

運動伝染が生み出す運動予測の変調を利用した Pseudo-haptics の生起要因の分析

齊藤寛人^{†1} 福地健太郎^{†1}

概要：Pseudo-haptics として知られる擬似的な外力覚は、これまでの研究では視覚情報と力覚情報とに不一致が生じた際に力覚情報が変容されることにより生じると説明されてきた。しかしながら変容された力覚情報は、外力としても随意運動の結果としても解釈することが可能であり、擬似的な外力が生じる要因について十分な説明はなされていなかった。我々は、この変容が外力として解釈されるには、自己の運動予測と視覚的に知覚された運動結果との差を認知することが条件であるという仮説を立てた。この検証のため、被験者の運動に運動伝染を引き起こし、視覚情報と力覚情報との一致性を保った上で運動予測と運動結果との間に差を生じさせる実験を行った。この実験ではマウスによるステアリングタスクを用い、被験者にはタスク中に感じた外力の強度を報告させた。このタスクと、他者が同じタスクを行っている映像を観察するタスクを交互に行うことで、被験者の運動に運動伝染を誘発した。その結果、生じた運動伝染と同じ方向に被験者が外力を感じることが確認され、運動予測と運動結果との差を認知することが疑似的な外力が引き起こされる要因となることが示された。

1. はじめに

マウスポインタのようなユーザの身体運動に同期して動く視覚的対象に対して、その位置や運動速度を変調するとユーザが擬似的な力覚を感じる現象が知られている。このような現象は **Pseudo-haptics** と呼ばれる。

Pseudo-haptics の生起要因は、視覚と力覚を通じて得られた対象の運動や位置・姿勢についての情報が一致しない場合に、視覚が力覚よりも優位に働き、力覚情報が変容されるためであると一般には説明される。以降、本稿ではこの視覚と力覚との不一致を視-力覚間衝突 (**visuo-haptic conflicts**) と呼ぶ。また、ほとんどの場合この錯覚は外部からの触力覚(外力)として解釈されることが知られている。この錯覚を利用すれば、力覚提示デバイスを用いなくてもユーザに擬似的な外力を提示可能であるため、Pseudo-haptics を応用した力覚提示手法が多く提案されている。

しかし近年では視-力覚間衝突の結果が外力と錯覚されるのではなく被験者自身の随意運動の結果として錯覚される例が報告されている[18][30]。つまり、前述の説明だけでは視-力覚間衝突の結果が外力覚として認識される原因を説明しきれていないことになる。したがって、Pseudo-haptics の生起要因を明らかにするためには、それが外力として解釈されるための条件を特定する必要がある。

我々は、Pseudo-haptics が外力として解釈されるためには、自身の運動の結果として知覚された視覚情報と、自身が予測した運動の結果との差が認知されていることが条件となる、という仮説を立てた。また、この仮説が正しければさらに、視-力覚間衝突が生じない状況であっても、運動結果と運動予測とが一致しないことをユーザが認知できさえ

すれば外力の錯覚が生じる可能性が考えられる。

我々はこの仮説を検証するために、視-力覚間衝突を起こさずに運動予測と運動結果との間に不一致を作り出し、被験者が外力を感じるかどうかを調べる実験を行った。その様な条件を実現するために同実験では、運動伝染 (**motor contagions**) と呼ばれる現象を利用した。運動伝染は、他者の運動を観察することで観察者自身の随意運動が無意識的に影響を受ける現象である[5]。したがって運動伝染が起こると被験者の運動は無意識に影響されるため、運動予測とその結果との間に不一致が生じるようになる。

本実験では、被験者にマウスを使ったステアリングタスク中に感じた外力の強度を報告させた。この時に、他者が行う同種のタスクを観察させることで運動伝染を引き起こし、被験者の運動を無意識に変容した。それにより運動予測と視覚的運動結果との不一致が生じ、それが外力として解釈されるかどうかを、報告された外力の強度および記録されたマウスの軌道をもとに分析した。

実験の結果、他者の運動の観察によってステアリングタスク中の被験者の手の運動速度が変調され、また運動が変調された方向と同じ方向に外力を感じていたことが確認された。この結果は、視-力覚間衝突が生じない状況であっても、運動予測と視覚的運動結果との不一致が外力として解釈されたことを示している。

この結果から、Pseudo-haptics による外力知覚には、運動予測と知覚された運動結果との不一致を認知することが重要な要因となると結論付けられる。

^{†1} 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo, Japan

2. 背景

2.1 Pseudo-haptics の生起要因についての問題領域

Pseudo-haptics は、視-力覚間衝突が生じた際に視-力覚間で感覚情報を矛盾なく統合するために、視覚情報によって力覚情報を変容されることで生じる錯覚であると一般的には説明されている[15][17]. つまり視覚と力覚のどちらかあるいは両方に何らかの要因で変化が加えられたと解釈することで辻褄を合わせようとする認知の働きを仮定している. その際、視覚が優位であり力覚の方が変容の対象となることが多くの研究によって示されている.

しかしその変容がどのように知覚されるかについては十分な説明がなされていない. すなわち、力覚に対する変容は、外的要因によるもの(外力)としても内的要因によるもの(内力)としても解釈でき、Pseudo-haptics が生じるためには外力として解釈されることが求められるからである. 実際に、鳴海らは仮想現実感(VR)を応用した、力覚の変容が内力として解釈される錯覚の例を報告している[18][30]. 例えば“Unlimited Corridor”[18]は、被験者は現実には円形の壁の周りを、壁に手で触れながら歩いているにも関わらず、VR 空間内ではまっすぐな壁と道を提示することにより、まっすぐ歩いているような錯覚を作り出している. この場合、被験者は現実には円運動を行っており、それに応じた力覚を感じているが、視覚ではそれを直線運動として感じているため、力覚は変容される. その際、その変容は外力によって向きを変えさせられたとは解釈されずに、自分が主体的に行った運動(随意運動)の結果、すなわち内力として解釈されていることが報告されている. つまり、視-力覚間衝突は外力として解釈される場合と内力として解釈される場合があることとなる.

したがって、Pseudo-haptics の生起要因として、視覚情報によって力覚情報を変容されるという説明だけでは不十分であり、それが外力として解釈されるか否かの条件を示すことが求められている. この条件を明らかにすることは Pseudo-haptics の原理解明のために必要不可欠であり、UI デザインや VR などの様々な分野でこの錯覚を応用する上で役立てることができる.

2.2 運動予測に基づいた外力知覚についての仮説

我々は pseudo-haptics が外力として解釈される条件の仮説として、自身の身体運動の結果に対する予測(運動予測)と実際に視覚的に知覚された運動結果との差をユーザが認知することであると考えている. 実際、一部の先行研究では Pseudo-haptics と運動予測との関連性を示唆している.

渡邊は Pseudo-haptics の生起要因について Sense of Agency の概念を通じて考察している[31]. Sense of Agency とは特定の運動を「自分が主体的に引き起こした」と感じる感覚であり[9], 特定の視覚的对象に Sense of Agency を感じるためには、自分が動かそうとした時にその対象が「意

図通りに動く」ことが重要である. 渡邊は、Sense of Agency を感じている視覚的对象が意図に反した動きをすると、何らかの外的要因が自身の運動に意図に反した動きをもたらしたと解釈され、疑似的な外力を感じると考察している.

神経生理学での運動制御に関する理論であるモーターコントロール理論に基づいた研究では、ある視覚的对象の運動に Sense of Agency を感じるためには、自身の運動指令に伴う運動予測と視覚的運動結果との一致性を認知することが重要であることが明らかになっている[21][22]. なおこのような能動的な運動に対する予測的な知覚メカニズムはフォワードモデルと呼ばれる[26].

これらをまとめると、Pseudo-haptics が外力として解釈される条件は、運動予測と視覚的運動結果とが一致しないと認知することで被験者が運動結果を「自分の主体的な運動によるものではない」と解釈することにあると考えられる.

また、我々の過去の研究では、能動的な運動時に自己運動と視覚的運動との随伴関係を認知する上では、運動予測と視覚的運動結果との一致性の認知が重要であることを示した[19][28][29]. これらの研究では、運動結果を予測しやすい状況であれば、視-力覚間衝突が生じる状況であっても、自己の随意運動と視覚的对象の運動とが随伴関係にあると解釈されることを示した. また Honda らは、運動結果を予測しやすい状況では疑似的な外力知覚が生じにくくなることを示している[10]. 同研究では、画面上のポインタを手の運動で操作する際に、ポインタの運動を遅延させると被験者は外力を感じるが、被験者に遅延について十分に学習させた場合に知覚される外力の量が小さくなることを示している. これらの結果も、運動予測と視覚的運動結果との差の認知が条件に関与していることを示唆している.

以上から、運動予測と視覚的運動結果との差を被験者が認知していることが、Pseudo-haptic を外力として解釈するための条件であると我々は予想している. 先行研究においてこれを直接示す事実は示されていないため、我々はこれを調査する実験を実施した.

3. 関連研究

3.1 Pseudo-haptics

Pseudo-haptics は視覚的運動の変調の仕方や背景情報の組み合わせ方などによって様々な解釈を与えられることがわかっており、これまでにばね抵抗の呈示[15], テクスチャの凹凸感の呈示[16], 形状の呈示[4][25], 固さの呈示[3]など様々な力覚や触覚の提示手法が提案されている.

Watanabe は、被験者が動かすポインタの運動結果を変調しない場合でも Pseudo-haptics が生じることを示した[24]. この研究で行われた実験のタスクでは、ポインタの運動を変調しない代わりに、ポインタの背景で自動的に運動するオブジェクトとポインタが重なると同時にオブジェクトの運動の方を変調した. その結果、ポインタの運動を変調し

たときと同じように外力の錯覚が生じることが示された。ただし、ポインタとオブジェクト間の相対的な移動量の関係性は変化しており、この相対的な移動量の変化を視覚的運動結果として捉えることによって視-力覚間衝突が生じていたとも捉えることが可能である。

3.2 運動伝染

運動伝染は、他者の運動を観察することで観察者自身の随意運動が無意識的に影響を受ける現象である。このとき、観察する運動の性質によって観察者の運動への影響が変化することが分かっている。Kilner らは、人間の運動を観察する場合とロボットの運動を観察する場合とを比較した [13]。その結果、自分と一致しない運動を人間が行う時のみ運動伝染が起き、ロボットが行うときには起きないことが示唆された。Bouquet らはシンプルなドットの運動の観察を利用した実験系において、人間がドットを動かした際の運動を観察する場合と、機械的な等速運動を観察する場合を比較した [6]。その結果、人間による動きを観察するときのみ運動伝染が生じる事が確認され、人間的な運動を観察することが運動伝染を引き起こす上で重要であることが示唆された。また Bouquet らは、観察する運動の目標が明示され、どのような運動が実行されるかを観察者が認知できることが運動伝染の影響量を増幅させることを示唆した [7]。彼らの実験では、被験者は自ら運動しながら実験者が用意した俳優が被験者とは異なる運動を実行するのを観察する。このとき、あわせて俳優の運動の目標を表す点を被験者に示すかどうかで運動伝染の生起量の違いを分析した。その結果、目標点を提示した場合に運動伝染が変化した。また俳優の運動を提示せずに目標点のみ提示する条件では、運動に変化が生じなかったことから、単なる目標点の有無ではなく、目標に向かった運動であるか否かが運動伝染に影響することが示唆された。

Ikegami らは、予測誤差を伴う運動を観察することによる新しい運動伝染について報告している [11]。彼らは観察する運動が予測通りか予測に反するかによって、生じる運動伝染の方向が変化することを示唆した。彼らの指差し運動を用いた実験では、被験者は画面上に横方向に並列された3本の縦線の内、中央の線をタッチする課題と、実験者が用意した俳優が同じ課題を行っている映像を観察する課題を交互に行った。この時、俳優は中央の線ではなく右（または左）の線付近をタッチしたが、被験者には俳優の目標について条件ごとに別の内容が伝えられた。「俳優は右（または左）の線を狙っている」と伝えられた被験者は、予測した通りの俳優の運動を観察し、従来の運動伝染と同様に俳優の運動に引っ張られるように運動が変調された。一方で、「俳優は真ん中を狙っている」と伝えられた被験者は、予想に反する俳優の運動を観察し、俳優の運動とは逆方向に運動が変調された。この結果は観察する運動に対する予測と実際に観察した運動結果との不一致が、自身の運動に

対する運動予測と運動結果との対応関係にも無意識な影響を与えていることを示している。

3.3 ステアリングの法則

本論文で報告する実験では運動伝染を生じさせるために、経路幅が途中で変化するステアリングセッションを利用する。ここでその背景となるステアリングの法則に関する関連研究について説明する。ステアリングの法則はフィッツの法則 [8] から派生した、マウスポインタなどのユーザが操作する視覚対象を幅の細い経路を通過させるステアリングタスクに対するパフォーマンスモデルである [1]。この法則は、間接制御のスタイラス操作 [1]、マウス、タッチパッド、トラックボール、トラックポイント [2]、直接制御のスタイラス操作 [14]、タッチスクリーン [20] など様々な条件に適合することがわかっている。Accot と Zhai は経路の全長 A 幅 W の経路を通過する時間 (MT) が次の式 (1) の関係になることを示している。

$$MT = a + b \frac{A}{W} \quad (1)$$

式中の a 、 b は実測値の分析によって決定される定数ありフリーパラメータと呼ばれる。また A/W はタスクの難易度を表す指標となり、index of difficulty (ID) と呼ばれる。つまりステアリングの法則に基づく、経路の全長 A が長くなるか経路幅 W が狭くなることで経路を通過する難易度 ID が上昇し、通過時間 MT が長くなる。

また、経路の幅 W に対する移動速度 V は以下の式 (2) で表現される。

$$V = a + b W \quad (2)$$

すなわち、経路内の運動速度は経路の幅 W に依存しており、 W が大きいほど速くなり、幅が小さいほど遅くなるという関係がある。

Yamanaka らは、2種類の幅の経路が直線的に連結した場合の操作性について報告している [27]。彼らの研究では、経路幅が細くなるか、太くなるか、一定であるかによらずに、以下の式 (3) に示す前半の経路の難易度 ($ID_1 = A_1/W_1$) と後半の経路の難易度 ($ID_2 = A_2/W_2$) を加算するモデルでも十分高精度にモデル化できることが確認された。

$$MT = a + b (ID_1 + ID_2) \quad (3)$$

ただし、単一の経路を通過する場合と比較すると、ユーザが後半の経路を先読みして挙動を変化させていたことが観察された。具体的には、前半の経路では後半の経路に備えて、運動速度を抑制することが確認された。

4. 実験デザイン

従来の Pseudo-haptics に関する実験では、視覚対象 (マウスポインタなど) の運動をソフトウェアにより変調する手法が主に採用されている。しかしこの手法では視-力覚間衝突と、運動予測と視覚的運動結果との不一致の両方が発生するため、本研究が対象としている後者のみの影響を純

弊に検証することは難しい。そのため、視-力覚間の衝突を起こさずに、運動予測と視覚的運動結果とが一致しない状況を作る必要がある。

そこで我々は運動伝染 (motor contagions) を用いてその状況を作ることを試みた。この運動伝染が観察者の運動に与える影響を利用することで、本研究を進める上での課題を解決することができる。なぜなら、運動伝染が生じると観察者の運動は無意識的に変調されるため、被験者の予測とは異なる運動結果が生じる。しかし、その運動結果は観察者本人の運動によって生じたものなので、視-力覚間の感覚情報の一致性は保たれたままである。故に、視-力覚間の衝突を避けつつ運動予測と視覚的運動結果との不一致を生じさせられるためである。

また、一般的な運動伝染は、自身が実行する運動と類似はするが一致しない他者の運動を観察すると、自身の運動が観察した運動に近づくように変調されることが知られている。一方 Ikegami らは、他者の運動の結果を被験者に事前に予測させた上で、その予測と異なる運動結果を観察させると、観察した運動に近づくのではなくむしろ離れるように変調されることを示している。

これらの結果、観察者の運動は、予測と反する運動を観察させるか、予測通りの運動を観察させるかの違いによって、生じる運動伝染の方向を制御できることとなる。

以上の考察に基づいた実験デザインについて説明する。本実験では、マウスを用いたポインタ操作 (ステアリングタスク) において、被験者に画面上で他者のポインタ操作を観察させることで運動伝染を引き起こし、被験者のポインタ操作運動を変調する。その際に被験者が外力を感じれば、力覚情報が視覚情報によって変容されなくとも運動結果と運動予測とが一致しないことによって擬似的な外力知覚を引き起こされたと言え、仮説を立証できる。

また、実験では被験者を、予測と反する速度変化を観察する「予測誤差ありグループ (prediction error : PE)」、予測通りの速度変化を観察する「予測誤差なしグループ (no prediction error : nPE)」, および観察を行わない「対照条件グループ (control : CON)」の3グループに分け、グループ間での結果を比較した。

実験は、被験者自らがステアリングタスクを行う「ステアリングセッション」と、他者が行ったステアリングタスクの記録映像を観察する「観察セッション」からなり、PE および nPE グループの被験者はそれぞれのセッションに交互に参加した。CON グループの被験者はステアリングセッションのみに参加した (図 1)。

ステアリングセッションでは、ポインタを操作して2種類の幅の経路が連結した経路 (図 2) を通過するステアリングタスクを行わせた。ステアリングタスクでは、通過する経路の幅に応じて経路内での被験者による運動の速度が変化することが分かっている [1]。また、2種類の幅の経路

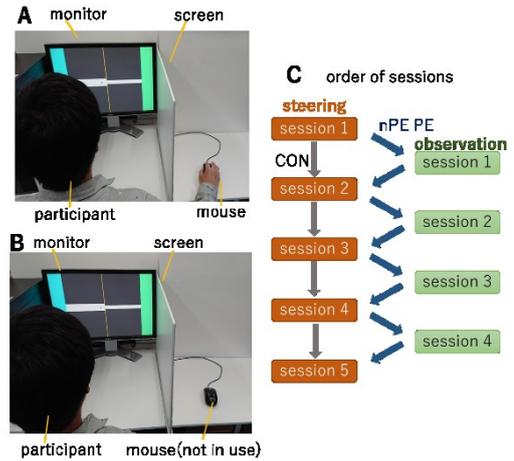


図 1 実験でのタスクの構成 (A: ステアリングタスク, B: 観察タスク, C: 各セッションの順序)

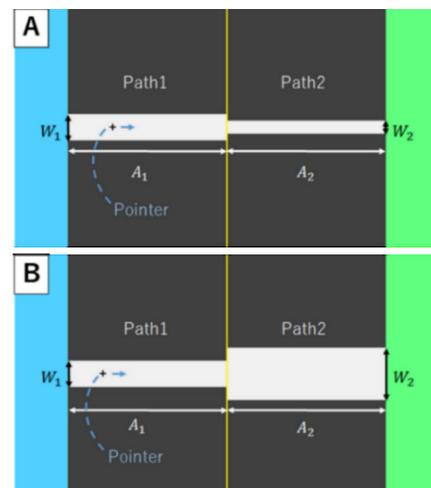


図 2 経路条件 (A: 狭まる経路, B: 広がる経路)

が連結した経路を用いると、変化する経路幅に備えて被験者が自ら運動速度を変化させることが先行研究によって確認されている [27]。そのため、経路幅の変化によって自身の運動・他者の運動ともにその速度変化を被験者は予測できるものと我々は前提する。具体的には、後半に幅が狭まる経路 (図 2-A) では後半から運動が減速し、幅が広がる経路 (図 2-B) では加速すると被験者が予測すると我々は仮定した。

そこで PE グループ及び nPE グループの被験者には観察セッションにおいて、経路幅の変化から予測される運動と実際に観察する運動結果が一致するか否かによって方向の異なる運動伝染を生じさせ、自身の運動に対する運動予測と運動結果の対応関係を歪ませた後、ステアリングセッションにおいてその対応関係の不一致を外力として知覚するか否かを調査するため、タスク完了直後に、後半の経路内で感じた外力の強度と方向を被験者に報告させた。

5. 実験

5.1 装置

本実験では、映像呈示用の液晶ディスプレイ (Dell U2410,

24 インチ, 518.4×324.0 mm, 1920×1200 pixels) と入力用のマウス (Microsoft MSK-1113) を用いた。被験者はディスプレイの正面に置かれた椅子に座り, 利き手でマウスを操作した。実験中マウスおよびこれを操作する被験者の手は衝立によって被験者の視界から隠されており, 被験者はディスプレイに呈示される映像のみを見た (図 1)。

5.2 タスク

5.2.1 経路条件

本研究のタスクはマウスによって十字型のポインタを左側の青いエリアから右側の緑のエリアまで, 白色の経路の中を通過して水平方向に移動させるものであった。このときの経路は中心で黄色の直線によって左右に区切られ, 経路の全長は 388.8 mm ($A_1 = A_2 = 144.4$ mm) であった。十字型のポインタのサイズは 8.1 mm×8.1 mm であった。また, 経路条件として狭まる経路 (図 2-A) と広がる経路 (図 2-B) の 2 種類の条件を設定した。前半の経路幅 (W_1) と後半の経路幅 (W_2) は経路条件ごとに設定された。図 2-A に示す狭まる経路は後半の経路区間 (Path2) が前半 (Path1) より幅が広い経路条件 ($W_1 > W_2$) である。この狭まる経路における前半の経路幅 W_1 は 32.4 mm で, W_2 は W_1 の半分の 16.2 mm であった。また図 2-B に示す広がる経路は Path2 が Path1 より幅が広い経路条件 ($W_1 < W_2$) である。この経路での条件は W_2 以外すべて狭まる経路と同じであった。広がる経路における W_2 は W_1 の 2 倍で, 64.8 mm であった。

5.2.2 ステアリングセッション

各セッションは 1 回のステアリングタスクからなる。このステアリングタスクでは被験者はマウス操作によってポインタを青色エリアから緑色のエリアまで白色の経路内を通過して移動させた。その際, 被験者はポインタを白色の経路からはみ出させずにワンストロークで経路を通過させることが求められた。

なお, 5.3 節にて後述するように, 実験前に被験者は後半の経路 (Path2) では進行方向と同じか逆方向に力を感じる可能性があることを説明を受けた。しかし, 実際には実験者による外力の提示及びポインタの視覚的運動結果の変調は一切行われず, 経路内のどの位置でもマウスの入力値 (実際の手の運動) とポインタの移動量 (視覚的運動) の対応関係は同じであった。各ステアリングセッションの後に被験者は Path2 で感じた力の大きさを -5~+5 の 11 件で回答した。スケールは進行方向と同じ側の力 (右側) を正, 逆側の力 (左側) を負としてそれぞれ 5 段階とした。またまったく力を感じなかった場合は 0 と回答した。

なお, 本研究では力が加えられていない状態でのポインタの運動のみを被験者に事前に学習させ, 実力覚提示などを用いて -5~+5 までの力の大きさの標準化を行わなかった。そのため被験者は自らの主観評価で決定した数値を回答した。標準化を行わなかった理由は, 運動伝染を引き起こすためには, 5 回のステアリングタスクと 4 回の観察セ

ッションを連続して実施する必要がある, 各セッションの前に実力覚提示などを提示し基準となる力の大きさを学習させることができないためであった。

5.2.3 観察セッション

各セッションは 10 回の観察タスクからなる。ポインタの運動には, 事前に記録しておいた他者が行うステアリングタスクでの運動データを用いた。また被験者が観察する映像には背景の経路とポインタの運動のみが含まれ, 操作者やマウスの姿は含まれなかった (図 1-B)。

観察セッションで使用するポインタの運動として, 加速運動と減速運動の 2 種類を作成した。これらは 1 名の実験協力者 (以降, これを俳優と呼ぶ) が本研究の 2 つの経路条件でステアリングタスクを行った運動データから作成された。俳優には実験の意図は知らせておらず, 俳優が行ったステアリングタスクは, Path2 で力を感じるかもしれないと伝えられなかったこと以外は全て被験者が行ったタスクと同じ条件で行った。

加速運動は広がる経路での俳優の運動データ 20 サンプルから実験者が 1 サンプルを選定した。使用する運動データには垂直方向のばらつきが小さく水平方向の速度が平均値に近いサンプルが採用された。採用された加速運動の Path1 での水平方向の平均速度は 166mm/s で, Path2 での平均速度は 256mm/s であった。

また減速運動は狭まる経路での運動データ 20 サンプルから 1 サンプルを選定した。採用された減速運動の Path1 での水平方向の平均速度は 158mm/s で, Path2 での平均速度は 104mm/s であった。

運動伝染は観察者が本来行うであろうものとは異なる運動を観察する際に誘発されることが先行研究で示されているため, 被験者の運動が減速すると予想される狭まる経路でステアリングセッションを行う場合は加速運動を観察し, 反対に加速すると予想される広がる経路で行う場合は減速運動を観察した。また, nPE グループと PE グループとでは, 観察するポインタの運動自体は同じであったが, 観察セッション中の背景の経路条件が異なっていた。nPE グループの被験者は俳優がステアリングタスクを行った経路と同じ経路でポインタの運動を観察した。この経路条件から, 被験者は俳優の運動が加速 (または減速) することを予測し, 実際にも加速 (または減速) する予測通りの運動を観察するため予測誤差が生じないと我々は予想した。一方で, PE グループの被験者は俳優がステアリングタスクを行った経路と反対の経路でポインタの運動を観察した。この経路条件から, 被験者は俳優の運動が加速 (または減速) することを予想し, 実際には減速 (または加速) する予測に反する運動を観察するため予測誤差が生じると予想した。

5.3 手続き

全被験者は 2 つの経路条件での実験に参加した。参加する条件の順番は各グループ内でカウンターバランスされ,

数分間のインターバルをはさんだ後、続けて実施された。

各経路条件での実験開始前に被験者は実験について以下の説明を受けた後にトレーニングセッションに参加した。

- マウスのドラッグ操作を用いて、画面上のポインタを左端の青色のエリアから右端の緑色のエリアまで白い経路内を通して移動させるタスクを実施します。
- マウスは途中で止めずにワンストロークで動かし、ポインタが上下の壁にぶつからないようにして下さい。
- なお、後半の経路内では進行方向と同じ側か逆側のどちらかに外力が加えられる可能性があります。
- 各試行後に感じた外力の大きさを進行方向と同じ側に力を感じた場合は正、逆側に力を感じた場合は負とし、 $-5\sim+5$ の数値で回答してください。数値は主観評価で決めていただきますが、より強い力を感じた時に絶対値の高い数値を回答してください。また、全く力を感じなかった場合は0と回答して下さい。
- はじめにマウス操作に慣れるためのトレーニングセッションを行います。このトレーニングセッションでは外力は加えられていません。

トレーニングセッションでは、幅が変化しない経路 ($W_1 = W_2 = 32.5$ mm) においてステアリングタスクを無制限で体験できた。

各経路条件での実験では、nPE・PEグループの被験者はステアリングセッション5回と観察セッション4回に交互に参加した。CONグループの被験者はステアリングセッション5回にのみ参加した(図1-C)。

各ステアリングセッションは以下のような手順で行われた。各試行の開始前に画面には現在のセッションで用いる経路条件の背景のみが表示され、被験者はマウスを初期位置に置くように指示された。マウスが初期位置にあることを実験者が確認したのちに、スタート地点(青色エリア)にポインタを呈示した。被験者がマウスのボタンを押すとタスクが開始され、被験者はボタンを押したままポインタをゴール地点(緑色のエリア)まで移動させ、その後ボタンを離れた。その後にPath2で感じた力覚量を口頭で回答した。回答後は間を置かず、nPE・PEグループは観察セッションに移行し、CONグループは次のステアリングセッションに移行した。5回目のステアリングセッションが終了するとその経路条件でのタスクが終了となった。

各観察セッションは以下のような手順で行われた。各試行の開始前に画面には現在のセッションで用いる経路条件の背景のみが表示された。実験者の合図とともに、ポインタの運動が提示された。セッションの間、被験者は手を動かさずに、自動的に動くポインタに注目した。ポインタの運動は続けて10試行分提示された。観察が終了すると直ちに次のステアリングセッションに移行した。

5.4 分析手法

本研究では、被験者自らが行うであろう運動とは異なる

速度変化をする俳優の運動の観察による運動伝染について評価するためにステアリングセッションでのポインタの移動速度の変化を分析の対象とした。

速度の分析手法として、記録されたマウスの入力値から、経路内でのポインタの水平方向の運動速度を計測した。また、観察回数によってポインタの移動速度にどのような変化が生じるかを調べるために、Path1での平均速度(V_1)とPath2での平均速度(V_2)から以下の(4)式で表す経路間の速度の対数比(RV)を計算した。

$$RV = \log_2\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (4)$$

対数比を用いた理由は、Path1の平均速度よりPath2での平均速度の方が速い場合と遅い場合で数値に対称性を持たせるためであった。RVが正の場合、Path2での平均速度がPath1の平均速度より速かったことを表し($V_1 < V_2$)、RVが負の場合、Path2での平均速度がPath1の平均速度より遅かったことを表す($V_1 > V_2$)。ステアリングの法則に従えば、経路内の運動速度は経路幅に依存するため、被験者が狭まる経路条件でステアリングタスクを行う時は、 V_2 はPath1での V_1 よりも遅くなり、広がる経路条件でタスクを行う時は、 V_2 は V_1 よりも速くなることが予想される。ただし、前述したように被験者が運動を抑制することなどが起こり得るため、完全に経路幅に依存する訳ではないと考えられる。

このRVおよび各セッションで被験者が回答した力覚量について、グループ(3水準)と経路条件(2水準)とステアリングセッションの回数(5水準)で混合計画の三要因分散分析(Three-Way ANOVA)を行った。多重比較はRyanの方法を用いた。

5.5 参加者

実験には22歳から24歳の大学生30名(男性24名、女性6名)が参加した。全ての被験者は正常な視力または矯正視力を有し、右利きであった。彼らはPE、nPEおよびCONの各グループに10名ずつランダムに割り当てられた。

5.6 結果

5.6.1 運動速度の変化

表1に各グループ×経路条件の6条件での第1セッションと第5セッションの前後半の経路内での平均速度(V_1 , V_2)及びRVを示す。第1—第5セッション間で V_1 を比較すると、加速運動を観察した「PE×狭まる経路」と「nPE×狭まる経路」の2条件では増加し(表1-A)、減速運動を観察した「PE×広がる経路」と「nPE×広がる経路」の2条件では減少している(表1-B)。一方で、 V_2 に注目すると、グループによって加減速の仕方に変化が生じ、nPEグループでは V_1 以上の増減が生じたのに対して、PEグループでは増減が抑制された。ただし「PE×狭まる経路」ではほとんど増加しなかったのに対し、「PE×広がる経路」では V_1 の減少率に近い減少がみられた。CONグループでは、経路条件によらず V_1 , V_2 の双方が増加した。これにはタスクに対する学

習効果が影響した可能性が考えられる。ただし、CON グループでは RV や被験者の力覚知覚にセッション間の有意差は確認されなかった。このことから、この学習効果による RV や力覚知覚の分析結果への影響はないと判断した。

次に、速度比 RV の分散分析では経路条件による主効果 [F(1, 27) = 30.218, $p < 0.001$] と、三要因 (2 次) の相互作用 [F(8, 108) = 2.220, $p = 0.031$] が確認された (図 3)。また、各グループでの経路×セッション回数の単純交互作用の多重比較では、nPE において単純交互作用 [F(4, 108) = 4.086, $p = 0.004$] が確認された。したがって各グループ×経路条件の 6 条件でセッション回数による単純・単純主効果の検定を行った。その結果、nPE グループの拡がる経路条件でのみセッション回数による単純・単純主効果 [F(4, 216) = 3.322, $p = 0.012$] が確認された。また単純・単純主効果についての多重比較の結果、第 1-第 5 セッション間 [$p < 0.001$] に有意差が確認された (図 3-B)。「PE×狭まる経路」 [F(4, 216) = 1.054, $p = 0.381$] や「nPE×狭まる経路」 [F(4, 216) = 1.687, $p = 0.247$] でもセッション回数を重ねるにつれて RV が変化する傾向が見られたが、有意な差ではなかった (図 3-A, 表 1)。その他の 3 条件では実質的な変化は起きなかった ($p > 0.50$)。

5.6.2 主観的な外力知覚

図 4 にタスク中に被験者が感じた外力の推移を表す。観察によって運動の変化が確認された「PE×狭まる経路」、「nPE×狭まる経路」、「nPE×拡がる経路」の 3 条件では、観察回数が増えるにつれて運動の変化と同じ方向に外力を感じる傾向が確認された。またこの 3 条件での第 5 セッションで回答されたスコアの最大絶対値は 4 であった。ただし、回答された外力の平均値は決して大きくはなく、最も強い外力が報告された「PE×狭まる経路」の第 5 セッションでのスコアの平均値は -1.50 であった (図 4-A)。また、30 名の被験者のうち 3 名 (PE : 1 名, CON : 2 名) が全てのセッションにおいて全く力を感じなかったと回答した。

また本研究では回答するスコアの大きさについて標準化を行えなかったため、各被験者が回答した数値の最大絶対値でその被験者のスコアを割ることで、スコアの大きさの正規化を行った (図 5)。この正規化した値においても前述した 3 条件では、観察回数が増えるにつれて運動の変化と同じ方向に値が推移する傾向が確認された。

以上から、回答するスコアの大きさには個人差によるばらつきが生じており、全体として被験者が感じた外力の大きさは決して大きくはないが、誘発された運動の変化に伴った外力を感じる傾向にあったと判断した。

また、被験者が回答した力覚量についての分散分析ではグループによる主効果 [F(2, 27) = 4.756, $p = 0.017$] と、三要因の相互作用 [F(8, 108) = 2.178, $p = 0.035$] が確認された (図 4)。また、各グループでの経路×セッション回数の単純交互作用の多重比較では、nPE において単純交互作用 [F(4, 108) = 2.448, $p = 0.040$] が確認された。したがって各グループ

表 1 第 1 セッションと第 5 セッションでの平均速度の比較。数値は V_1 , V_2 , RV の平均値を表し、 V_1 と V_2 の単位は mm/s である。また括弧内の数値は標準誤差を表す。

(A : 狭まる経路, B : 拡がる経路)

A		V1	V2	RV
PE	session1	123 (14)	103 (11)	-0.249 (0.102)
	session5	138 (13)	104 (14)	-0.493 (0.126)
nPE	session1	130 (11)	113 (11)	-0.233 (0.117)
	session5	144 (13)	144 (16)	-0.014 (0.150)
CON	session1	150 (23)	139 (26)	-0.200 (0.092)
	session5	169 (30)	167 (47)	-0.215 (0.150)

B		V1	V2	RV
PE	session1	180 (15)	204 (22)	0.153 (0.108)
	session5	155 (13)	175 (17)	0.159 (0.090)
nPE	session1	192 (22)	237 (34)	0.270 (0.152)
	session5	173 (15)	190 (29)	-0.170 (0.134)
CON	session1	167 (26)	206 (32)	0.287 (0.119)
	session5	169 (30)	219 (34)	0.403 (0.070)

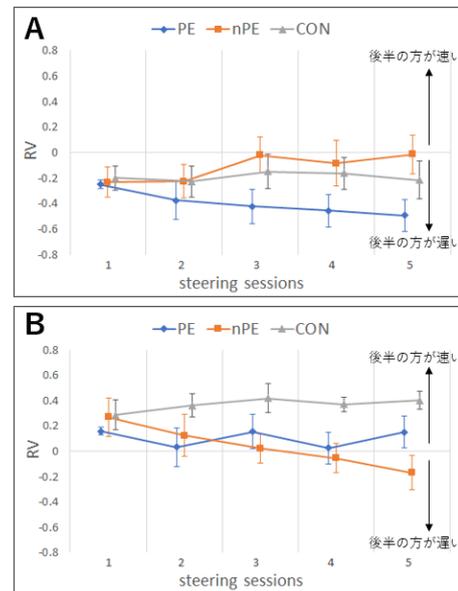


図 3 被験者の運動速度の対数比 (RV) の変化。(A : 狭まる経路, B : 拡がる経路)。各点は RV の平均値を表し、エラーバーは標準誤差を表す。

プ×経路条件の 6 条件でセッション回数による単純・単純主効果の検定を行った。その結果、「PE×狭まる経路」でのみセッション回数による単純・単純主効果 [F(4, 216) = 3.164, $p = 0.015$] が確認された。多重比較の結果、第 1-第 4 セッション間 [$p = 0.003$] と第 1-第 5 セッション間 [$p = 0.003$] に有意差が確認された (図 4-A)。「nPE×狭まる経路」 [F(4, 216) = 1.687, $p = 0.154$] や「nPE×拡がる経路」 [F(4, 216) = 1.696, $p = 0.152$] においてもセッションを重ねるにつれて感じる力覚が変化する傾向が見られたが、有意な差ではなかった。その他の 3 条件では実質的な変化は起きなかった ($p > 0.50$)。

さらに正規化された値について分散分析を行ったところ、グループと経路条件間の交互作用のみが確認された [F(2, 27) = 4.668, $p = 0.018$]。また単純主効果の分析では、狭

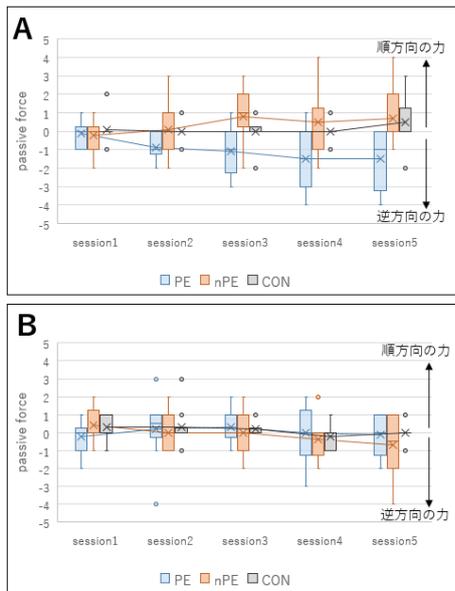


図4 タスク中に被験者が感じた外力の推移。(A: 狭まる経路, B: 拡がる経路). ×は被験者が回答したスコアの平均値を表す。

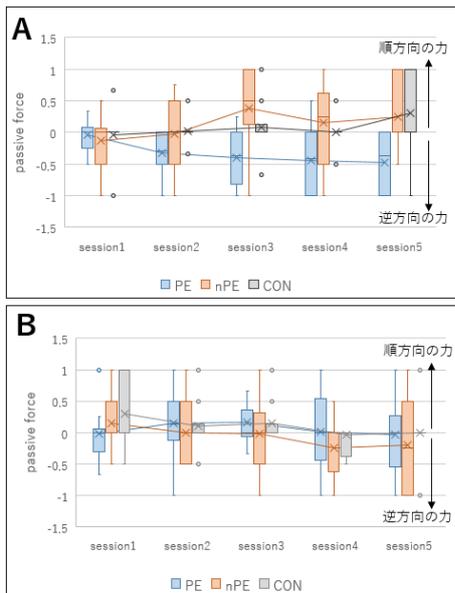


図5 各被験者が回答した数値の最大絶対値で正規化した外力の推移。(A: 狭まる経路, B: 拡がる経路). ×は平均値を表す。

まる経路でのグループによる主効果 $[F(1, 54) = 6.504, p = 0.003]$ と PE グループにおける経路による主効果 $[F(1, 27) = 8.219, p = 0.008]$ が確認された。狭まる経路におけるグループの単純主効果についての多重比較の結果, PE-nPE 間 ($p < 0.002$) と PE-CON 間 ($p < 0.005$) に有意差が確認された。また, 正規化する前と同様に, セッション回数による単純・単純主効果を調べたところ, 「PE×狭まる経路」 $[F(4, 216) = 1.640, p = 0.165]$, 「nPE×狭まる経路」 $[F(4, 216) = 2.141, p = 0.077]$, 「nPE×拡がる経路」 $[F(4, 216) = 1.366, p = 0.247]$ では被験者が感じる力覚量に変化する傾向が見られたが, 有意な差ではなかった。

6. 考察

6.1 運動速度の変化についての考察

実験の結果, 観察回数が増えるにつれてマウス操作の運動速度が変化することが確認された。nPE グループの被験者の運動は観察した運動に近づくように変化し, PE グループの被験者の運動は観察した運動から離れるように変化した。この結果は Ikegami らの研究結果[11]を支持しており, 背景の経路条件から得られた予測と実際に観察した運動に差があるか否かが運動の変化に影響したと考える。ただし, 生じた運動の変化は各条件によってばらつきがあることが確認された。例えば, 「PE×拡がる経路」では予想と反して加速する方向への運動の変化が確認されなかった。その理由として, 拡がる経路条件が「Path2 で加速するはず (減速しないはず)」という予測を与える要因として不十分で, 被験者間で予測誤差が生じるか否かに差が生じたことが要因であると考えられる。経路が広がったからといって必ず加速するとは限らず, 操作者の意思で等速のまま動かすことも減速させることも容易であるため, 経路が拡がれば加速するという予測は働きにかかったと推察する。逆に狭まる経路では加速する運動を再現するのは難しく, 「Path2 で加速しないはず」という予測が十分に働いたために, 「PE×狭まる経路」では減速方向の運動伝染が誘発されたと推察する。

また, nPE グループでは双方の経路条件で観察する運動に近づく変化が確認されたが, 狭まる経路では広がる経路に比べて変化が小さかった。この理由としては, 狭まる経路で加速することの難しさが影響したのではないかと考える。ステアリングの法則に従えば, 通過する経路幅が狭いほど通過する難易度が上昇し, 通過する速度は抑制される。したがって, 狭い経路内で速くなる方向の変化が生じた「nPE×狭まる経路」では, 被験者は速く運動することに難しさを感じ, 自ら速度を抑制していた可能性が考えられる。以上から, 実験条件によってばらつきは認められるものの, 被験者の運動が, 他者の運動の観察によって変化することが確認され, 本実験環境において運動伝染が生じたと考察できる。特に, 減速する方向に変化した「PE×狭まる経路」と「nPE×拡がる経路」では運動の変化が顕著であった。

6.2 主観的な外力知覚についての考察

観察による運動の変化が見られた「PE×狭まる経路」, 「nPE×狭まる経路」, 「nPE×拡がる経路」の3条件に注目すると, 生じた運動の変化と同じ方向に外力を感じる傾向が確認された。この結果は運動伝染によって生じた無意識的な実運動の速度変化を被験者が外力として解釈したことを示唆する。このことから, 視-力覚間衝突が生じない状況であっても, 視覚的運動結果と予測との差を認知することで外力の錯覚が生じ得るといえる。

また, nPE グループでは運動速度の変化に対して知覚される外力の増加量が小さい傾向にあった。その理由として

は、運動の変化に対する視覚的な慣れが影響した可能性がある。Honda らの研究では学習によって運動結果を予測しやすくなると疑似的な外力を感じにくくなることが示唆されている[10]。本研究においてもこれと似た影響が生じたと考察できる。すなわち、観察した運動に近づくように運動が変化した nPE グループでは、生じた加減速について視覚的に慣れていたことで変化を認識しにくい状況であったと推察する。逆に、観察した運動から遠くなるように運動が変化した「PE×狭まる経路」では、変化を認識しやすく強い力覚を感じたと推察する。

7. 制約と課題

本実験では、他者の運動の観察によって被験者の運動が変化することとそれに伴って被験者が疑似的な外力覚を感じる傾向にあることが確認されたが、観察による被験者の運動の変化は条件間でばらつきがあった。その要因については前章で考察を述べたが、今後は考察をもとに更なる検証を行い、観察する条件によってどのような運動伝染が生じるかを事前に確認した上で、運動伝染がどのような疑似的な外力覚を生み出すのかを詳細に明らかにする必要があると考える。また、外力知覚の主観評価は被験者毎のばらつきが大きく、観察による評価への影響は全体としてそれほど大きなものではなかった。加えて本実験では実験設計の都合上、本研究の手法による外力の知覚量を実力覚や従来手法と比較することができなかった。したがって、本実験環境で被験者が感じた外力の知覚量が具体的にどの程度のものであったかについては実力覚や従来手法と比較できる実験を設計し、今後明らかにする必要がある。

また、本実験で被験者が回答した主観評価の数値が全体的に低かった要因の1つとして、入力デバイスとして一般的なマウスを用いたために、実際は外力が加えられていないことを被験者が経験的に理解していたことが認知バイアスとして強く働いた可能性が考えられる。その他にも、外力の錯覚には操作対象の見た目や実行する運動の様相、過去の経験に基づいた先入観、質感を表象させるようなメタファーの存在など様々な要因が関与すると考えられる。したがって、今後はデバイスの物理的特性や、操作対象の見た目などが結果にどのような影響を及ぼすかを解明し、Pseudo-haptics を利用したインタフェースの設計に本研究の知見をどのように展開できるかを検証したい。

8. 議論

前章で述べたように、本研究の実験設計や得られた分析結果には今後解決しなければならない課題が少なからず存在する。しかし、本研究での取り組みは、運動予測を変調することによる新たな疑似的な外力の提示手法を発見したことに加え、Pseudo-haptics の生起要因の解明につながる内容であると言える。本章では、Pseudo-haptics の生起に対す

る本研究で得られた知見と今後の展開について議論する。

本研究では、視-力覚間衝突が生じない状況においても運動伝染を用いて運動予測と運動結果とに不一致を生じさせることによって疑似的な外力を提示できる可能性が示唆された。Pseudo-haptics を視-力覚間衝突によって生じる力覚の変調と定義するならば、本研究の運動予測の変調によって生じた疑似的な外力は厳密にはその定義からは外れる。しかし、従来の視覚情報を変調することで生じた Pseudo-haptics においても外力として解釈される上では本研究と同様に運動予測と運動結果との差の認知が重要な要因となっていると考えられる。すなわち、本研究の結果から考察すると、Pseudo-haptics による外力の錯覚は、視-力覚間衝突によって力覚情報が変容された際に、その運動結果が予測した運動と異なると認識することによって生じる現象であると考えられる。また、予測と異なると認知されなかった場合は、随意運動の結果として解釈され、空間知覚の錯覚[18][30]などが生じると考えられる。

運動予測と運動結果との一致性の認知は Sense of Agency の重要な生起要因であるので、本研究の結果は Sense of Agency と疑似的な外力知覚は相対的な関係にあることを示唆している。具体的には、Sense of Agency が感じられにくくなるのが疑似的な外力知覚の要因となり、外力を錯覚する上で視-力覚間衝突が必須条件ではない可能性が実験から確認された。この結果は、スポーツやリハビリテーションなどで注目されるアクチュエータや VR による運動支援技術[12][23]を、運動精度の向上させる目的で使用する場合に注意が必要となる可能性を示唆している。なぜなら、これらの技術によって支援された運動に Sense of Agency を獲得した後に、運動支援を解除されると、運動予測と運動結果との対応関係が変わり、その差を疑似的な外力をとして解釈する可能性があるためである。特に精度が求められる運動の上達には、運動予測と運動結果の対応関係を正確に認知し Sense of Agency を高めることが重要となる。したがって運動精度の向上させる運動支援技術をデザインする上では、支援している時としていない時で運動予測と運動結果との一致性をどのように維持するかが重要な課題となると予想される。こうしたデザインに本研究の知見が具体的にどう活かせるかを示すためには更なる検証を行う必要があるが、本研究で行った運動予測の変調のようにユーザの予測を上手く制御することが重要な意味を持つと考えられる。今後はさらなる調査を行うことで、運動精度を向上させる運動支援技術に本研究の知見を応用したい。

9. 結論

本研究では、視-力覚間衝突によって生じる錯覚現象として知られる Pseudo-haptics が外力として解釈される条件は運動予測と運動結果の差を認知することであるという仮説の検証を試みた。その方法として、運動伝染によって生

じた運動予測と運動結果との差が外力として解釈されるかを調査した。実験では、マウス操作によるステアリングタスクにおいて、他者の運動の観察によって生じた運動伝染が被験者の運動及び Pseudo-haptics の解釈に与えた影響を調査した。その結果、観察回数が増えるにつれて、マウスの運動速度が変化することが確認された。また、その変化は観察する運動が予測通りか否かによって方向が異なることが確認された。さらに、その運動速度の変化と同じ方向の外力を被験者が感じる傾向にあることが確認された。これらの結果から、視-力覚間衝突が生じない状況であっても、運動予測と運動結果との差が外力として知覚されることが示唆された。ゆえに Pseudo-haptics についても、運動予測と運動結果との差を認知することが外力の錯覚が起きる重要な要因であると結論付けた。

謝辞 実験にご協力頂いた皆様に、謹んで感謝の意を表す。本研究は JST, CREST, JPMJCR17A3 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Accot, J. and S. Zhai. Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In Proc. of CHI '97, 1997, 295–302.
- [2] Accot, J. and S. Zhai. Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law. In Proc. of CHI '99, 1999, 466–472.
- [3] Argelaguet, F., D. A. G. Jáuregui, M. Marchal, and A. Lécuyer. Elastic images: Perceiving local elasticity of images through a novel pseudo-haptic deformation effect. ACM Transactions on Applied Perception, Association for Computing Machinery, 2013, vol. 10, no. 3, 17:1–17:14.
- [4] Ban, Y., T. Kajinami, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. IEEE Haptics Symposium 2012, 211–216.
- [5] Blakemore, S. J., and C. Frith. The role of motor contagion in the prediction of action. *Neuropsychologia*. 2005; 43(2):260-7.
- [6] Bouquet, C. A., V. Gaurier, T. Shipley, L. Toussaint, and Y. Blandin. Influence of the perception of biological or non-biological motion on movement execution. *Journal of Sports Sciences*, 2007, 25, 519–530.
- [7] Bouquet, C. A., T. Shipley, R. L. Capa, P. J. Marshall. Goal-Directed Actions Are More Contagious than Non-Goal-Directed Actions. *Journal of Experimental Psychology*, 2011, Vol. 58 (1), 71–78.
- [8] Fitts, P. M.. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 1954, Vol. 47 (6), 381–391.
- [9] Gallagher, S.. Philosophical conceptions of the self. Implications for cognitive science. *Trends in Cognitive Science*, 2000, 4, 14–21.
- [10] Honda, T., N. Hagura, and H. Imamizu. Imposed visual feedback delay of an action changes mass perception based on the sensory prediction error. *Frontiers in Consciousness Research*, October 2013, Vol. 4, 760.
- [11] Ikegami, T., G. Ganesh, T. Takeuchi, H. Nakamoto. Prediction error induced motor contagions in human behaviors. *eLife* 2018; 7: e33392.
- [12] Jansen, O., T. A. Schildhauer, R. C. Meindl, M. Tegenthoff, P. Schwenkreis, M. S. Kaiser, D. Grasmücke, C. Fisahn, M. Aach. Functional Outcome of Neurologic-Controlled HAL-Exoskeletal Neurorehabilitation in Chronic Spinal Cord Injury: A Pilot With One Year Treatment and Variable Treatment Frequency. *Global Spine Journal*, 2017, Volume 7, Issue 8, 735-743.
- [13] Kilner, J. M., Y. Paulignan, and S. J. Blakemore. An interference effect of observed biological movement on action. *Current Biology*, 2003, 13, 522–525.
- [14] Kulikov, S., I. S. MacKenzie, and W. Stuerzlinger. Measuring the effective parameters of steering motions. In *Extended Abstracts of CHI '05*, 2005, 1569–1572.
- [15] Lécuyer, A.. Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2009.vol. 18, 39–53.
- [16] Lécuyer, A., J. M. Burkhardt, S. Coquillard, and P. Coiffet. “Boundary of illusion”: an experiment of sensory integration with a pseudo-haptic system. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2001*.
- [17] Lécuyer, A., J. M. Burkhardt, and L. Etienne. Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures. In *Proc. of CHI '04*, 2004, vol. 6, 239–246.
- [18] Matsumoto, K., Y. Ban, T. Narumi, Y. Yanase, T. Tanikawa and M. Hirose. Unlimited Corridor: Redirected Walking Techniques Using Visuo-Haptic Interaction, In *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, 2016, 20. ACM.
- [19] Saito, H. and K. Fukuchi. The Effect of Predictability of Visual Motion from Motor Commands on the Recognition Process of Self-Attribution. In *Extended Abstracts of CHI '18*, 2018, Paper No. LBW124.
- [20] Senanayake, R. and R. S. Goonetilleke. Pointing device performance in steering tasks. *Perceptual and Motor Skills*, 2016, 122 (3), 886–910.
- [21] Tsakiris, M., P. Haggard N. Franck, N. Mainy, and A. A. Sirigu. Specific role for efferent information in self-recognition. *Cognition*, 2005, Vol. 96, 3, 215–231.
- [22] Tsakiris, M., S. Schütz-Bosbach, and S. Gallagher. On agency and body-ownership. *Phenomenological and neurocognitive reflections*. *Consciousness and Cognition*, 2007, 16, 645–660.
- [23] Wang, K., D. Iwai, and K. Sato. Supporting Trembling Hand Typing Using Optical See-Through Mixed Reality. *IEEE Transactions and Content Mining*, 2017, 5, 10700-10708.
- [24] Watanabe, J.. Pseudo-haptic Sensation Elicited by Background Visual. *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, 2013, vol. 1, no. 2, 199–202.
- [25] Watanabe, K. and M. Yasumura. VisualHaptics: generating haptic sensation using only visual cues. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, 2008, vol. 246, 405.
- [26] Wolpert, D. M., Z. Ghahramani, and M. I. Jordan. An Internal for sensorimotor integration. *Science*, 1995, 269, 1880-1882.
- [27] Yamanaka, S., W. Stuerzlinger, and H. Miyashita. Steering Through Sequential Linear Path Segments. In *Proc. of CHI '17*, 2017, 232-243.
- [28] 齊藤寛人, 福地健太郎. 視覚的運動の予測可能性が自己帰属感の生起過程に及ぼす影響の調査. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 2018, 20 巻 3 号 301-310.
- [29] 齊藤寛人, 福地健太郎. 能動的回転操作における自己帰属感の生起過程の分析. *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 2017, 22 巻 1 号 81-90.
- [30] 鳴海 拓志. Pseudo-haptics 応用インタフェースの展望 — 疑似触力覚提示からその先へ. *システム/制御/情報*, 2017, 61 巻 11 号 463-468.
- [31] 渡邊 淳司. Haptic Design における Pseudo-haptics 技術の役割および表現分野での事例紹介. *システム/制御/情報*, 2017, 61 巻 11 号 459-462.