情報処理学会論文誌 Vol.59 No.11 2004–2012 (Nov. 2018)

衣服牽引による視聴覚コンテンツ体験の向上

大石 恵利佳[1,a)] 高下 昌裕[1] 中村 拓人[1,2] 梶本 裕之[1]

受付日 2018年1月30日, 採録日 2018年9月7日

概要：ゲームや映画などの視聴覚コンテンツにおいて，コンテンツの臨場感を高めるためにマルチモーダルな感覚を提示することは重要であるが，装置が大型化しやすいなどの問題があった．そこで我々は，4つのモータと糸を用いたコンパクトな装置で衣服を身体前後方向へ牽引することで身体へ皮膚感覚・深部感覚の2つの感覚を提示し，簡易的かつ効果的に自己運動感覚を向上させる手法を提案した．また，移動をともなうコンテンツのどの移動成分に合わせて牽引力を提示するべきかについて検討し，速度成分に合わせた牽引が最も良い結果となった．

キーワード：力覚，触覚，衣服牽引，自己運動感覚

Improvement in Audio-visual Content Experience by Pulling Clothes

Erika Oishi[1,a)] Masahiro Koge[1] Takuto Nakamura[1,2] Hiroyuki Kajimoto[1]

Received: January 30, 2018, Accepted: September 7, 2018

Abstract: The realism of audiovisual media with self-motion, such as racing games and movies, is enhanced by the sensation of bodily motion. In various studies, this sensation is presented by actually moving the user's body in accordance with the audiovisual motion. However, such devices tend to be bulky, and compact devices can only simulate one sensation. Here, we proposed a simple and effective system for simulating self-motion. The compact system uses four DC motors and string to pull the user's clothes both forward and backward and thus elicit both skin sensation and deep sensation. We investigated whether users perceived the presented sensation as acceleration or velocity by Scheffe's method of paired comparisons, and found that the immersion was improved by pulling clothes in accordance with velocity.

Keywords: haptic, tactile, pulling clothes, self-motion

1. はじめに

ゲームや映画などの視聴覚コンテンツにおいて，コンテンツの臨場感を高めるためにマルチモーダルな感覚を提示することは重要である．特にレースゲームなどのゲーム内の空間における移動をともなうコンテンツにおいては自身の動きに関する総合的な感覚である「自己運動感覚」が臨場感の鍵となると考えられる．乗り物に乗って移動をする際に提示される自己運動感覚の要素としては，加減速や身体の傾きによって生じる前庭感覚，身体質量の慣性によって生じる深部感覚，風が全身に吹き付けることによって生じる皮膚感覚などがあげられる．これまでに，これらの感覚を映像に合わせて提示することでコンテンツの臨場感を向上させる試みは数多く行われてきたが，装置が大がかりになってしまうという問題が存在した．また小型のものでも上記の感覚のうち1つの感覚のみを提示することが多かった．

そこで我々は簡易的かつ効果的に自己運動感覚を向上させることを目的として，4つのモータと糸を用いたコンパクトな装置で衣服を前後方向や回転方向に牽引することで身体へ皮膚感覚・深部感覚の2つの感覚を提示する手法を提案する．レースゲームの状況を考えると，加速にともなって身体は後方に引かれ，風が吹き付けることで衣服が身体と擦れるため，深部感覚と皮膚感覚がともに生じることが分かる．このことから衣服を後方に牽引することで牽

1 電気通信大学
The University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182–8585, Japan
2 学術振興会特別研究員
JSPS Research Fellow
a) oishi@kaji-lab.jp

© 2018 Information Processing Society of Japan

引力による深部感覚および衣擦れによる皮膚感覚を提示し，自己運動感覚を向上させることができる可能性があると考えられる．さらに本稿ではその効果を評価検証していないが，本手法では衣服を媒体とすることで，深部感覚だけでなく，衣服が肌と擦れることによって生じる皮膚感覚も広範囲へ提示することが可能となっている．

本稿においては，まず基礎的な検証として，本手法によって牽引力を提示した際の感覚が，どのような運動として解釈されるかについて検証を行った．

2. 関連研究

視覚刺激や聴覚刺激のみで自己運動感覚を向上させる例として，ユーザにベクションを生じさせる取り組みが数多く存在する [1], [2], [3], [4]．しかしベクションを用いた手法は前庭感覚や深部感覚を刺激していないため，視覚と身体感覚に矛盾が生じてしまい映像酔いなどの現象が生じることがある．

前庭感覚や深部感覚，皮膚感覚を提示する研究の例として，モーションプラットフォームを用いて自己運動感覚を向上させる取り組みが行われている [5], [6], [7]．しかしモーションプラットフォームはユーザ自身を大きな機構によって駆動する形態をとるため大がかりな装置となってしまう．

皮膚感覚を刺激する例として，振動子などを用いた取り外し可能な装置を用いることによって，振動感覚や触覚の流れ場を提示し自己運動感覚を向上させる取り組みが行われている [8], [9], [10]．しかし振動による皮膚感覚では身体が動かされるような深部感覚を提示することは難しく，また提示可能範囲も局所的である．これに対して，全身に振動を提示することが可能なスーツ型の振動提示デバイスが存在する [11], [12]．スーツ型デバイスでは広範囲を刺激することが可能であるため没入感は高くなるが，やはり振動のみでは身体が動かされるような感覚を提示することは難しい．

皮膚感覚の中でも身体に風が吹き付けるような感覚を提示する例としては，送風機を利用することで風を提示し自己運動感覚を向上させる取り組みが行われている [13], [14], [15]．しかし提示範囲に応じて巨大な送風機が必要となり，結果として大がかりな装置になってしまいがちである．

前庭感覚に限定してコンパクトな装置で提示する手法として，前庭器官を電気刺激することによって自己運動感覚を提示する手法が存在する [16], [17]．しかし前庭電気刺激は安全性の観点から 1 日の合計刺激時間や持続刺激時間に制限があり，現時点では普及のハードルは高いといえる．また，全身に電気刺激を行うことで深部感覚を刺激する Teslasuit が存在する [18]．しかしながら，これもまた同様に一般的に普及させるには安全面などの課題がまだ残っているといえる．

簡易的な装置で深部感覚を刺激する例として，ユーザの身体各所を力覚提示装置で刺激する試みがいくつか行われている [19], [20], [21]．身体の広範囲に深部感覚を提示することによって，自己運動感覚を向上させることが可能となる．しかしながら，これらの手法において深部感覚は提示されているものの，皮膚表面への刺激は提示されていない．

本研究では，我々が普段身に着けている衣服を糸で牽引することによって皮膚せん断変形と身体が牽引される擬似的な力覚の両方を提示し，簡易的に自己運動感覚を向上させる手法を提案する．自己運動感覚を向上させるために前庭感覚や深部感覚を刺激すると装置が大がかりになりがちであるが，本手法では衣服牽引を用いて低コストに皮膚感覚と深部感覚の両方を提示することが可能である．

本研究と同様な研究として，包帯と包帯を牽引する人間を用いてユーザの身体を牽引する低コストなモーションプラットフォームが存在する [22]．しかしながら包帯を牽引するためのオペレータが必要であるため，簡易的なシステムであるとはいい難い．

そこで本装置では牽引する人間の代わりにモータを用いて糸を牽引する．糸で牽引することで身体を動かす代表的な研究としては SPIDAR シリーズが存在する [23]．SPIDAR シリーズでは設置した装置によって指先に触覚提示を行うもの以外に，ウエアラブルタイプ [24]，ポータブルデバイスタイプ，全身運動教示のための力覚提示 [25] などが行われている．本研究はワイヤによる簡便な牽引を行う点では SPIDAR シリーズを援用したものといえるが，本稿で示すように自己運動感覚の生起に用いること，および着座時という状況に際して肩越しに提示するという提示手法を見出している点で新規な手法といえる．

3. 衣服牽引装置

3.1 デバイス構成

本装置（**図 1**）はギアヘッド付きモータ（Maxon 社製，RE 25 φ25 mm，10 W，GP 26 B φ26 mm，ギア比 19 : 1），ボビン，ケブラー糸，糸を衣服に取り付けるためのクリップ，マイクロコントローラ（NXP 社製，mbed NXP LPC1768）が入った木箱，フレームと背もたれ付きの椅子から構成される．今回椅子は通常の事務用椅子を用いたが，背もたれが付いているものであれば，たとえばパイプ椅子などでも同様の感覚を得られることを確認している．

本装置ではボビンを取り付けた 4 つのモータを用いて糸を巻き取ることで，衣服を前後に牽引する．**図 2** のように，ユーザの肩部に糸を取り付けたクリップを装着する．各モータはマイクロコントローラによって電流制御されており，最大牽引力は約 100 N である．

身体にかかる力は，衣服を牽引した力が衣服と皮膚間の摩擦力によって皮膚に伝わって生じている．このとき，衣服は糸と身体の間のバネと見なせるので，衣服自体の重さ

© 2018 Information Processing Society of Japan

図 1　衣服牽引装置
Fig. 1　The pulling-clothes system.

図 2　クリップの取り付け方
Fig. 2　Method of attaching clips to the user.

を無視できるなら，牽引力と身体にかかる力は等しくなる．ただし身体にかかる力の分布に関しては，個々人の体格や布の素材に依存している可能性はある．たとえば柔軟な布素材の場合は牽引によって布の広い面積が変形し，広い範囲に触覚を伝えることになるため，慣性力のような全体的に生じる力として解釈される可能性がある．これに対して硬い布素材の場合には牽引による変形が少ない分，触覚の伝わる範囲が狭くなり，ベルトのような外的な要因によって牽引されていると解釈しやすくなる可能性がある．なお今回，牽引する糸の変位で統制すると牽引力は衣服のバネ定数に依存することになり違いが出る可能性があることから特に電流制御を行った．

また身体を牽引する際に，身体にかかる力が衣服に依存しないようにするため，着用している衣服の上から用意した衣服を着用してもらい，その衣服を牽引するようにした．着脱の簡易さや広範囲への感覚提示を考え，市販の長袖のパーカを 3 サイズ用意した．

3.2　提示可能感覚

本装置では，1 方向に強く牽引することによって生じる牽引力（**図 3**，左図），モータを振動させることによって生じる振動（図 3，中央図）と対角線上のモータで牽引することによって生じるトルク（図 3，右図）の 3 種類の感覚が提示可能であり，これらは同時に提示することも可能である．牽引力およびトルクは深部感覚，振動は皮膚感覚を生起するが，牽引した際には衣服が肌の上を移動し擦れることによる皮膚感覚も同時に提示される．

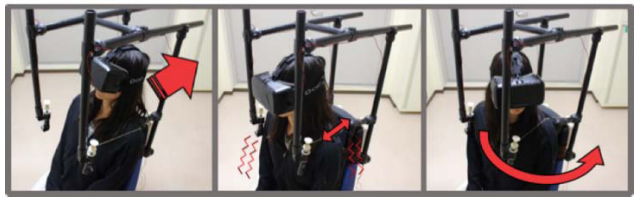

図 3　提示可能な感覚（左図：牽引力，中央図：振動，右図：トルク）
Fig. 3　Sensation induced by our system (left: pressure; center: vibration; right: torque).

4.　実験：一対比較法を用いた移動感覚の検証

4.1　目的

本研究では視覚的移動をともなうコンテンツにおいて，乗り物が加速する際の慣性力として身体に牽引力を提示することによってユーザの自己運動感覚を向上させることを目的としている．本来慣性力は加速度に合わせて我々の身体に提示されているが，バーチャル空間においても実世界と同様に慣性力を提示することで自己運動感覚が向上するかは定かではない．そこで本実験では，前後に衣服牽引が可能な装置を用いて視界の移動に合わせて牽引力を提示し，どのような移動成分に合わせて牽引力を提示するべきなのかについて検討した．今回は牽引力の各条件どうしを比較し評価するために，一対比較法を用いて実験を行った．なかでも，各条件の順位および差の程度を調べることができ，順序効果も考慮されるシェッフェの一対比較法（浦の変法）を用いた [26], [27].

4.2　環境

本装置は身体に慣性力などを感じるような移動をともなうコンテンツにおいて利用することを想定しており，そのようなコンテンツ内では，ユーザは乗り物に乗っている状況が多い．乗り物が直線状に移動する際の代表的な動きとして，車のように前進をする動きと，ブランコのように前後に揺れる動きがあげられる．そこで今回は以下のような動きの異なる視覚刺激を 2 条件用意した．1 つは，時刻 t における変位を式 (1) のように正弦波状に前後に移動するものである（視覚刺激 VA）．この場合，速度は式 (2)，加速度は式 (3) で与えられる．この状況は主観的体験としては「ブランコ」のような往復運動としてイメージされる．もう 1 つは，時刻 t における変位を式 (4) のように前進とストップを繰り返すものである（視覚刺激 VB）．この場合，後進はしないため速度は式 (5) のようにオフセットの

© 2018 Information Processing Society of Japan

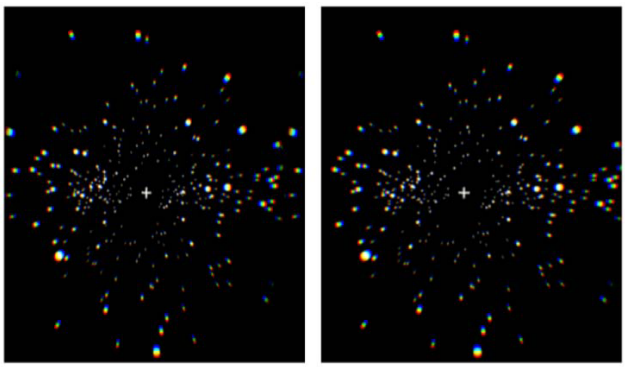

図 4　視覚刺激（左図：左目映像，右図：右目映像）
Fig. 4　Visual stimulus (left: view of left eye, right: view of right eye).

加わった正弦波となり，加速度は式 (6) のように正弦波となる．この状況は主観的体験としては「自動車」のような時々止まる全身運動としてイメージされる．なおどちらの視覚刺激においても周波数は 0.1 Hz とした．本実験で用いる視覚刺激はゲームエンジン Unity（Unity Technologies 社，http://japan.unity3d.com/）によってレンダリングし，HMD（Oculus VR 社，Oculus Rift Development Kit 2，解像度 1,920 × 1,080（片目 960 × 1,080），水平画角 90°，対角画角 110°）で提示した（**図 4**）．また，視覚刺激の中心には注視させるために十字の指標を提示した．

$$x = A\sin(2\pi ft - 1/2\pi) \tag{1}$$

$$v = 2\pi fA\sin(2\pi ft) \tag{2}$$

$$a = 4\pi^2 f^2 A\sin(2\pi ft + 1/2\pi) \tag{3}$$

$$x = A(t + \sin(2\pi ft - \pi)) \tag{4}$$

$$v = A(1 + 2\pi f\sin(2\pi ft - 1/2\pi)) \tag{5}$$

$$a = 4\pi^2 f^2 A\sin(2\pi ft) \tag{6}$$

牽引力は，視覚刺激の加速度に合わせた牽引力（牽引力 HA+），HA+ の逆向き（牽引力 HA−），視覚刺激の速度に合わせた牽引力（牽引力 HV+），HV+ の逆向き（牽引力 HV−）の 4 条件を用意した．視覚刺激 VA における牽引力を**図 5** に，視覚刺激 VB における牽引力を**図 6** に示す．グラフにおける正の数値は前方のモータ 2 つを駆動させ身体を前方に牽引することを意味し，負の数値は後方のモータ 2 つを駆動させ身体を後方に牽引することを意味する．今回は最大約 100 N の力で牽引した．また，正弦波の周波数は 0.1 Hz とした．

シェッフェの一対比較法（浦の変法）では，用意した条件の中から 2 条件ずつの組合せを用意し，その組合せおよび順序が逆の組合せに関して，被験者に評価してもらう．今回は牽引力を 4 条件用意したため，**表 1** のように計 12 組の組合せを作成した．

各組合せにおいて先に提示された条件を A，後に提示された条件を B とした際，以下の尺度を用いて 7 段階で評価

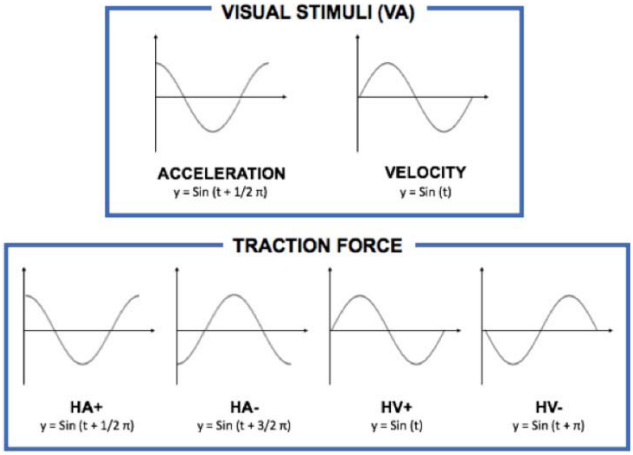

図 5　視覚刺激 VA における牽引力
Fig. 5　Traction force in the VA condition.

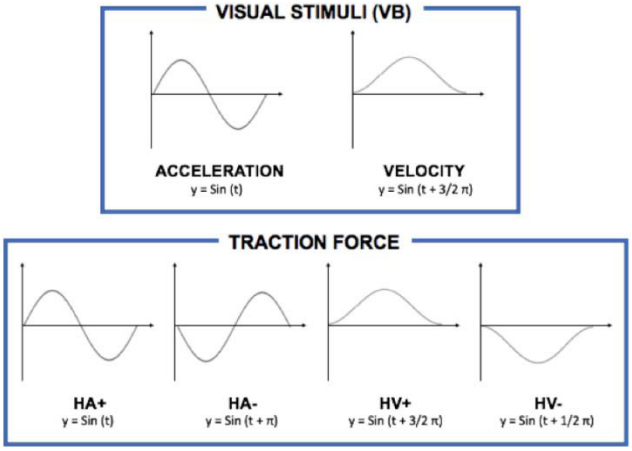

図 6　視覚刺激 VB における牽引力
Fig. 6　Traction force in the VB condition.

表 1　牽引力の組合せ
Table 1　Combination of traction force.

	先に提示する牽引力 A	後に提示する牽引力 B
1	牽引力 HA+	牽引力 HA-
2	牽引力 HA+	牽引力 HV+
3	牽引力 HA+	牽引力 HV-
4	牽引力 HA-	牽引力 HV+
5	牽引力 HA-	牽引力 HV-
6	牽引力 HV+	牽引力 HV-
7	牽引力 HA-	牽引力 HA+
8	牽引力 HV+	牽引力 HA+
9	牽引力 HV-	牽引力 HA+
10	牽引力 HV+	牽引力 HA-
11	牽引力 HV-	牽引力 HA-
12	牽引力 HV-	牽引力 HV+

© 2018 Information Processing Society of Japan

してもらった．

A より B の方が非常に強い	+3
A より B の方が強い	+2
A より B の方がやや強い	+1
A と B は同じぐらいの強さ	0
B より A の方がやや強い	−1
B より A の方が強い	−2
B より A の方が非常に強い	−3

その後，評価を条件ごとに分散分析し，また各条件の嗜好を同一の次元で値として表した平均嗜好度 α を求める．主効果に有意差があった場合，平均嗜好度の各条件間における差分を求め，信頼区間を調べた後，尺度図上に各条件の平均嗜好度を示す．信頼区間を求める際に使用するヤードスティック Y は，以下の式で算出する．

$$Y = q\sqrt{\frac{A}{2Nt}} \tag{7}$$

ここで q はステューデント化された範囲，A は分散分析表での誤差の不偏分散の値，t は条件数，N は被験者数を示す．

4.3 手段

被験者は，市販のパーカ，HMD とノイズキャンセリングヘッドホンを着用し，本装置を設置した椅子に着席した．実験中はモータの駆動音を遮蔽するため，ヘッドホンからホワイトノイズを提示した．まず牽引力 4 条件のうち 1 条件を視覚刺激 VA とともに 20 秒間提示した．その後，残りの牽引力 3 条件のうち 1 条件を同じ視覚刺激とともに提示し，被験者には速度感・加速度感・没入感・違和感の 4 項目を評価してもらった．その後，他の牽引力の組合せについても同様の手順を行った．各組合せの提示順序に関しては，ランダムに行った．また，視覚刺激 VB に関しては視覚刺激 VA と同様の手順を別日に行った．被験者は 22 から 25 歳の 5 名で，各組合せは 1 試行ずつ，それぞれの視覚刺激において計 12 試行を行った．

4.4 結果・考察

以下に，視覚刺激 VA・VB における没入感・違和感の結果を示す．速度感・加速度感に関しては，どちらの視覚刺激においても没入感の結果と類似したため割愛する．

(1) 没入感

まず，**表 2**，**表 3**，**図 7** にそれぞれ視覚刺激 VA における没入感の分散分析表，信頼区間，尺度図を示す．分散分析においては，主効果・順序効果に 1%水準で有意差が見られた．また平均嗜好度においては，牽引力 HA+・HV− 間に 1%水準で有意差が見られ，牽引力 HA+・HV+ 間に 5%水準で有意差が見られた．

結果として，速度に合わせて牽引力を提示すると没入感が高くなった．また，速度に合わせた牽引力において，牽引力 HV− の方が没入感は高いが，牽引力 HV+ と牽引力 HV− 間に有意差は見られなかった．このようになった原因の 1 つとして，個人によって力の解釈が異なった可能性があげられる．つまり，牽引力 HV+ が良いと感じた人は牽引力を他人から引っ張られる力と解釈し，牽引力 HV− が良いと感じた人は牽引力を慣性力として解釈したと考えられる．ただし，今回の実験では被験者の皮膚に直接触れる布の素材を統一することは行わなかったため，そもそも被験者の身体に入力された触覚刺激の性質が異なっていた可能性も考えられる．3.1 節で述べたように，柔らかい布であれば広く弱い触覚を生じることから慣性力として解釈

表 2 視覚刺激 VA における没入感の分散分析表
Table 2 ANOVA of immersion (visual stimulus VA).

	平方和	自由度	不偏分散	F
主効果	28.25	3	9.42	5.32**
主効果×個人	29.25	12	2.44	1.38
組み合わせ効果	2.45	3	0.82	0.46
順序効果	14.02	1	14.02	7.92**
順序×個人	5.57	4	1.39	0.79
誤差	65.47	37	1.77	
全体	145	60	2.42	

$F(1, 37; 0.01) = 7.373$, $F(3, 37; 0.01) = 4.360$
$F(4, 37; 0.01) = 3.873$, $F(12, 37; 0.01) = 2.707$
$F(1, 37; 0.05) = 4.105$, $F(3, 37; 0.05) = 2.859$
$F(4, 37; 0.05) = 2.626$, $F(12, 37; 0.05) = 2.025$
** : $p < 0.01$ * : $p < 0.05$

表 3 視覚刺激 VA における没入感の信頼区間
Table 3 Confidence interval of immersion (visual stimulus VA).

		95%区間			99%区間		
		$+Y_{0.05}$	$-Y_{0.05}$		$+Y_{0.01}$	$-Y_{0.01}$	
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HA-}$	= -0.35	0.46	-1.16	×	0.66	-1.36	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV+}$	= -0.93	-0.12	-1.73		0.08	-1.93	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV-}$	= -1.03	-0.22	-1.83		-0.02	-2.03	
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV+}$	= -0.58	0.23	-1.38	×	0.43	-1.58	×
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV-}$	= -0.68	0.13	-1.48	×	0.33	-1.68	×
$\alpha_{HV+} - \alpha_{HV-}$	= -0.10	0.71	-0.91	×	0.91	-1.11	×

$Y_{0.05}$ (5%水準のヤードスティック) = 0.81
$Y_{0.01}$ (1%水準のヤードスティック) = 1.01
× : 有意差なし

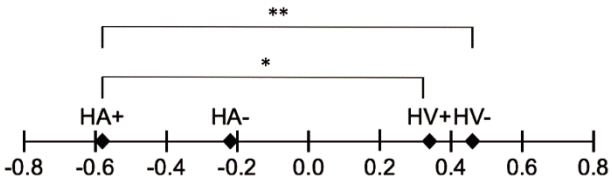

図 7 視覚刺激 VA における没入感の尺度図
Fig. 7 Scale of immersion (visual stimulus VA).

© 2018 Information Processing Society of Japan

表 4　視覚刺激 VB における没入感の分散分析表
Table 4　ANOVA of immersion (visual stimulus VB).

	平方和	自由度	不偏分散	F
主効果	21.10	3	7.03	6.28**
主効果×個人	47.90	12	3.99	3.56**
組み合わせ効果	2.70	3	0.90	0.80
順序効果	0.07	1	0.07	0.06
順序×個人	12.77	4	3.19	2.85*
誤差	41.47	37	1.12	
全体	126	60	2.10	

F(1, 37; 0.01) = 7.373,　F(3, 37; 0.01) = 4.360
F(4, 37; 0.01) = 3.873,　F(12, 37; 0.01) = 2.707
F(1, 37; 0.05) = 4.105,　F(3, 37; 0.05) = 2.859
F(4, 37; 0.05) = 2.626,　F(12, 37; 0.05) = 2.025
** : $p < 0.01$　　* : $p < 0.05$

表 5　視覚刺激 VB における没入感の信頼区間
Table 5　Confidence interval of immersion (visual stimulus VB).

	95%区間			99%区間		
	$+Y_{0.05}$	$-Y_{0.05}$		$+Y_{0.01}$	$-Y_{0.01}$	
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HA-} = -0.60$	0.04	-1.24	×	0.20	-1.40	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV+} = -0.70$	-0.06	-1.34		0.10	-1.50	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV-} = -1.00$	-0.36	-1.64		-0.20	-1.80	
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV+} = -0.10$	0.54	-0.74	×	0.70	-0.90	×
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV-} = -0.40$	0.24	-1.04	×	0.40	-1.20	×
$\alpha_{HV+} - \alpha_{HV-} = -0.30$	0.34	-0.94	×	0.50	-1.10	×

$Y_{0.05}$ (5%水準のヤードスティック) = 0.64
$Y_{0.01}$ (1%水準のヤードスティック) = 0.80
×：有意差なし

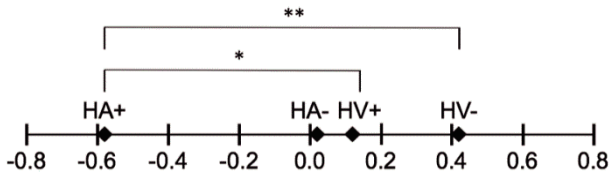

図 8　視覚刺激 VB における没入感の尺度図
Fig. 8　Scale of immersion (visual stimulus VB).

されやすく，硬い布であれば局所的な触覚を生じることから他人から引っ張られる力と解釈しやすかった可能性があるためである．また，順序効果において有意差が生じた．これに関してはある被験者から「試行を重ねるごとに，良いと感じる基準が毎回変化した」というコメントを実験後に得た．そのため，提示する牽引力の順序によって，結果が変化したと考えられる．

次に，**表 4**，**表 5**，**図 8** にそれぞれ視覚刺激 VB における没入感の分散分析表，信頼区間，尺度図を示す．分散分析においては，主効果・個人の主効果に 1%水準で有意差が見られ，個人の順序効果に 5%水準で有意差が見られた．また平均嗜好度においては，牽引力 HA+・HV− 間に

表 6　視覚刺激 VA における違和感の分散分析表
Table 6　ANOVA of incompatibility (visual stimulus VA).

	平方和	自由度	不偏分散	F
主効果	71.15	3	23.72	16.70**
主効果×個人	33.10	12	2.76	1.94
組み合わせ効果	3.05	3	1.02	0.72
順序効果	5.40	1	5.40	3.80
順序×個人	8.77	4	2.19	1.54
誤差	52.53	37	1.42	
全体	174	60	2.90	

F(1, 37; 0.01) = 7.373,　F(3, 37; 0.01) = 4.360
F(4, 37; 0.01) = 3.873,　F(12, 37; 0.01) = 2.707
F(1, 37; 0.05) = 4.105,　F(3, 37; 0.05) = 2.859
F(4, 37; 0.05) = 2.626,　F(12, 37; 0.05) = 2.025
** : $p < 0.01$　　* : $p < 0.05$

表 7　視覚刺激 VA における違和感の信頼区間
Table 7　Confidence interval of incompatibility (visual stimulus VA).

	95%区間			99%区間		
	$+Y_{0.05}$	$-Y_{0.05}$		$+Y_{0.01}$	$-Y_{0.01}$	
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HA-} = 0.13$	0.85	-0.60	×	1.03	-0.78	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV+} = 1.48$	2.19	0.75		2.38	0.57	
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV-} = 1.30$	2.02	0.58		2.20	0.40	
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV+} = 1.35$	2.07	0.63		2.25	0.45	
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV-} = 1.18$	1.90	0.45		2.08	0.27	
$\alpha_{HV+} - \alpha_{HV-} = -0.18$	0.55	-0.90	×	0.73	-1.08	×

$Y_{0.05}$ (5%水準のヤードスティック) = 0.72
$Y_{0.01}$ (1%水準のヤードスティック) = 0.90
×：有意差なし

1%水準で有意差が見られ，牽引力 HA+・HV+ 間に 5%水準で有意差が見られた．

速度に合わせて進行方向と逆向きに牽引する牽引力 HV− が最も没入感が高くなった．ただし，有意差が生じたのは牽引力 HA+ との間のみであった．これは個人によって好みが分かれたことが原因であると考えられる．個別に結果を見ると，実世界と同じように慣性力に合わせて牽引する牽引力 HA− と速度に合わせて進行方向と逆向きに牽引する牽引力 HV− を好む人，速度に合わせて進行方向と同じ向きに牽引する牽引力 HV+ と牽引力 HV− を好む人の 2 種類に分かれた．結果に個人差はあるものの，牽引力 HV− はほぼ全員に好まれることが分かった．また，順序効果において有意差が生じた原因は，先にも述べたように試行を重ねるごとに良いと感じる基準を毎回変化させる被験者がいたことが考えられる．

(2)　違和感

まず，**表 6**，**表 7**，**図 9** にそれぞれ視覚刺激 VA における違和感の分散分析表，信頼区間，尺度図を示す．分散分析においては，主効果に 1%水準で有意差が見られた．ま

© 2018 Information Processing Society of Japan

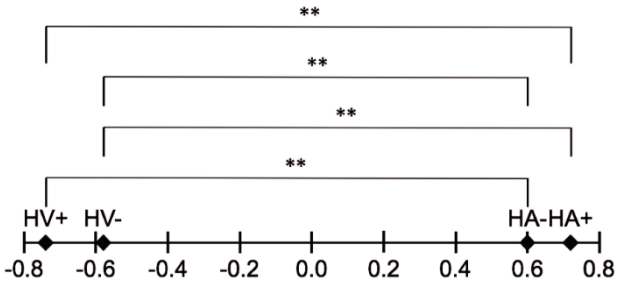

図 9　視覚刺激 VA における違和感の尺度図
Fig. 9　Scale of incompatibility (visual stimulus VA).

た平均嗜好度においては，牽引力 HA+・HV+ 間，牽引力 HA+・HV− 間，牽引力 HA−・HV+ 間，牽引力 HA−・HV− 間に 1%水準で有意差が見られた．

速度に合わせて提示する牽引力 HV+ と牽引力 HV− において，非常に違和感が少なくなった．また，牽引力 HV+ の方が違和感は少ないが，牽引力 HV+ と牽引力 HV− 間に有意差は見られなかった．これは先にも述べたように，個人によって力の解釈が異なったことや，前述のように被験者の身体に直接触れる布の素材の違いが影響した可能性が考えられる．

次に，**表 8**，**表 9**，**図 10** にそれぞれ視覚刺激 VB における違和感の分散分析表，信頼区間，尺度図を示す．分散分析においては，主効果・個人の主効果・順序効果に 1%水準で有意差が見られ，個人の順序効果に 5%水準で有意差が見られた．また平均嗜好度においては，牽引力 HA+・HV− 間に 1%水準で有意差が見られ，牽引力 HA+・HV+ 間に 5%水準で有意差が見られた．

速度に合わせて進行方向と逆向きに牽引する牽引力 HV− が最も違和感が低くなった．ただし，没入感の結果と同様に，有意差が生じたのは牽引力 HA+ との間のみであった．これもまた個人によって好みが分かれたことが原因であると考えられる．個別に結果を見ると，実世界と同じように慣性力に合わせて牽引する牽引力 HA− と速度に合わせて進行方向と逆向きに牽引する牽引力 HV− を好む人，速度に合わせて進行方向と同じ向きに牽引する牽引力 HV+ と牽引力 HV− を好む人の 2 種類に分かれた．結果に個人差はあるものの，違和感に関しても牽引力 HV− はほぼ全員に好まれることが分かった．また，順序効果において有意差が生じた原因は，先にも述べたように試行を重ねるごとに良いと感じる基準を毎回変化させる被験者がいたことが考えられる．

(3)　全体

全体的な平均嗜好度の傾向を見るため，**図 11**，**図 12** に各視覚刺激における各牽引力の平均嗜好度の平均値（各牽引力の速度感・加速度感・没入感・違和感の平均嗜好度を平均したもの）の尺度図を示す．ただし，違和感に関しては他の評価項目に対して評価軸が正負反対であるため，違和感の平均嗜好度は正負を反転して計算した．

表 8　視覚刺激 VB における違和感の分散分析表
Table 8　ANOVA of incompatibility (visual stimulus VB).

	平方和	自由度	不偏分散	F
主効果	18.65	3	6.22	6.29**
主効果×個人	61.60	12	5.13	5.19**
組み合わせ効果	0.25	3	0.08	0.08
順序効果	10.42	1	10.42	10.54**
順序×個人	11.50	4	2.88	2.91*
誤差	36.58	37	0.99	
全体	139	60	2.32	

$F(1, 37; 0.01) = 7.373$,　$F(3, 37; 0.01) = 4.360$
$F(4, 37; 0.01) = 3.873$,　$F(12, 37; 0.01) = 2.707$
$F(1, 37; 0.05) = 4.105$,　$F(3, 37; 0.05) = 2.859$
$F(4, 37; 0.05) = 2.626$,　$F(12, 37; 0.05) = 2.025$
** : $p < 0.01$　　* : $p < 0.05$

表 9　視覚刺激 VB における違和感の信頼区間
Table 9　Confidence interval of incompatibility (visual stimulus VB).

			95%区間			99%区間		
			$+Y_{0.05}$	$-Y_{0.05}$		$+Y_{0.01}$	$-Y_{0.01}$	
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HA-}$	=	0.35	0.95	-0.25	×	1.10	-0.40	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV+}$	=	0.63	1.23	0.02		1.38	-0.13	×
$\alpha_{HA+} - \alpha_{HV-}$	=	0.93	1.53	0.32		1.68	0.17	
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV+}$	=	0.28	0.88	-0.33	×	1.03	-0.48	×
$\alpha_{HA-} - \alpha_{HV-}$	=	0.58	1.12	-0.03	×	1.33	-0.18	×
$\alpha_{HV+} - \alpha_{HV-}$	=	0.30	0.90	-0.30	×	1.05	-0.45	×

$Y_{0.05}$ (5%水準のヤードスティック) = 0.60
$Y_{0.01}$ (1%水準のヤードスティック) = 0.75
×：有意差なし

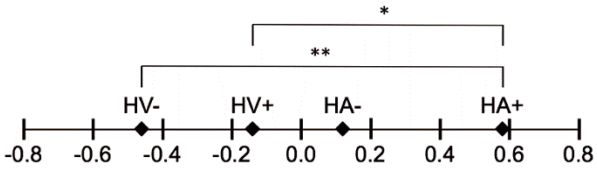

図 10　視覚刺激 VB における違和感の尺度図
Fig. 10　Scale of incompatibility (visual stimulus VB).

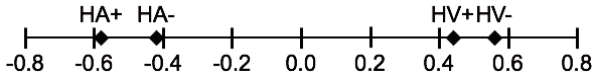

図 11　視覚刺激 VA における全評価項目の平均の尺度図
Fig. 11　Scale of average of evaluation points (visual stimulus VA).

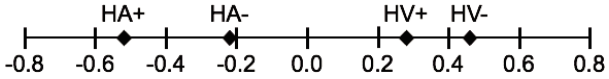

図 12　視覚刺激 VB における全評価項目の平均の尺度図
Fig. 12　Scale of average of evaluation points (visual stimulus VB).

© 2018 Information Processing Society of Japan

ブランコのように前後に移動する視覚刺激 VA では，速度に合わせた牽引力の提示が最も良い結果となった．ただし映像の解釈の仕方によって，牽引するべき向きが変化した（牽引力 HV+・牽引力 HV−）．

自動車のように前進と停止を繰り返す視覚刺激 VB に関しても牽引力 HV− が好まれる傾向があったが，提示するべき牽引力は明確にはならなかった．このようになった理由の 1 つとして，個人によって好みが分かれたことが考えられる．個別に結果を見ると，実世界と同じように慣性力に合わせて牽引される牽引力を好む人と，移動速度が増加するにつれて強く牽引される牽引力を好む人に分かれた．この結果は視覚刺激を抽象的な映像ではなく，自動車やブランコの映像のように具体的な状況を明示した映像に変更すると改善されると考えられる．またもう 1 つの理由として，試行を重ねる間に評価が変化する被験者がいたことから，4 条件の中に最適な牽引力がなかったことも理由として考えられる．現在，速度に合わせて提示する牽引力と加速度に合わせて提示する牽引力のみを用意しているが，速度と加速度の組合せ成分に合わせた牽引力などを用意し，より最適な牽引力を再考する必要がある．

5. おわりに

本研究では，衣服を牽引することで衣擦れによる皮膚感覚と牽引による深部感覚を提示し，簡易的に自己運動感覚を向上させる手法を提案し，4 つのモータと糸を用いた衣服牽引装置を作成した．

実験では一対比較法を用いて，本装置によってどのような物理的状況を表現すべきかを検討した．その結果，ブランコのように前後に移動する視覚刺激では，速度に合わせて牽引力を提示した方が良い結果となった．しかしながら自動車のように前進と停止を繰り返す視覚刺激に関しては，最も適している牽引力が明確にならなかった．これは個人によって好みが分かれたことや，用意した条件の中に最適な牽引力がなかったことが原因として考えられる．そのため今後は，コンテンツ内の状況をユーザに示唆できるような視覚刺激の作成や，様々な牽引力を用意し最適な牽引力の再考をする必要がある．また，他の自己運動提示手法，たとえばモーションプラットフォームや前庭刺激，振動提示などとの比較による相対的な効果量の検証も今後行っていく必要がある．

謝辞 本研究は JST-ACCEL「身体性メディア」プロジェクトの一環として行われた（JPMJAC1404）．

参考文献

[1] Väljamäe, A., Larsson, P., Västfjäll, D. and Kleiner, M.: TRAVELLING WITHOUT MOVING: AUDITORY SCENE CUES FOR TRANSLATIONAL SELF-MOTION, *Proc. International Conference on Auditory Display*, pp.9–16 (2005).

[2] Sugiura, A., Tanaka, K., Takada, H., Kojima, T., Yamakawa, T. and Miyao, M.: A Temporal Analysis of Body Sway Caused by Self-Motion During Stereoscopic Viewing, *Universal Access in Human-Computer Interaction*, pp.246–254 (2015).

[3] Nojima, T., Saiga, Y., Okano, Y., Hashimoto, Y. and Kajimoto, H.: The peripheral display for augmented reality of self-motion, *Proc. International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, pp.308–309 (2007).

[4] Ito, H. and Takano, H.: Controlling Visually Induced Self-Motion Perception: Effect of Overlapping Dynamic Visual Noise, *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, Vol.23, No.6, pp.307–311 (2004).

[5] MediaMation: MX4D, available from ⟨http://www.mediamation.com/products_x4d.html⟩.

[6] Simworx: 360° Rotating Flying Theatre, available from ⟨http://www.simworx.co.uk/360-flying-theatre/⟩.

[7] CableRobot Simulater: Fraunhofer IPA, available from ⟨http://www.cablerobotsimulator.org/⟩.

[8] Israr, A. and Poupyrev, I.: Tactile Brush: Drawing on Skin with a Tactile Grid Display, *CHI '11 Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2011).

[9] Amemiya, T., Hirota, K. and Ikei, Y.: Concave-Convex Surface Perception by Visuo-vestibular Stimuli for Five-Senses Theater, *Virtual and Mixed Reality – New Trends*, pp.225–233 (2011).

[10] Dijk, E.O., Weffers-Albu, A. and de Zeeuw, T.: *A tactile actuation blanket to intensify movie experiences with personalized tactile effects* (2015).

[11] Lemmens, P., Crompvoets, F., Brokken, D., Eerenbeemd, J. and Vries, G.: A body–conforming tactile jacket to enrich movie viewing, *Proc. World Haptics*, pp.7–12 (2009).

[12] Konishi, Y., Hanamitsu, N., Outram, B., Kamiyama, Y., Minamizawa, K., Sato, A. and Mizuguchi, T.: Synesthesia Suit, *Proc. AsiaHaptics 2016*, pp.499–503 (2016).

[13] Cardin, S., Vexo, F. and Thalmann, D.: Head Mounted Wind, *Proc. 20th Annual Conference on Computer Animation and Social Agents*, pp.101–108 (2007).

[14] Sawada, E., Ida, S., Awaji, T., Morishita, K., Aruga, T., Takeichi, R., Fujii, T., Kimura, H., Nakamura, T., Furukawa, M., Shimizu, N., Tokiwa, T., Nii, H., Sugimoto, M. and Inami, M.: BYU-BYU-View: A wind communication interface, *Proc. ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies* (2007).

[15] Seno, T., Ogawa, M., Ito, H. and Sunaga, S.: Consistent air flow to the face facilitates vection, *Perception*, Vol.40, No.10, pp.1237–1240 (2011).

[16] 前田太郎，安藤英由樹，渡邊淳司，杉本麻樹：前庭電気刺激を用いた感覚の提示，バイオメカニズム学会誌，Vol.31, No.2, pp.82–89 (2007).

[17] Aoyama, K., Iizuka, H., Ando, H. and Maeda, T.: Four-pole galvanic vestibular stimulation causes body sway about three axes, *Scientific Reports*, Vol.5, 10168 (2015).

[18] Teslasuit, available from ⟨https://teslasuit.io/⟩.

[19] Danieau, F., Fleureau, J., Guillotel, P., Mollet, N., Lécuyer, A. and Christie, M.: HapSeat: Producing Motion Sensation with Multiple Force-feedback Devices Embedded in a Seat, *Proc. 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.69–76 (2012).

[20] Ouarti, N., Lécuyer, A. and Berthoz, A.: Haptic Motion: Improving Sensation of Self-Motion in Virtual Worlds with Force Feedback, *IEEE Haptics Symposium* (2014).

© 2018 Information Processing Society of Japan

[21] Bouyer, G., Chellali, A. and Lécuyer, A.: Inducing self-motion sensations in driving simulators using force-feedback and haptic motion, *Proc. IEEE Virtual Reality* (2017).
[22] Steinemann, A., Tschudi, S. and Kunz, A.: Full Body Haptic Display for Low-Cost Racing Car Driving Simulators, *Proc. IEEE Virtual Reality* (2011).
[23] Buoguila, L., Cai, Y. and Sato, M.: New Haptic Device For Human Scale Virtual Environment Scaleable – SPIDAR, *Proc. ICAT'97*, pp.93–98 (1997).
[24] 永井一樹，銭　亦尅，赤羽克仁，佐藤　誠：ワイヤ駆動型ウェアラブル 6 自由度力覚提示デバイス “SPIDAR-W”，インタラクション 2016，pp.315–320 (2016).
[25] 川崎太雅，赤羽克仁，長谷川晶一，佐藤　誠：力覚提示によるストリートダンス訓練システムの提案，第 20 回日本バーチャルリアリティ学会，pp.471–474 (2015).
[26] 佐藤　信：統計的官能検査法，pp.231–270, 日科技連出版社 (1985).
[27] 中前光弘，田畑洋二，大賀泰文，角田充弘，宇都文昭，奥西孝弘，越智　保，前田　要：Scheffe の一対比較法による主観的評価法，日本放射線技術学会雑誌，Vol.52, pp.1561–1565 (1996).

大石 恵利佳

2018 年電気通信大学大学院情報学専攻博士前期課程修了．在学中，バーチャルリアリティシステムの研究に従事．

高下 昌裕

2016 年電気通信大学大学院総合情報学専攻博士前期課程修了．在学中，バーチャルリアリティシステムの研究に従事．

中村 拓人　（学生会員）

2014 年電気通信大学総合情報学科卒業．2016 年電気通信大学大学院総合情報学専攻博士前期課程修了．同年より同大学院情報学専攻博士後期課程に在籍，日本学術振興会特別研究員（DC1），現在に至る．触覚ディスプレイに関する研究に従事．

梶本 裕之

1998 年東京大学工学部計数工学科卒業．2001 年日本学術振興会特別研究員（DC1）．2003 年同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学，博士（情報理工学）．2003 年東京大学助手．2006 年電気通信大学助教授．2007 年同准教授．2018 年同教授．触覚ディスプレイ，触覚センサ，バーチャルリアリティシステム等の研究開発に従事．日本バーチャルリアリティ学会，日本ロボット学会，計測自動制御学会各会員．

© 2018 Information Processing Society of Japan