

触知覚における運動残効現象の研究

林 政一郎*¹ 渡邊 淳司*² 梶本 裕之*¹ 館 暉*¹

Study on Motion After Effect in Tactile Sensation

Seiichiro Hayashi*¹ Junji Watanabe*² Hiroyuki Kajimoto*¹ Susumu Tachi*¹

Abstract – In vision, after prolonged seeing of motion in one direction, illusory motion in the opposite direction is observed in physical static visual patterns (known as “waterfall illusion”). This phenomenon is referred to as Motion After Effect (MAE). MAE has been useful to study, without brain imaging, information processing in visual perception. Although some tactual illusions have been observed, obvious tactual MAE has not been reported. We, however, found clear and robust MAE in tactile sensation by using physical motion stimuli for test probe. We suppose that this research will make a contribution to investigate mechanism of tactual motion perception.

Keywords : cutaneous sensation, motion after effect (MAE), motion perception, tactile display, tactile illusion

1. はじめに

1.1 触覚提示デバイスと触運動知覚

バーチャルリアリティの分野において、自然な触感覚(*)を提示する研究は、遠隔操作、手術シミュレーション、アミューズメントなどへの応用を目的として、これまで多くなされている[1]。その主な方法は、皮膚表面の物理的な振幅や振動周波数を振動ピンアレイ[2]によって再現することで、任意の皮膚感覚を提示しようとするものであった。この他にも超音波[3]や吸引圧[4]、空気圧[5]、電気刺激[6]などを用いた装置が提案されている。

触覚提示装置の設計は、人間の触知覚特性に基づいてなされることが望ましい。これまでに、機械受容器の分布密度や共振周波数[7]、受容器で発せられた神経パルスの大まかな経路(1, 2, 3a, 3b野)[8]、形や方向に特異的に反応するニューロン集合の存在[9]、などについて研究が進んでいる。しかし、これらの知見は触覚ディスプレイの設計指針を構成するのに十分とは言えず、さらに触覚情報統合の空間的範囲やリフレッシュレート、速度知覚メカニズムなどについての研究が必要である。

そこで本論文では、触知覚メカニズムの解明、特に触覚における速度知覚メカニズムの研究を行う。具体的には、視覚において「滝の残効」として知られている運動残効現象(図1(a))が、皮膚感覚においても存

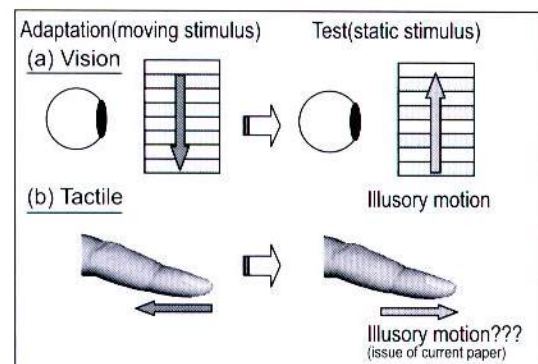


図1 運動残効現象：(a) 視覚, (b) 触覚
Fig.1 Motion after effect: (a) vision, (b) tactile

在することを示し(図1(b))、触覚における運動知覚メカニズムについて考察する。

*本論文では皮膚内の受容器によって生じ、物体表面の模様や質感などを認識する皮膚感覚のことを「触覚」と記す。

1.2 触覚における運動残効現象

流れ落ちる滝を見続けた後、周りの景色がゆらゆらと上昇していくように見える現象は「滝の錯視」として古くから知られている。一般的に、一定方向に動き続ける刺激に順応した後、静止刺激が反対方向に動いて知覚される現象を運動残効現象という[10][11]。運動残効現象が生じるメカニズムは以下のように説明されている。まず、一定方向に運動する刺激を長時間提示すると、その方向に特異的に反応するセンサ[12]の感度が下がる。すると、静止刺激を提示したときに反対方向に感度を持つセンサの応答が相対的に大きくな

*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

*2: 科学技術振興機構 さきがけ

*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

*2: PRESTO Japan Science & Technology Agency

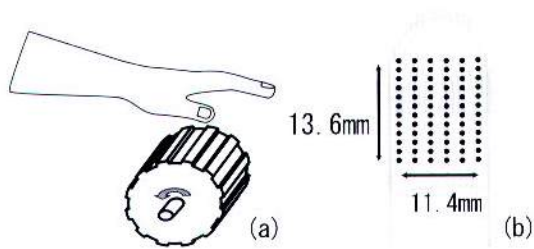


図2 先行研究：(a) 回転するドラムを用いた Hollins らの実験，(b) オプタコンを用いた Lerner らの実験

Fig.2 Previous work: (a) Hollins' experiment, (b) Lerner's experiment.

り，結果的に静止刺激が順応刺激と反対方向に運動するように感じられる．これまで，順応刺激とテスト刺激のパターンを変化させて運動残効現象を観察することで，脳内の視覚情報処理メカニズムを非侵襲で解析する研究が，1世紀以上にわたりなされている [13] [14].

一方，触覚の運動残効現象についての研究は数少ない [15] [16]. Hollins ら [17] は，図 2(a) のように，側面に溝のある直径 90 mm のドラムを 60 rpm で回転させ，側面に手を押し当てることで，手の皮膚表面に約 280 mm/s の速度を提示し，しばらく押し当てた後に運動残効が生じるかを調べた．彼らの実験では，順応刺激を提示する時間と残効の強さ・持続時間との関係を調べているが，視覚における運動残効のような反対方向の残効を感じるという結論には至っていなかった．そして，近年 (2002) Lerner ら [18] は，Hollins らと同様の実験装置を用いた実験に加え，盲人用視触覚変換装置であるオプタコンを用いた実験を行っている．オプタコンは 230 Hz で振動する 24×6 本のピンから成るが，彼女らの実験では，そのうち 13.6 mm×11.4 mm の範囲にある 6×12 本のピンを用い，時間差をつけて振動させることで，回転するドラムでの実験と同様の約 280 mm/s の刺激を指の皮膚表面に提示した (図 2(b))．そして，オプタコンによる刺激をしばらく提示した後に，提示を止め，運動残効が生じるかを調べた．ドラム，オプタコンを用いたどちらの場合にも，運動を感じなかった割合が約 50%，提示した運動方向と同じ方向の残効を感じた割合が 10-20%，反対方向の残効を感じた割合が 10-20% となり，視覚における運動残効のようにはっきりとした残効は皮膚感覚においては生じないと結論している．

Hollins らや Lerner らの実験において明瞭な運動残効が確認できなかったのは，残効を確認する方法が不適切であったためと我々は考える．彼らは順応刺激を提示した後に，テスト刺激として何も刺激を提示していないが，これは滝の残効において，順応後に目を閉じてしまうのと同じことであり，その条件で残効が生

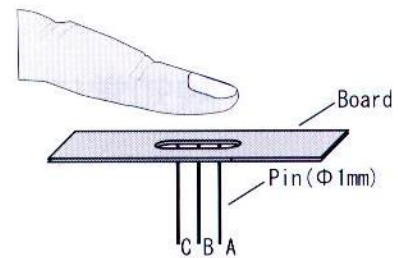


図3 実験装置
Fig.3 Experimental apparatus

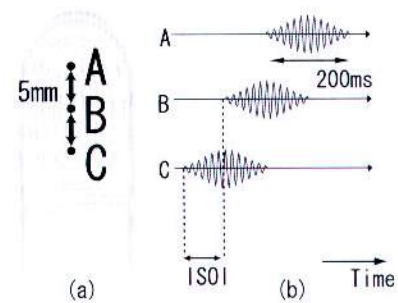


図4 (a) 実験1での刺激点の位置，(b) 刺激タイミング

Fig.4 (a) Stimulus arrangements of experiment 1, (b) Time chart

じないからといって，触覚の運動残効が存在しないとは言いきれない．そこで本論文では，順応刺激を提示した後に，適切なテスト刺激を提示することで触覚における運動残効現象の有無を調べることとした．

2. 触覚運動残効の実験

2.1 実験装置

用いた実験装置の概略を図3に示す．皮膚表面に沿う運動感覚を生じさせるために，一定間隔で並べたピンを時間差をつけて振動させ皮膚を刺激した．ピンは直径 1 mm のピアノ線で，小型振動発生器 (EMIC 社 511-A) を用いて振動させた．各ピンは板に開けられた穴の下からのぞくように配置し，被験者は右手人差し指の指腹部分がピンにあたるように指を置いた．各ピンは 30 Hz で駆動し，振幅を最大 0.06 mm のサインカーブ状に変化させて 200 ms 間振動させた．

2.2 実験手順 (実験1)

直線的な運動感覚を提示するために，3本のピンを一直線上に 5 mm 間隔で配置した (図4(a))．実験手順の概略を図5に示す．順応刺激として，明確な速度知覚が生じる 100 ms の刺激開始時間間隔 (図4(b)の ISOI) を用いて [19] [20]，触運動刺激を 1 秒に 1 パターン，複数回繰返し提示した．そして順応刺激の 2 秒後に，ある ISOI を持ったテスト刺激を提示し，テスト刺激がどちら向きの運動と知覚されたか，「上向き (指先方向)」もしくは「下向き (指の根元方向)」の強制 2 択で被験者に回答してもらった．順応刺激の条件

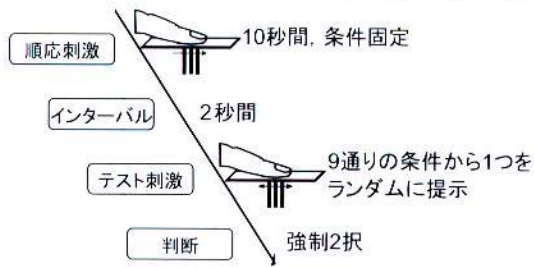


図5 実験の手順
Fig. 5 Procedure of experiment

は上向き、下向き、もしくは順応刺激なしの3条件、テスト刺激のISOIは9通り（-120、-60、-30、-15、0、15、30、60、120ms、ISOIがマイナスの場合は指先側のピンが先に提示されたことを意味する）とした。以上、各3つの順応条件において、それぞれのISOIあたり20試行ずつ、180試行回答してもらった。各ISOI2試行を含む18試行を1セッションとし、10セッションに分けて実験を行った。また順応効果は実験中蓄積されるため、実験最初の試行の順応は30秒、残りの試行では10秒とした。被験者は著者（23才、男性）と、心理物理実験の経験が少ない20才、23才の男性と23才の女性の計4人である。

2.3 実験結果（実験1）

被験者4人の実験結果を図6に示す。横軸はテスト刺激のISOI[ms]であり、Logスケールで示してある。縦軸は上向きの運動が知覚された割合である。最小2乗法による累積正規分布曲線へのフィッティングカーブもあわせて示している。各被験者について、上向き順応、下向き順応、順応なしの3条件の結果が示されている。全ての被験者、全てのグラフに共通する全体的な特徴として、テスト刺激のISOIが増加する（提示される上向きの運動が明らかになる）にしたがって、上向きと答える確率が増加している。順応刺激なしの条件（△印）では、ISOIが0msのとき、どの被験者についても上向きと答える確率は約50%であり、正しく運動知覚の判断が行われたことを示している。下向きの順応刺激を提示した場合（○印）では、ISOIが0msでも上向きと答える確率が50%を上回り、順応刺激なしのグラフを上方向にシフトしたような結果となった。また逆に、上向きの順応刺激を提示した場合（×印）には、順応刺激なしのグラフを下方向にシフトしたような結果となった。

これらのシフト量を、累積正規分布のフィッティング曲線の値が0.5となる等価点を利用して評価したのが図7である。下向き順応条件の等価点から順応刺激なし条件の等価点を引いたものが、図7各被験者の上側の棒グラフ（黒）、上向き順応条件の等価点から順応刺激なし条件の等価点を引いたのが図7各被験者の下

Experiment 1 (Vertical motion)

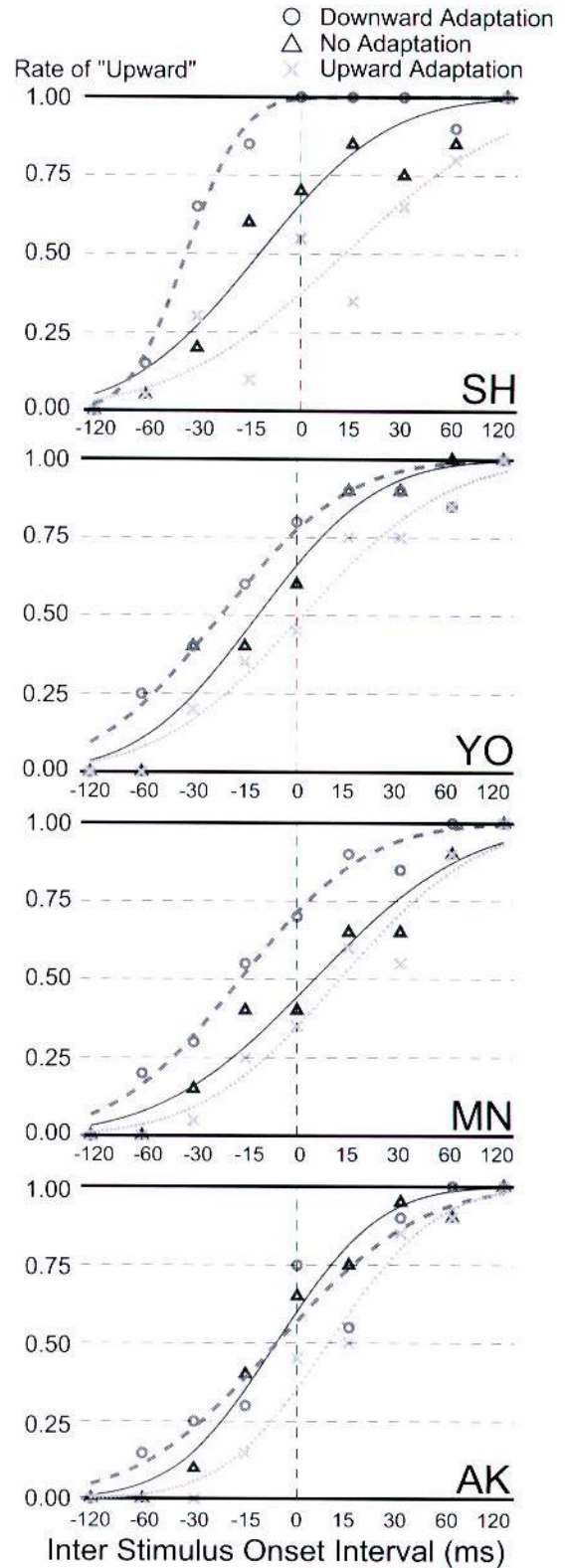


図6 実験1の結果
Fig. 6 Results of experiment 1

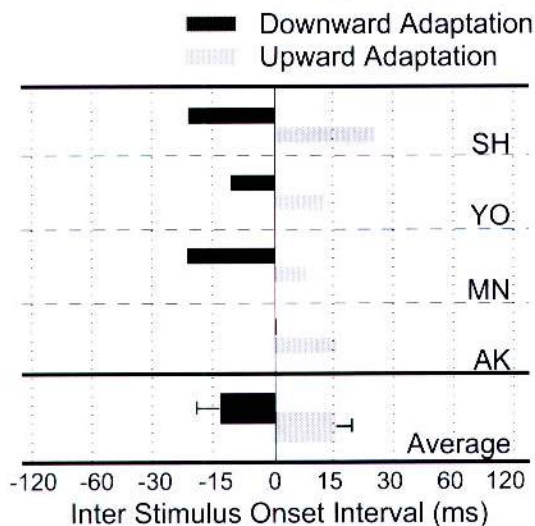


図7 順応刺激による等価点のずれ (エラーバーは標準誤差を表す)
 Fig.7 Shift of PSE caused by adaptation (error bars correspond to the standard errors)

側の棒グラフ (灰) である。横軸は図6と同じく Log スケールの時間 [ms] である。被験者 4 人それぞれの結果と 4 人の平均 (エラーバーは標準誤差) を示す。下向き順応のシフト (黒) は AK を除いた 3 人の被験者で負の値を示し、平均は -13.9ms であった。そして、上向き順応のシフト (灰) は全ての被験者で正の値を示し、平均は 14.9ms であった。これらの実験結果は、順応刺激の有無により、テスト刺激の運動知覚が順応刺激の運動方向と逆方向に偏って知覚されることを示し、触覚において運動残効が生じることを示唆するものである (本実験条件では、上・下向きとも ISOI 約 15ms 程度の順応効果であった)。

2.4 実験装置・手順 (実験 2, 3, 4)

次に、触覚運動残効の空間的な一般性を示すため、振動刺激を行うピン配置を変え、様々な方向で運動残効が生じるかを調べた。用いた装置は実験 1 と同様である。ただし、ピンの配置を以下のように変更した。

- 実験 2) 横方向にピン間隔 5mm (図 8(a))
- 実験 3) 5mm 角のひし形の頂点上 (図 8(b))
- 実験 4) 刺激点の間隔を 25mm (図 8(c))

実験手順も実験 1 とほぼ同様である。ただし、順応刺激を与える条件のみで実験を行った。実験 2 では、テスト刺激の ISOI を ($-30, 0, 30\text{ms}$) の 3 通りとし、運動の向きを指の水平方向「右向き」、「左向き」の強制 2 択で回答してもらった。実験 3 では、各ピンを図 9 のタイミングで刺激し、テスト刺激の ISOI を ($-90, -30, 30, 90\text{ms}$) の 4 通りとして回転方向を「時計回り」、「反時計回り」の強制 2 択で回答してもらった。実験 4 では、テスト刺激の ISOI を ($-60, 0, 60\text{ms}$)

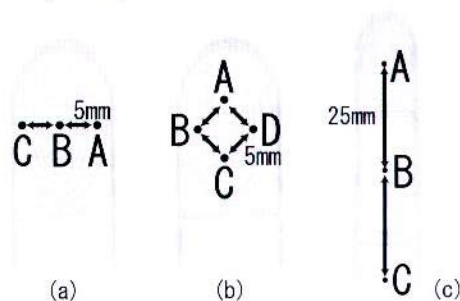


図8 刺激点の配置 : (a) 実験 2, (b) 実験 3, (c) 実験 4
 Fig.8 Stimulus arrangements: (a) Ex. 2, (b) Ex. 3, (c) Ex. 4

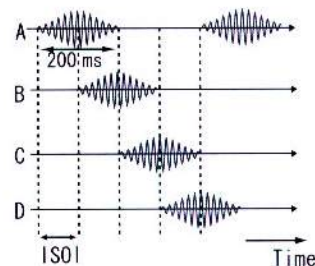


図9 実験 3 のタイムチャート
 Fig.9 Time chart of experiment 3

の 3 通りとし、「上向き」、「下向き」の強制 2 択で回答してもらった。

2.5 実験結果 (実験 2, 3, 4)

実験 1 と同じ被験者 4 人について、各々の実験結果を図 10 に、4 人の平均を図 11 に示す。横軸は ISOI [ms]、縦軸はそれぞれ左向き、時計回り、上向きの運動が知覚された割合である。また、図 11 のエラーバーは標準誤差を表している。

実験 2 の結果について、図 10(a) では ISOI が正の場合には左向き、負の場合には右向きと答える割合が増えている。また、左向きの順応刺激を提示した場合 (×印) と比較して右向きの順応刺激を提示した場合 (○印) のほうが、左向きと答える割合が高くなっている。4 人の平均を示した図 11(a) では、2 本のグラフは標準誤差と比較して十分に離れており、横方向の運動においても順応の効果が表れている。

実験 3 の結果について、図 10(b) では全体として ISOI が正の場合には時計回り、負の場合には反時計回りと答える割合が増えている。グラフの傾きは実験 2 の結果に比べて小さいが、これは回転方向の判断が直線運動の判断に比べて難しいことによると考えられる。また、時計回りの順応刺激を提示した場合 (×印) と比較して半時計回りの順応刺激を提示した場合 (○印) のほうが、時計回りと答える割合が高くなっている。4 人の平均を示した図 11(b) では、ISOI が $-30, 30\text{ms}$ と比較的小さい場合にも、時計回りの順応条件では時

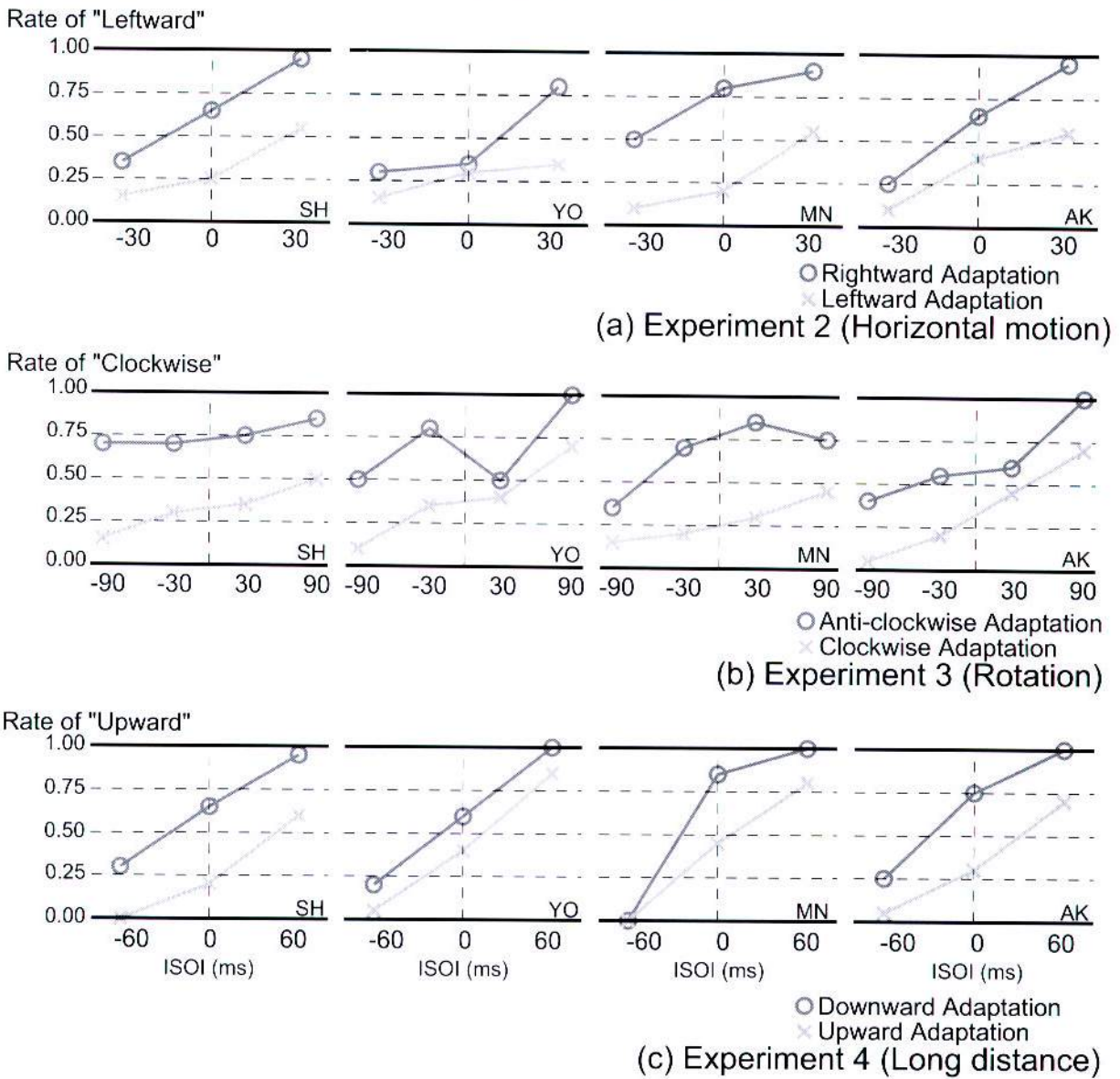


図10 実験結果：(a) 実験2, (b) 実験3, (c) 実験4
 Fig. 10 Results of experiments: (a) Ex. 2, (b) Ex. 3, (c) Ex. 4

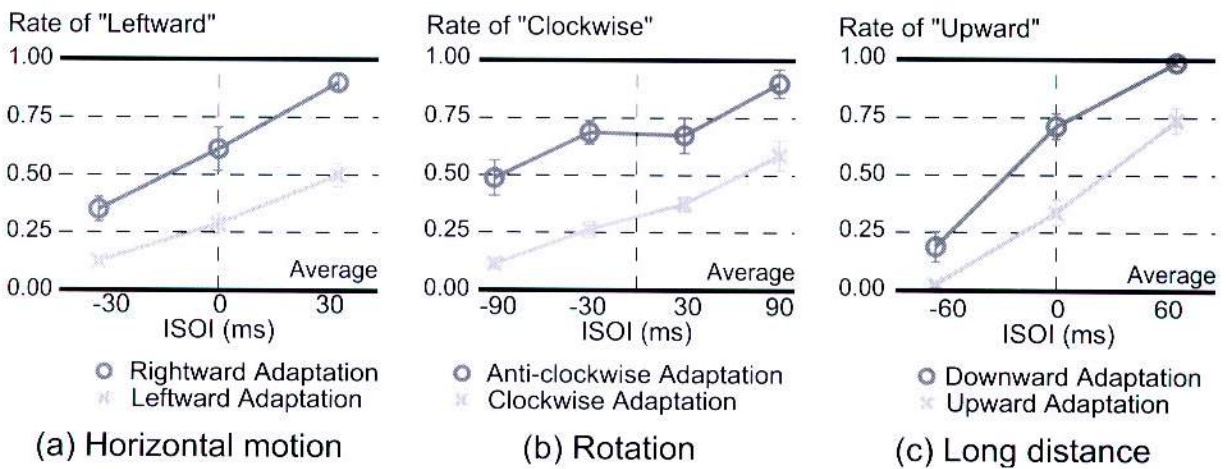


図11 4人の被験者の平均 (エラーバーは標準誤差を表す)：(a) 実験2, (b) 実験3, (c) 実験4
 Fig. 11 Average of 4 subjects' results (error bars correspond to the standard errors): (a) Ex. 2, (b) Ex. 3, (c) Ex. 4

計回りと答える割合が25%付近の値を取り、反時計回りの順応条件では75%付近の値を取った。2本のグラフは実験2の結果と同様、標準誤差と比較して十分に離れており、回転運動の知覚においても順応の効果が表れている。

実験4の結果について、図10(c)ではISOIが正の場合には上向き、負の場合には下向きと答える割合が増えている。また上向きの順応刺激を提示した場合(×印)と比較して下向きの順応刺激を提示した場合(○印)のほうが、上向きと答える割合が高くなっている。4人の平均を示した図11(c)では、実験2,3の結果と同様、2本のグラフは標準誤差と比較して十分に離れており、指全体にわたるような長い距離の運動知覚においても順応の効果が表れている。

3. 考察

実験1の結果より、テスト刺激の運動方向の知覚は前に提示した順応刺激の有無・方向に影響され、視覚における運動残効現象と同様に、順応刺激の運動方向と反対向きに知覚される割合が高くなることがわかった。また、ISOIの絶対値が小さい場合、上下の運動の判断が難しくなるが、そのような場合にも回答の割合が変化しており、意識下の情報処理の過程で確かに順応が生じていることが示唆される。また実験2,3,4のように刺激する点の配置を変えた場合についても、テスト刺激の運動の向きを順応刺激の方向とは反対向きに知覚する割合が高くなっており、運動残効の一般性が示された。特に、実験4で刺激点の距離を長くした場合、その他の実験と比べて滑らかな移動感は弱いにもかかわらず残効が生じたことから、近接する受容器の出力からのみ速度処理が行われているわけではないことが示唆される。

4. まとめ

本論文では、触覚における運動残効現象の存在を示し、この現象が皮膚表面のさまざまな方向に対しても生じることを示した。今後は今回示した運動残効現象を利用して、速度知覚のメカニズムをより詳しく解明していきたい。具体的には、どれくらいの時間範囲、時間分解能で速度を知覚しているのか、あるいは皮膚のどれくらいの空間範囲(広さ)、空間解像度で速度を処理しているのかといったような、速度知覚の時空間的な範囲や解像度を明らかにしたいと考えている。

これまで提案されているピンアレイ型触覚ディスプレイ(代表例を表1に示す)はそのピン間隔が1mm程度から3mm程度まで様々であるが、提示可能な速度感覚は異なると考えられる。本研究で扱ったような触覚の速度知覚メカニズムが明らかになれば、既存のディスプレイにおいてどのような速度感覚を提示可能

表1 主なピンアレイ型触覚ディスプレイの仕様

Table 1 Specifications of several pin-array type tactile displays

Name	Number	Space	Frequency
OPTACON [21]	24×6	1.2 mm × 2.4 mm	230 Hz
3D Tactile Display [22]	64×64	3 mm	15 s/Image
Pneumatically Actuated Tactile Display [5]	5×5	2.5 mm	5 Hz
Tactile Shape Display Using RC Servomotors [2]	6×6	2 mm	25 Hz

か、あるいはある触覚上の速度感覚を提示するにはどのように刺激すればよいのかなど、触覚ディスプレイの設計指針についての議論が可能になると考えている。

参考文献

- [1] 篠田裕之:皮膚感覚インタフェースの現状と展望, 第4回システムインテグレーション部門学術講演会(2003)
- [2] C. R. Wagner, S. J. Lederman, R. D. Howe: Design and Performance of a Tactile Shape Display Using RC Servomotors, *Haptics-e: The Electronic Journal Of Haptics Research*, Vol. 3, No. 4(2004)
- [3] T. Iwamoto, D. Akaho, H. Shinoda: High Resolution Tactile Display Using Acoustic Radiation Pressure, *SICE 2004*, pp. 1239-1244(2004)
- [4] 牧野泰才, 浅村直也, 篠田裕之:吸引圧を用いるマルチプリミティブ触覚ディスプレイ, 日本VR学会第8回大会論文集, pp. 243-244(2003)
- [5] G. Moy, C. Wagner, R. S. Fearing: A Compliant Tactile Display for Teletaction, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Vol.4, pp. 3409-3415(2000)
- [6] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 齋藤:皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J83-D-II, No. 1, pp. 120-128(2001)
- [7] 大山正, 今井省吾, 和気典二:感覚知覚ハンドブック, 誠信書房(1994)
- [8] 岩村吉晃:タッチ, 医学書院(2001)
- [9] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell: *Principle of Neural Science*, Appleton & Lange(2000)
- [10] A. Wohlgenuth: On the aftereffect of seen movement, *British Journal of Psychology, Monograph Supplement*, Vol. 1, pp. 1-117(1911)
- [11] G. Mather, F. A. J. Verstraten, S. M. Anstis: *The Motion Aftereffect, A Modern Perspective*, Bradford Books(1998)
- [12] C. Blakemore, F. W. Campbell: On the existence of neurons in the human visual system selectively to the orientation and size of retinal images, *Journal of Physiology*, Vol. 203, pp. 237-260(1969)
- [13] H. B. Barlow and R. M. Hill: Evidence for a physiological explanation of the Waterfall phenomenon and figural after-effects, *Nature*, Vol. 200, pp. 1345-1347(1963)
- [14] E. L. Cameron, C. L. Baker, Jr. and J. C. Boulton: Spatial frequency selective mechanisms underlying

- the motion aftereffect, Vision Research, Vol. 32, pp. 561-568(1992)
- [15] W. A. Thalman: The after-effect of movement in the sense of touch, Am. J. Psychol. Vol. 33, pp. 268-276(1922)
- [16] N. Weisstein, W. Maguire, K. S. Berbaum: A phantom-motion aftereffect, Science, Vol. 198, pp. 955-958(1977)
- [17] M. Hollins, O. Favorov: The tactile movement aftereffect, Somatosensory and Motor Research, Vol. 11, pp. 153-162(1994)
- [18] E. A. Lerner, J. C. Craig: The prevalence of tactile motion aftereffects, Somatosensory and Motor Research, Vol. 19, pp. 24-29(2002)
- [19] J. H. Kirman: Tactile apparent movement: The effects of interstimulus onset interval and stimulus duration, Perception & Psychophysics, Vol. 15, No.1, pp. 1-6(1974)
- [20] J. H. Kirman: The effect of number of stimulators on the optimal interstimulus onset interval in tactile apparent movement, Perception & Psychophysics, Vol. 17, No. 3, pp. 263-267(1975)
- [21] J. G. Linvill, J. C. Bliss: A direct translation reading aid for the blind, Proceedings of IEEE Vol. 54, pp. 40-50(1966)
- [22] M. Shinohara, Y. Shimizu, A. Mochizuki: Three-Dimensional Tactile Display for the Blind, IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 249-256(1998)

(2005年9月30日受付)

[著者紹介]

林 政一郎 (学生会員)



2004年東京大学工学部計数工学科卒業。現在、同大学大学院情報理工学系研究科博士前期過程に在学中。皮膚感覚メカニズム解明のための研究に従事。

渡邊 淳司 (正会員)



2005年東京大学大学院情報理工学系研究科博士課程修了。同年科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業個人型研究(さきがけ)研究員。現在に至る。視触覚における時空間知覚メカニズムの解明とその情報提示・芸術表現への応用研究を行う。博士(情報理工学)。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞(01年)、同学会学術奨励賞受賞(02年)、電子情報通信学会ヒューマンコミュニケーション賞受賞(03年)、ArsElectronica "NextIdea"入賞(04年)、日本視覚学会ベストプレゼンテーション賞受賞(05年)。http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~junji/

梶本 裕之 (正会員)



1998年東京大学工学部計数工学科卒業。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助手。04年同研究科博士過程終了。現在に至る。触覚ディスプレイ、人工現実感システムなどの研究に従事。博士(情報理工学)。電気学会センサ・マイクロシステムと応用システムシンポジウム五十嵐賞受賞(97年)、ICAT'99 "Best Paper Prize"受賞(99年)、日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞受賞(00年)、同学会論文賞受賞(01年)、SCI2001 "Best Paper"受賞(01年)、ロボット学会学術奨励賞受賞(02年)、計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会ベストセッション賞受賞(02年)。

館 暉 (正会員)



1968年東京大学工学部計数工学科卒業。73年同大学大学院博士課程終了。同年同大学助手。75年通産省工技院機械技研研究員、主任研究官、遠隔制御課長、バイオロボティクス課長、マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員を経て、89年東京大学先端科学技術研究センター助教授。92年同センター教授。94年同大学院工学部計数工学科教授。2001年同大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻教授。現在に至る。テレプレゼンテーション、人工現実感の研究に従事。博士(工学)。IEEE/EMBS学会賞、通産大臣賞、国際計測連合(IMEKO)特別勲功賞などを授賞。IMEKOロボティクス会議議長、SICEフェロー、日本バーチャルリアリティ学会初代会長。