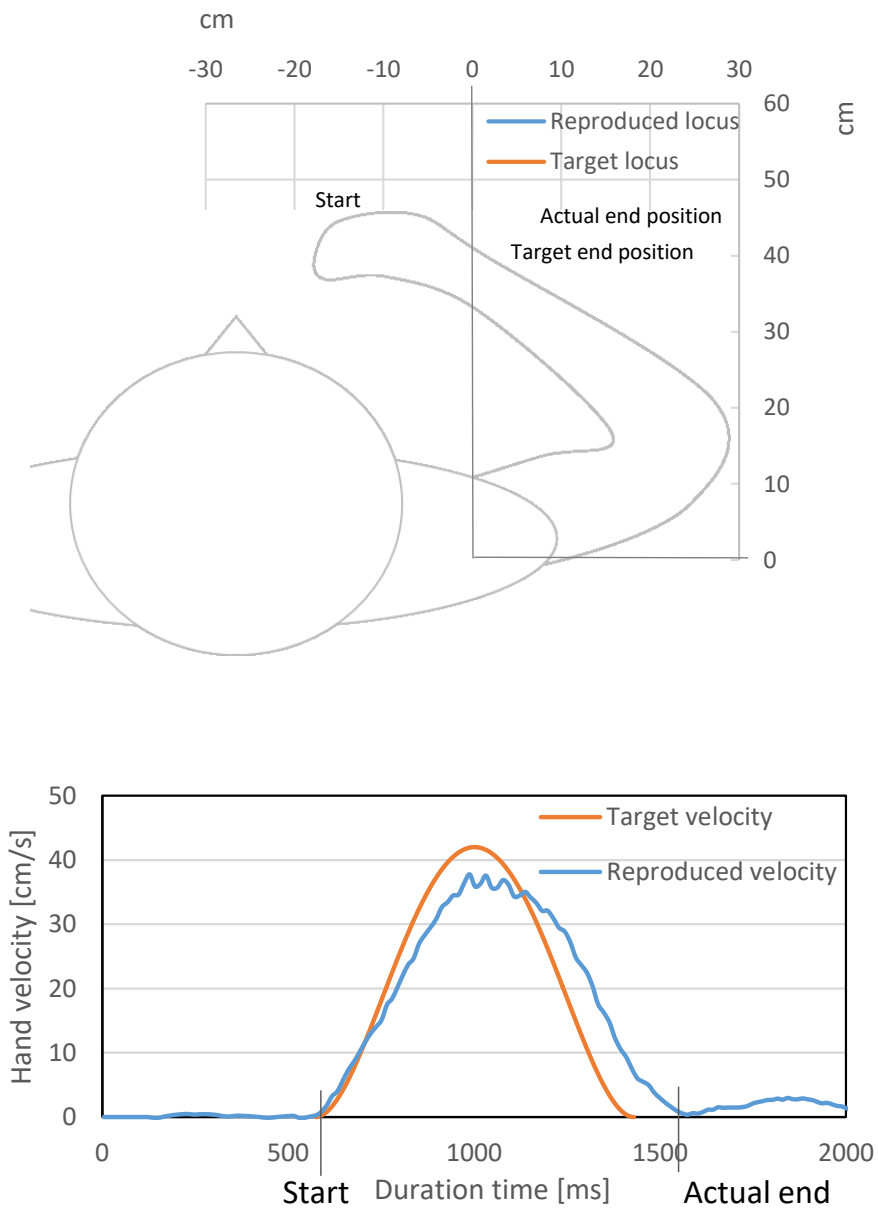


Fig. 2-6. Sample data of reproduced locus and velocity, target length:  
18 cm, target angle: 0 deg, target max. velocity: 42cm/s

## 2.6 実験結果

短期記憶に基づく再現と長期記憶に基づく再現のそれぞれの、長さ、角度、最大速度の学習効果の評価を行う。短期記憶に基づく再現の評価には、学習-短期記憶再現フェーズにおける 10 試行の再現をまとめた形で評価する。長期記憶に基づく再現は、長期記憶再現フェーズにおける 5 試行の再現をまとめた形で評価する。いずれも真値との比較を行った。以下に、長さ、角度、最大速度の誤差の、それぞれのデータのばらつきを示す標準偏差の結果を記載する。

### 2.6.1 短期記憶の再現誤差

Fig. 2-7 に、短期記憶に基づく長さの再現結果を示す。これらのデータに対して、Bartlett の等分散性の検定を行った。検定の結果、有意水準 0.1% で有意であった ( $\chi^2(8) = 116.0$ )。

Fig. 2-8 に、短期記憶に基づく角度の再現結果を示す。これらのデータに対して、Bartlett の等分散性の検定を行った。検定の結果、有意水準 0.1% で有意であった ( $\chi^2(8) = 282.5$ )。

Fig. 2-9 に、短期記憶に基づく最大速度の再現結果を示す。これらのデータに対して、Bartlett の等分散性の検定を行った。検定の結果、有意水準 0.1% で有意であった ( $\chi^2(8) = 306.1$ )。

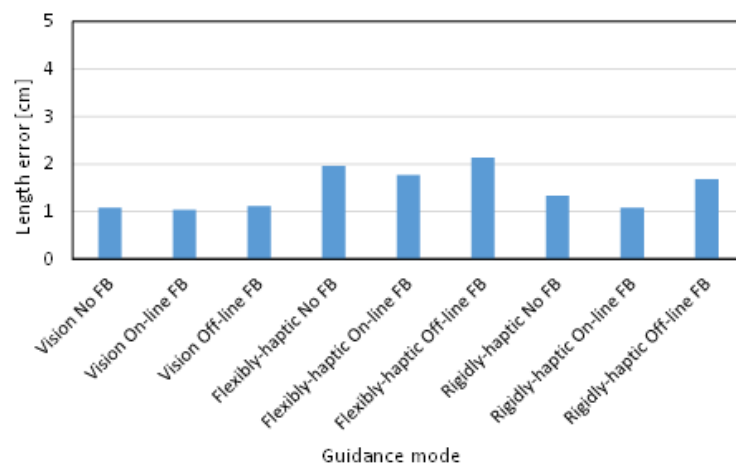


Fig. 2-7. Standard deviation of reproduced length in learning / short-term recall phase.

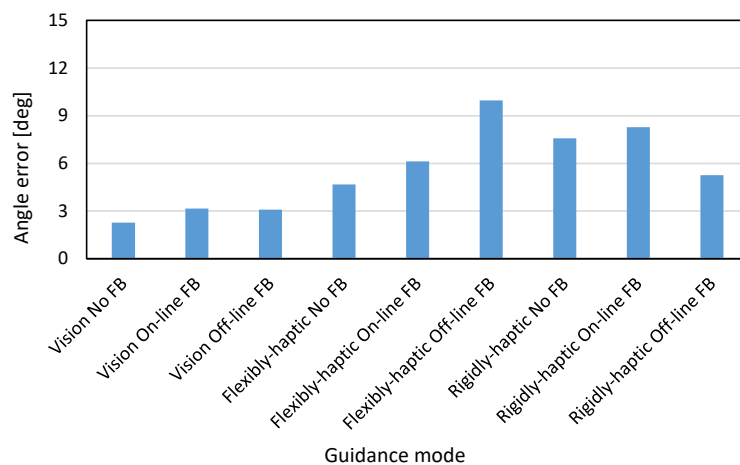


Fig. 2-8. Standard deviation of reproduced angle in learning / short-term recall phase.

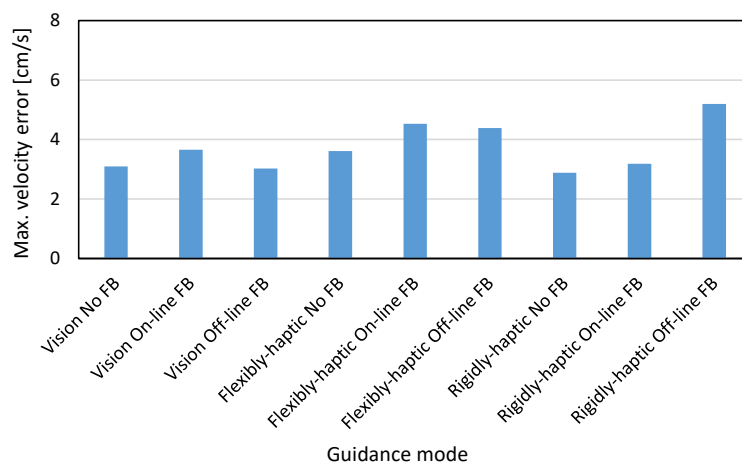


Fig. 2-9. Standard deviation of reproduced max. velocity in learning / short-term recall phase.

### 2.6.1 長期記憶の再現誤差

Fig. 2-10 に，長期記憶に基づく長さの再現結果を示す．これらのデータに対して，Bartlett の等分散性の検定を行った．検定の結果，有意水準 0.1%で有意であった ( $\chi^2(9)=114.5$ ) ．

Fig. 2-11 に，長期記憶に基づく角度の再現結果を示す．これらのデータに対して，Bartlett の等分散性の検定を行った．検定の結果，有意水準 0.1%で有意であった ( $\chi^2(9)=69.2$ ) ．

Fig. 2-12 に，長期記憶に基づく最大速度の再現結果を示す．これらのデータに対して，Bartlett の等分散性の検定を行った．検定の結果，有意水準 0.1%で有意であった ( $\chi^2(9)=21.4$ ) ．

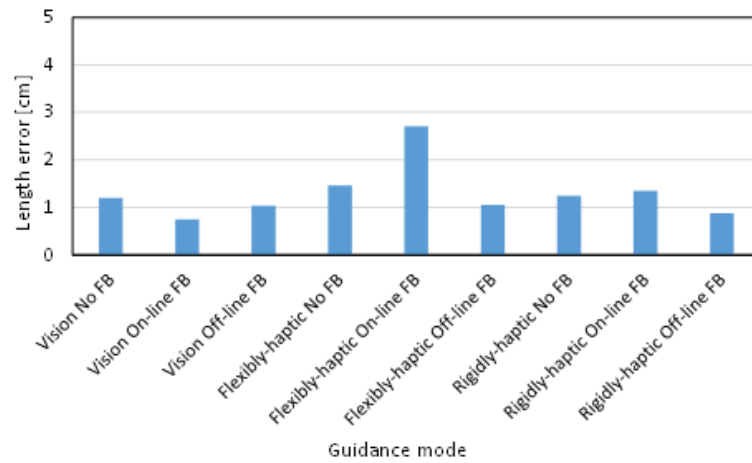


Fig. 2-10. Standard deviation of reproduced length in long-term recall phase.

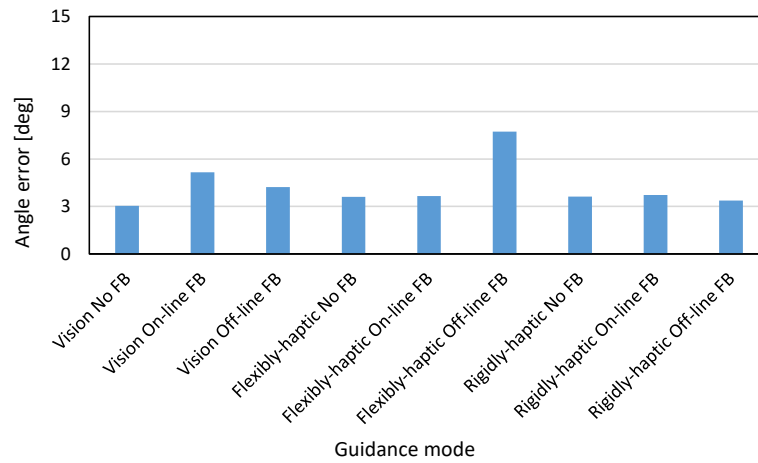


Fig. 2-11. Standard deviation of reproduced angle in long-term recall phase.

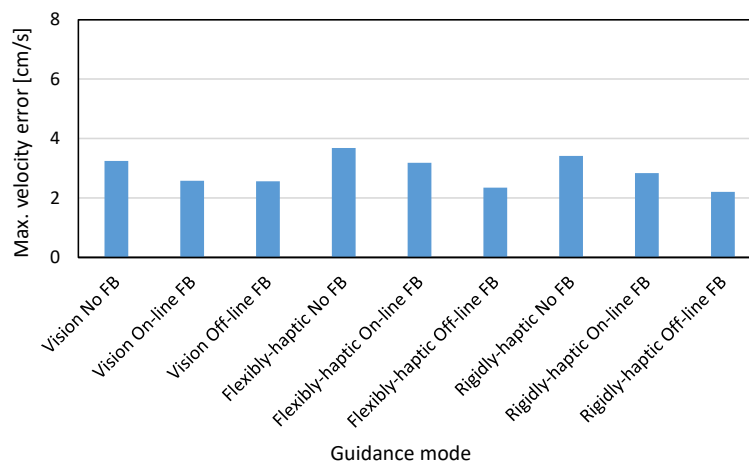


Fig. 2-12. Standard deviation of reproduced max. velocity in long-term recall phase.



## 第3章 考察

本実験では、「提示方法」の3水準すなわち、Vision / Flexibly haptic / Rigidly haptic, ならびに「誤差のフィードバック方式」3水準すなわち、No FB / On-line FB / Off-line FB, を組み合わせた9水準の「運動学習方法」の間で、短期記憶に基づく再現試行、および長期記憶に基づく再現試行、それぞれに対して評価した。具体的には、再現されたストロークの長さ、角度、および最大速度に関して、それぞれのばらつきの標準偏差を求め、これを評価値とした。

我々は、認識・学習の特性を以下のように考えている。

短期記憶は「認識」のし易さを表すと考えられる。すなわち、

認識パターン1：「短期記憶のばらつきが小さい」ということは「わかり易い」条件である。

認識パターン2：「短期記憶のばらつきが大きい」ということは「わかり難い」条件である。例えば、学習を繰り返す中で認識した運動の誤差を修正した量が大きいと、短期記憶における再現試行のばらつきが大きくなる。

また、長期記憶は「動作の定着」の程度を表すものであり、重要な認識・学習の指標である。すなわち、

学習パターン1：「長期記憶のばらつきが小さい」ということは「動作が定着し易かった」条件である。

学習パターン2：「長期記憶のばらつきが大きい」ということは「動作が定着し難かった」条件である。

その上で、一般論として、以下が考えられる。

認識・学習パターン1「短期記憶のばらつきが小さい」わかり易い条件は、わかった後で試行を重ねても、動作が定着し難いところがある。その結果として、長期記憶ではさほど有意性を示すことができず、「長期記憶のばらつきは有意に小さくはならない」ないことがある、

「短期記憶のばらつきが大きく」わかり難い条件では、わかるまで十分に施行を重ねる必要があり、その結果として「長期記憶のばらつきが小さく」動作が定着し易くなるものと期待される。

### 3.1 提示方法による違い

まず、提示方法の違い（Vision / Flexibly haptic / Rigidly haptic）について考察する。

短期記憶に基づく再現試行に関して、空間的な物理量である長さおよび角度の再現において Vision 条件は Flexibly haptic および Rigidly haptic の条件に比して誤差が小さく見られた。言い換えれば、視覚を介した学習である Vision 条件下で行われたものは認識パターン 1 に対応し、自己受容感覚（身体の運動や与えられる力の感覚）を介した学習である Flexibly haptic および Rigidly haptic の条件は認識パターン 2 に対応する。これは、静的な知覚性能は、自己受容感覚よりも視覚の方が優れているため、繰り返し試行の早い段階で目標長さの認識が収束していることによると考えられる。このことは、Lu<sup>ttgen</sup> らの「視覚提示による学習は空間的な物理量の学習に貢献する」という研究結果と一致する。

これに対して、長期記憶に基づく再現試行に関しては、Vision 条件の Flexibly haptic および Rigidly haptic の条件に対する優位性は特に見いだせなかった。これは、必ずしも短期記憶でばらつきが小さくとも、長期記憶のばらつきも小さくなるとは限らないということを示しており、「認識・学習パターン 1」に対応すると考えられる。

さらに、Flexibly haptic と Rigidly haptic の条件下で行われた再現の比較では、Rigidly haptic 条件下では学習時に Flexibly haptic 条件下よりも大きな力が加えられるため、目標の長さ、角度、最高速度が明瞭に提示され则认为られる。これに伴い、目標の長さ、角度、最高速度の認識が容易となり、繰り返し試行の早い段階で収束し、誤差の低下に繋がると考えられる。得られた結果も概ねそのような傾向を示していた。（詳細には、角度再現では特段の傾向は見られなかった）。これに対して、長期記憶では、一部の条件で突出しているものの、全体としては Flexibly haptic 条件と Rigidly haptic 条件の間には大きな差はみられず、やはり「認識・学習パターン 1」に対応すると考えられる。

### 3.2 誤差のフィードバック方式による違い

誤差のフィードバック方式の違い（No FB / On-line FB / Off-line FB）について考察する。

まず、長さ、および角度のような静的な物理量に関しては、誤差のフィードバック方式（No FB / On-line FB / Off-line FB）の間に特徴的な違いは見られなかった。

次に、最高速度は動的な物理量であるが、上記の静的な物理量に比して動作の教示という観点で最も難度が高く、また、投球など実際面でも、静的な物理量より重要な価値を持っている。それがゆえ、その認識・学習性能を高めることへのニーズは高い。

そのように重要な最高速度の誤差において特徴的な傾向として、学習性能、すなわち長期記憶に基づく再現におけるばらつきは、いずれの提示方法であっても（Vision / Flexibly haptic / Rigidly haptic），No FB>On-line FB>Off-line FB のような顕著な大小関係が一貫して見られる。これは、

No-FB では、動作主体感を感じて手を動かすことはできる。しかし、誤差の存在を知らされないので学習時の運動中に修正ができないことから、これが致命的な原因となって長期記憶として残らず、学習が不十分になったと考えられる。

On-line FB では、学習時の運動中に修正を行うものであるが、On-line で時々刻々修正を求められることにもなり、結果として、修正することが必ずしも動作主体感を感じさせるわけではなく、むしろ動作主体感を失わせることになり、結果として再現速度の定着という観点では Off-line FB に劣るものとなったと考えられる。

これらに対して、残る Off-line FB では、第一に学習時の運動中に修正をしないことから動作主体感を感じて手を動かすことができる。加えて、主に速度差の動作開始から停止に至る力の積分値が学習者に与えられることが想定される。このことが速度の誤差の知覚を助け、ひいては試行をまたいでの修正を容易にするという利点があると想定される。このように、Off-line FB では、動作主体感を感じながら、誤差も修正できるという利点があり、結果として、いずれの提示方法であっても（Vision / Flexibly haptic / Rigidly haptic），No FB>On-line FB>Off-line FB のような顕著な大小関係になったものと考えられる。

## 第4章 結言

本研究では，人が運動を学習する際の，目標運動の提示方法（ハプティックデバイス/ディスプレイ）による分類，筋活性の有り/無しによる分類，学習時に行う運動の主体（デバイス/人）による分類に着眼し，それぞれの特性を検証する実験を行った．実験では，被験者は手の1線分直進運動を学習および再現した．学習効果の評価には，再現時の1線分運動を構成する要素である長さ，角度，最高速度の誤差を用いた．

得られた結果は以下のとおりである．

- (1) 短期記憶に基づく再現誤差の評価により，視覚を介した学習である Vision 条件下で行われた再現では，自己受容感覚（身体の運動や与えられる力の感覚）を介した学習である Flexibly / Rigidly haptic 条件下で行われた再現と比べて，空間的な物理量の長さおよび角度の再現に優れることが示唆された．
- (2) 長さの長期記憶に基づく再現誤差の評価により，自己受容感覚を介した学習条件下では，Off-line FB による学習を行った条件において長さ再現の定着が示唆された．
- (3) 最高速度の長期記憶に基づく再現誤差の評価により，いずれの提示方法においても No FB>On-line FB>Off-line FB のような誤差の大小関係がみられた．主体的な動作と動作後の修正を繰り返し行うことによる，速度の定着の促進が示唆された．

# 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．

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

- Jeremy D. Wong, Dinant A. Kistemaker, Alvin Chin, and Paul L. Gribble, Can proprioceptive training improve motor learning?, J Neurophysiology, vol. 108, no. 12(2012), pp. 3313–3321
- Johan Lönn, Mats Djupsjöbacka, Hakan Johansson, Replication and discrimination of limb movement velocity, Somatosensory & motor research, vol. 18, no. 1(2001), pp.76-82
- Reza Shadmehr, Maurice A. Smith, JohnW. Krakauer, Error Correction, Sensory Prediction, and Adaptation in Motor Control, Annu Rev Neurosci vol. 33(2010), pp. 89 –108
- Ken Takiyama, Masaya Hirashima, Daichi Nozaki, Prospective errors determine motor learning, NATURE COMMUNICATIONS, vol. 6, no. 5925(2015)
- Nicolo` F. Bernardi, Mohammad Darainy, and David J. Ostry, Somatosensory Contribution to the Initial Stages of Human Motor Learning, The Journal of Neuroscience, vol. 35, no. 42(2015), pp.14316 – 14326
- Jeroen B. J. Smeets, John J. van den Dobbela, Denise D. J. de Grave, Robert J. van Beers, Eli Brenner, Sensory integration does not lead to sensory calibration, vol. 103, no. 49(2006), pp. 18781–18786
- Nadia Garcia-Hernandez and Vicente Parra-Vega, Active and efficient motor skill learning method used in a haptic teleoperated system, The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication Toyama, Japan, Sept. 27-Oct. 2, 2009
- Jenna Lu`ttgen, Herbert Heuer, Robotic guidance benefits the learning of dynamic, but not of spatial movement characteristics, Exp Brain Res, vol. 222(2012), pp.1–9