

腕運動中に提示される触覚刺激の定位

仲谷 正史^{*1} 渡邊 淳司^{*2} 安藤 英由樹^{*3} 前田 太郎^{*3} 舘 暲^{*1}

Spatial Localization for Transient and Intransient Tactile Stimulus

Masashi Nakatani^{*1}, Junji Watanabe^{*2}, Hideyuki Ando^{*3}, Taro Maeda^{*3} and Susumu Tachi^{*1}

Abstract – When the hand is stimulated during hand movements, humans can localize the stimulated position even without visual guidance. This is because the sensorimotor system integrates internal information of the hand's location and perceived temporal information of the stimulus. It is reported that when transient tactile stimulation was presented before, during or after hand movements, the stimulus was systematically mislocalized[6]. The mislocalization was interpreted as a result of mismatch between internal information and the physical location of the hand. However, typical environments exhibit a high degree of spatiotemporal coherence, and a different spatial localization strategy may be more adaptive to the continuous case. Here, we examine the time courses of localization for both transient and intransient vibration stimuli, to gain further insight into the spatial localization mechanism of the hand.

Keywords : Hand movement, Spatial localization, Somatosensory system, Internal spatial representation

1 はじめに

これまで、VR空間において物体の形状や接触時の力覚を提示する研究は数多くなされおり [1][2][3][4], PHANToM[5] のように商品化されている力覚提示デバイスも存在する。これらの先行研究の成果により、VR空間の任意の場所で触覚を体験することが可能となっている。しかし、提示された物体が空間の何処にあるのか、物体の空間定位に関する研究は、力覚提示技術において重要な要素であるにも関わらず、あまり多くの議論がなされていない。

人間が触ったものがどこにあるのか、物体の定位を行う方略は大きく分けて2つ考えられる。ひとつは、視覚情報をもとに触った物体が他の物体に対して環境座標の中で相対的に何処にあるかを決定する方略である。もうひとつは、自分の身体の位置情報をもとに、触ったものが自分の身体座標系に対して何処にあるかを決定する方略である。どちらの方略を取るかは状況によるが、VR空間においては、視覚がHMDなどの情報提示装置によって覆われていることも多く、身体の位置情報が物体の定位に対して大きな役割を果たしていると考えられる。

これまで行われた、身体の位置情報を使用する(視

覚情報を使わない) 触覚刺激の定位の研究としては、Dassonville[6]の研究が挙げられる。Dassonvilleは腕の運動中に瞬時のみ提示された触覚刺激は、ある傾向をもって誤定位されることを示し(実際に触覚刺激が提示された位置よりも腕の運動方向にずれて定位される)、腕運動中の自分自身の腕の位置情報は実際の腕の位置と異なっているとしている。もし、Dassonvilleらの議論に従うならば、VR空間において、腕の運動中に物体が触・力覚的に提示されたたとすると、その物体位置は誤って知覚されることになる。しかし、我々が生活している日常の世界では、あるまとまった体積(大きさ)を持った物体を触ることが多く、一瞬だけ提示される触覚情報は殆ど存在しない。そのため、Dassonvilleらによって報告された定位の誤りをそのまま連続的に提示される触覚刺激にも適用可能であるか疑問の余地がある[7]。

そこで、本論文では腕運動中に瞬時のみ提示される触覚刺激(Transient Stimulus)と連続的に提示される触覚刺激(Intransient Stimulus)に関する人間の空間定位の違いについて調べる。それにより、VR空間内に物体を提示する際に必要な知見を示す。

2 実験：瞬間・連続提示される触覚刺激の定位

2.1 実験装置

被験者は右人差し指の爪側に小型振動モータ(NECトーキン製 Type33)を装着し、図1(a)のように、固定されたアルミニウムバーに沿って腕を左から右に約

^{*1}東京大学大学院 情報理工学系研究科

^{*2}科学技術振興団 さきがけ

^{*3}NTT コミュニケーション科学基礎研究所

^{*1}Graduate School, Univ. of Tokyo

^{*2}Japan Science and Technology Agency

^{*3}NTT Communication Science Laboratory

400mm 動かす。腕を動かしている最中、もしくは腕の運動前後の時間に指へ振動刺激を与えた。被験者は、振動の与えられた位置がバー上の何処であったか、その位置に指を移動させることで回答した。実験を通して、視覚情報が定位の手がかりにならないように被験者は目を閉じていた。また、振動モータの音が被験者に聞こえることはなく、聴覚的にも定位の手がかりは存在しなかった。各試行では、はじめに 50ms のビープ音が鳴り、被験者はそれを聞くと即座に腕の運動を行った。ビープ音が鳴ってから腕運動開始までにかかる潜時は 200~300ms、腕の運動時間は約 300ms であった。指の移動、指し示した位置は CCD レーザ変位センサ (KEYENCE LK-500, アンプは LK-2500, サンプリング周期 1024 μ s) によって計測した。計測データはデータロガー (KEYENCE NR-2000, サンプリング周期 1ms) を介して記録した。

2.2 実験手順

腕運動中に瞬時のみ提示される触覚刺激と連続的に提示される触覚刺激の定位の違いを調べるために、図 1(b) に示すような 3 種類の実験を行った。実験 1 では Dassonville と同様に、腕の運動中に瞬時のみ振動刺激を与え、その定位位置を調べた。ビープ音開始後 50~700ms (腕の運動開始に対してはおよそ -200ms~500ms の範囲) のランダムな時間に振動刺激 (持続時間 20ms) が一度与えられ、被験者はその振動刺激の与えられた位置を定位した (刺激持続時間が 20ms とした理由は、小型振動モータに Sin 波を入力して被験者が刺激を感じる最短刺激提示幅が 20ms であるため [4])。実験 2 においては、ビープ音開始後 50~700ms のいずれかの時間に振動が開始し、振動は腕運動終了約 2sec 後まで継続した。被験者はその振動が開始した位置を定位した。実験 3 においては、振動刺激は被験者の腕運動の始まる 2~4sec 前から連続的に与えられ (2~4sec と時間幅があるのはビープ音のタイミングを予期できないようにするため)、ビープ音開始後 50~700ms のいずれかの時間に振動が終了した。被験者はその振動が終了した位置を定位した。各実験 30 試行を 1 セッションとし、合計 8 セッションを行った。被験者は右利きの男性 4 名 (22 歳~26 歳) であった。

2.3 実験データの解析

被験者は人差し指をバーに沿って動かし、振動刺激の与えられた位置、もしくは振動刺激の開始・終了した位置を指し示した。実験においては、試行間の腕の移動距離、移動時間はできるだけ等しく、刺激タイミングは一定の範囲内であることが望まれる。そのため、移動距離が 350mm 以下、450mm 以上、移動時間が 250ms 以下、350ms 以上、刺激の腕運動開始に対する時間が -200ms 以下、500ms 以上の試行はデータ

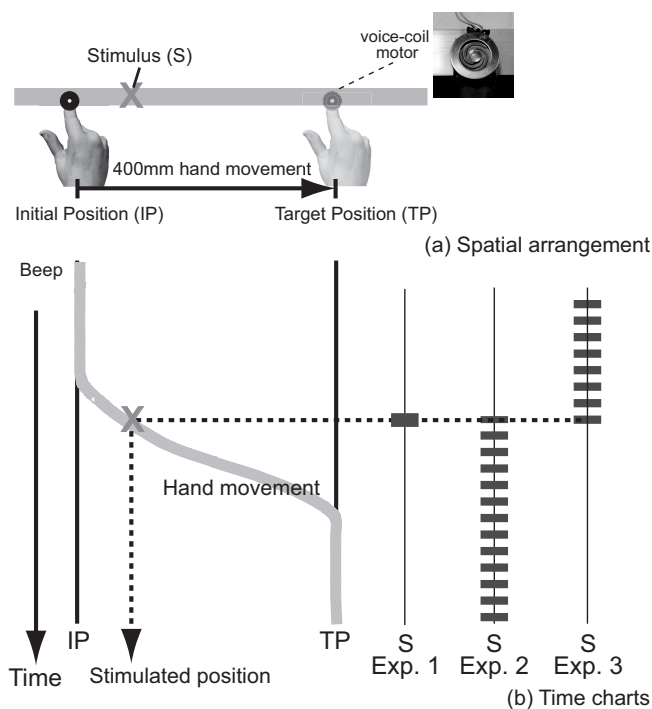


図 1 実験の (a) 装置の配置 (b) タイムチャート
Fig. 1 (a) Spatial arrangement (b) Time chart of experiments

の解析から除外した。また、腕の運動開始、運動終了位置は、計測データに 2.5Hz のローパスフィルタかけた後、腕運動速度が 50cm/sec をはじめて上回った時刻を腕の運動開始、運動開始後 50cm/sec をはじめて下回った時刻を腕の運動終了とした。

3 実験結果

3.1 実験 1 の結果：瞬時のみ提示される触覚刺激

実験 1 の被験者 4 名分を図 2(a) に示す。図の横軸は腕の移動開始時刻を 0 としたときの振動が提示された時刻 [ms] であり、負の値は腕運動開始前に振動が与えられたことを示す。縦軸は腕の移動方向を正とし、実際に刺激が提示された位置と被験者が指し示した位置の差、定位の誤りの大きさ [mm] である。例えば、腕の移動開始前 50ms に振動が提示されて、実際に振動が提示された場所から右に 100mm ずれて定位されたとすると、その試行は横軸 -50ms、縦軸 +100mm の位置にプロットされる。データ解析によって腕運動が異常であった試行を除いたデータ (各被験者のプロット数は JY : 167, MN : 140, MS : 175, TU : 170) と 100ms ごとに平均した値と標準誤差を示す。全ての被験者において、腕が移動し始める 100ms 程度前から正の方向 (腕の移動と同じ方向) に定位誤りが観察され始め、腕の移動終了の時刻 (300ms) まで生じている。腕の移動速度が定位誤りに与える影響は見られなかつ

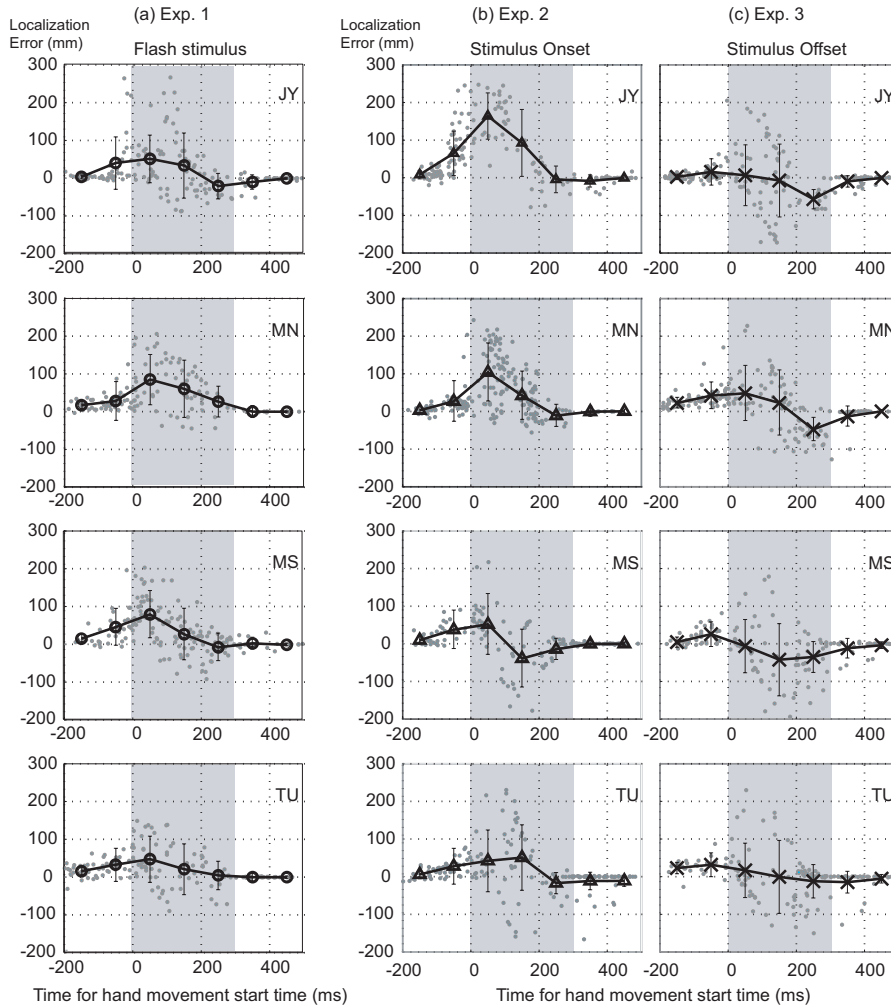


図2 運動中の Intransient 刺激提示時の空間定位
Fig. 2 Spatial Localization under intransient stimulus condition

た．定位誤り量は腕の移動開始後0～100msで最大となり平均100mm程度である．これは，Dassonvilleの先行研究と同様の傾向を示す結果であり[6]，実験1で用いた刺激が瞬間刺激として機能していることが確認できる．

3.2 実験2, 3の結果：連続提示される触覚刺激

実験2, 3の結果，被験者4名分を図2(b), (c)に示す．図の横軸は腕の移動開始時刻を0としたときの，振動が開始(実験2)もしくは終了(実験3)した時刻[ms]である．縦軸は腕の移動方向を正としたときの定位誤りの大きさである．図2(a)と同じく各試行のプロットと100msごとの平均と標準誤差を示す．(各被験者のプロット数は実験2, 3それぞれ，JY:170, 190, MN:208, 178, MS:146, 140, TU:153, 139)．連続提示される振動の振動開始位置を定位した実験2の結果は，実験1と同じく腕が移動し始める100ms程度前から正の方向(腕の移動と同じ方向)に定位誤りが観察され始め，腕の移動終了時刻(300ms)まで生じている．一方，振動の振動終了位置を定位した実験

3においては，腕の運動中及び腕運動終了あたりの時刻で負の方向(腕の運動と逆方向)に定位誤りが生じている．ただし，その誤りの大きさは他の2条件に比べると小さい．実験2,3においても，腕の移動速度が定位誤りに与える影響は見られなかった．

これらの結果をまとめると，瞬時のみ提示される触覚刺激と連続的に提示される触覚刺激の刺激開始位置を定位した時間変化は，一部の被験者を除き，同様の傾向を示し，腕運動開始100ms程度前から腕運動終了まで，腕運動と同方向の定位誤りが観察された．一方，連続刺激の刺激終了位置を定位した場合は瞬時提示とは異なる時間変化を示し，腕運動中，もしくは腕運動終了付近の時刻で腕運動と逆方向の定位誤りが観察された．つまり，瞬時に提示される刺激，もしくは連続刺激の刺激開始・刺激終了が腕の運動に対して同時刻に提示されたとしても，その知覚される位置は異なっており，「連続的な触覚刺激が提示される場合，Dassonvilleらの議論をそのまま当てはめることはできない」ということを意味している．

4 考察

視覚情報が使用できない本実験では、刺激が知覚される時間とそのときの腕の正確な位置情報があれば正しい定位が可能ははずである。刺激の種類に依らず腕の位置信号は不変だと考えると、瞬時提示、刺激の開始・終了で定位位置が異なるのは、それらの刺激情報が処理されて知覚に至る時間が異なることが考えられる。今後は腕の運動がない状態で、これらの刺激を使用した純粋な触覚刺激の反応時間の傾向を調べていく。

本実験において調べた連続刺激の刺激開始、終了の定位は、VR空間内に提示された物体に手を動かして触ったときの、物体両端の位置と考えることも可能である。このとき、刺激開始位置が腕の運動方向に、刺激終了位置が腕の運動と逆方向ずれると、物体の幅は縮んで知覚されると予想される。これまでの腕の運動中の幅知覚に関して、腕の運動速度により知覚される幅が変化するという報告 [8] があるが、位置定位と長さ知覚についてもその関係を調べていきたい。

5 おわりに

本論文では、腕の運動中に瞬時だけ提示される触覚刺激と連続的に提示される触覚刺激の定位の違いについて調べた。その結果、瞬時刺激と連続的な刺激の開始位置の定位は、同様の時間変化の傾向を示したが、連続的な刺激の終了位置の定位は異なる傾向を示した。これより、連続的な触覚刺激が提示される場合は、Dassonville らの議論をそのまま当てはめることはできないということがわかった。本実験の結果は、VR触・力覚提示技術において、提示物体の空間位置を知覚させるために重要な知見であるとともに、連続した物体の位置知覚と身体位置情報の表象に関して、新たな知見を示している。

参考文献

- [1] Immersion Corp.: <http://www.immersion.com/> (2005年9月26日)
- [2] 星野, 平田, 前田, 舘: 仮想触空間における物体形状の実時間提示法, 日本ロボット学会, Vol.15, No.6, pp.868-877 (1997)
- [3] Y. Yokokohji, N. Muramori, Y. Sato, T. Yoshikawa: Designing an Encountered-type Haptic Display for Multiple Fingertip Contacts Based on the Observation of Human Grasping Behaviors, International Journal of Robotics Research, Vol. 24, No. 9, pp. 717-729 (2005)
- [4] 安藤, 渡邊, 稲見, 杉本, 前田: Augmented Realityのための爪装着型触覚ディスプレイの研究, 電子情報通信学会論文誌, J87-D-*, 11, pp. 2025-2033 (2004)
- [5] SensAble Technologies, Inc.: <http://www.sensable.com/> (2005年9月26日)
- [6] P. Dassonville: Haptic localization and the internal representation of the hand in space, Exp. Brain Res., 106, pp. 434-448 (1995)
- [7] J. Watanabe, A. Noritake, T. Maeda, S. Tachi, S. Nishida: Perisaccadic Perception of Continuous Flickers, Vision Res., 45, pp. 413-430 (2005)
- [8] M. Hollins, A. K. Goble: Perception of the length of voluntary movements, Somatosensory Res., 5, pp. 335-348 (1988)

(2005年10月10日受付)

[著者紹介]

仲谷 正史 (学生会員)



2005年東大大学院・情報理工学・修士課程修了。同年より同大学院博士課程に在籍。日本学術振興会特別研究員(DC1)。Harvard University DEAS Research Assistant。触覚メカニズム・触覚ディスプレイの研究に従事。

渡邊 淳司 (正会員)



2005年東大大学院・情報理工学・博士課程修了。2005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。博士(情報理工学)。視覚における時空間知覚メカニズムとその情報提示・芸術表現への応用研究を行う。

安藤 英由樹 (正会員)



1998年愛工大大学院・工・修士課程修了。同年同大学院博士課程。1999年理化学研究所BMC JRA配属。2000年JST研究領域グループメンバーを経て、現在NTTコミュニケーション科学基礎研究所リサーチアソシエイト。博士(情報理工学)。生体工学, 人間の知覚特性に基づくヒューマンインタフェースなどの研究に従事。

前田 太郎 (正会員)



1987年東大・工・計数工卒。工学博士。同年通産省工業技術院機械技術研究所。1992年東大・先端研助手, 1994年同大大学院・工助手, 1997年同大大学院・工講師。2002年NTTコミュニケーション科学基礎研究所主幹研究員。人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレレジスタンスの研究に従事。

舘 暲 (正会員)



1973年同大大学院博士課程了。同年同大助手。1975年より通産省工技院機械技術研を経て, 1989年東大・先端科学技術研究センター助教授。1992年同教授。1994年より同大・工・計数工教授。2001年, 同大学大学院・情報理工教授。工学博士。信号処理, 盲導犬ロボット, テレレジスタンスなどの研究に従事。