



眼球運動が触空間知覚に与える影響

Effects of eye movements on tactile spatial perception

松宮一道¹⁾

Kazumichi MATSUMIYA

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3-09, kmat.cogpsy[at]gmail.com)

概要: 外界の中で触覚刺激の位置を特定するために、人の知覚システムは皮膚表面を参照枠とする触覚刺激を外界の参照枠に変換する必要がある。この変換に視覚参照枠が用いられていると考えられているが、眼球運動が触覚位置知覚にどのような影響を与えるかは不明である。本研究は、眼球運動に伴い触覚位置が系統的に誤定位されることを報告する。この結果に基づいて、空間知覚における視覚と触覚の関係について検討する。

キーワード: 触覚、眼球運動、空間定位

1. はじめに

人は能動探索を通して外界の触覚事象を知覚する。外界の中で腕などの身体部位を動かしながら、触覚事象が皮膚上で生じる。腕の上で生じた触覚事象の空間的位置は最初に皮膚表面を参照枠とする皮膚上の触覚受容器によって処理される。しかし、腕が外界の中で動くとき、知覚システムは外界の触覚事象を定位するために皮膚上の位置を現在の腕の姿勢と統合しなければならない。従って、触空間定位（触覚事象の定位）は初期の皮膚表面上の参照枠から身体姿勢を考慮した外界の参照枠への座標変換を必要とする。

ところが、触空間定位に眼球位置のような触覚に直接関係がない参照枠が関わっている。Harrar & Harris (2009)は、知覚される触覚位置が眼球位置の変化に依存してずれることを示した[1]。これは、知覚システムが皮膚上の触覚位置を眼球位置と統合していることを示唆している。この発見は、多感覚統合の標準理論によって説明されている。この理論では、知覚システムはすべての感覚モダリティから得られる空間情報を網膜の参照枠に変換すると考える[2]。実際に、手の到達運動のターゲットが視覚刺激、聴覚刺激、自己受容感覚刺激のどの場合でも、そのターゲットの位置が網膜座標系で符号化されていることが報告されている。手の到達運動のターゲットの位置は網膜座標系を使わなくても肩を中心とする座標系から計算できることを考えると、知覚システムが網膜座標系を使うという事実は驚きである。もし網膜の参照枠がすべての感覚モダリティを通して共通の参照枠であるならば、知覚システムは触覚情報を共通の参照枠に変換するために眼球位置に関する情報

を必要とすると考えられる。この多感覚統合の標準理論はHarrar & Harris (2009)の結果からも支持される[1]。

しかし、眼球運動の様々なタイミングで触覚刺激がどのように定位されるのかは不明である。過去の研究は、触覚刺激や自己受容感覚刺激によって誘導されるサッカード眼球運動を調べているが [3][4][5][6][7]、サッカード時の触空間定位のタイムコースを調べていない。視覚においては、サッカードの開始時間付近に暗黒下で視覚刺激が瞬間呈示されると、その視覚刺激がサッカードの方向へ誤定位される[8][9][10][11]。この誤定位は典型的にはサッカード開始の 100 ミリ秒前から始まり、サッカード開始時にピークとなり、サッカード開始後 100 ミリ秒まで続く[12]。しかし、サッカード時に瞬間呈示された触覚刺激が視覚刺激と同様のタイムコースで誤定位が生じるかどうかは不明である。多感覚統合の標準理論によると、すべての感覚モダリティからの空間情報を知覚的に表象するために、網膜の参照枠が利用される。この理論に基づけば、サッカード時の触空間定位のタイムコースはサッカード時の視空間定位のタイムコースと同じになることが予想される。本研究では、この仮説を検証した。

2. 実験方法

実験 1 では 17 名の実験参加者が、実験 2 では 16 名が、実験 3 では 15 名が参加した。本実験は、東北大学情報科学研究科倫理委員会により承認された。すべての実験参加者が右利きだった。

触覚振動子 (Vibro Transducer Vp216, Acoupe Laboratory) が触覚刺激を呈示するために用いられた (図 1)。触覚振動



図 1: 実験に使用した触覚振動子(右)と知覚された触覚刺激の位置を応答するためのトラックボール(左)。

は、100Hz の時間周波数をもつ正弦波で、実験参加者の右手の中指の先端の腹側に 50 ミリ秒間呈示された。触覚振動子は、テーブルの上に固定された平坦なスポンジに置かれた。実験参加者は、右手の中指の先端を触覚振動子の上に置き、手全体をスポンジの上に置いた。触覚刺激の位置に関する手がかりを与える振動による音を遮蔽するために、参加者はヘッドホンを装着して白色ノイズを聞いた。

参加者はまたヘッドマウントディスプレイ (HMD; Tobii VR Integration based on the HTC Vive) を装着し、HMD を通して視覚刺激を見た[13]。この HMD は眼球運動測定器を備えており、120Hz のサンプリングレートで参加者の視線位置を計測した。HMD の周囲は黒いカバーで覆われ、周囲の視覚刺激は見えなかった。また、HMD はカスタマイズされたヘッドレストによって固定されていた。参加者は HMD を通して灰色の面を見ており、参加者自身の手と触覚振動子を見ることはできなかった。触覚振動子は灰色の面の中央に配置された。灰色の面は、実験参加者が手を置いたテーブルと空間的に重なっていた。さらに、赤い固視点とサッカーターゲットが灰色の面上に呈示された。

実験 1 と 2 では、固視条件と眼球運動条件の 2 つの条件があった。固視条件では、参加者は固視点を固視し続けるように教示された。各セッションは眼球運動のキャリブレーションから始まった。その後、参加者は固視点を凝視しながら、試行の開始ボタンを押した。開始ボタンを押してから 700 ミリ秒から 1700 ミリ秒の間でランダムに選ばれた遅延時間の後、触覚刺激が 50 ミリ秒間呈示された。触覚刺激の呈示された 200 ミリ秒後、赤い垂直ポールが仮想空間内に呈示され、参加者はこの垂直ポールをトラックボールで動かすことで触覚刺激が知覚された位置を指し示した。参加者の視線は試行中モニターされており、参加者の視線が最初の固視位置から ± 2 度の範囲内に維持されなかった場合、その試行はデータ分析から除外された。

眼球運動条件では、参加者は右方向あるいは左方向へサッカー眼球運動を行うように教示された。各セッションは眼球運動のキャリブレーションから始まり、その後、参加者は固視点を凝視しながら試行の開始ボタンを押した。開始ボタンを押してから 700 ミリ秒から 1700 ミリ秒の間でランダムに選ばれた遅延時間の後、固視点が消え、サッカーターゲットが呈示された。参加者はできるだけすぐにサッカーターゲットに向かってサッカー眼球運動を行った (実験 1 では 20 度のサッカー、実験 2 では 12 度のサッカー)。触覚刺激が 50 ミリ秒間呈示された。触

覚刺激呈示のタイミングは、サッカーの開始時間に対して、13 種類のタイミング ($\pm 533, \pm 444, \pm 356, \pm 267, \pm 178, \pm 89, 0$ ミリ秒) からランダムに選ばれた。触覚刺激のタイミングは、直前の過去 4 回分の試行の平均サッカー開始時間に基づいて決められた[14][15]。この平均サッカー開始時間は意図したタイミングに触覚刺激を効率的に呈示するために用いられただけで、データ分析のときにはサッカー開始に対する触覚刺激呈示タイミングを指定するために実際のサッカー開始時間を用いた。サッカーターゲットは、固視点が消えてから 800 ミリ秒後に消えた。その後、赤い垂直ポールが仮想空間内に呈示され、参加者はこの垂直ポールをトラックボールで動かすことで触覚刺激が知覚された位置を指し示した。

サッカーの遅延時間が 100 ミリ秒よりも短く、800 ミリ秒よりも長い場合、サッカーターゲットが呈示される前にサッカーを行った場合、サッカーターゲットが呈示された位置と反対方向にサッカーを行った場合、サッカーの振幅が 5 度未満の場合、それらの試行は分析から除外された。

3. 実験結果と考察

3.1 実験 1

固視条件では、仮想空間内で右 10 度あるいは左 10 度の位置に固視点が呈示された。触覚刺激の水平位置が眼球位置と同じ方向にずれた。右 10 度の固視点を凝視したときは中央に呈示された触覚刺激は右方向にずれた位置に知覚され、左 10 度の固視点を凝視したときは中央に呈示された触覚刺激は左方向にずれた位置に知覚された。これらの結果は過去の研究を再現していた[1]。一方、触覚刺激の垂直位置については眼球位置の影響を受けなかった。

眼球運動条件では、固視条件で左固視時と右固視時の定位置ずれを平均した値を基準にした。左方向のサッカーのときは、仮想空間内で右 10 度の位置に呈示された固視点から左 10 度の位置に呈示されたサッカーターゲットに向かってサッカーを行った。サッカーを開始する 500 ミリ秒前は、固視条件の右 10 度の固視点に凝視したときの知覚位置に向かって、触覚刺激の水平知覚位置がずれた。それ以降のタイミングからサッカー開始の 250 ミリ秒前までは、固視条件の左 10 度の固視点を凝視したときの知覚位置に向かって、触覚刺激の水平知覚位置がずれた。サッカーターゲットが呈示された後、触覚刺激の水平知覚位置は固視条件の左 10 度の固視点を凝視したときの知覚位置の方へずれたままだった。このずれはサッカー開始 500 ミリ秒後まで続いた。右方向のサッカー時の触空間定位のタイムコースは、ずれの方向が反転することを除けば、左方向のサッカー時の結果と同じだった。

3.2 実験 2

実験 1 では、各セッションで、サッカーの方向が固定されていた。そのため、サッカー方向に触空間定位がず

れるバイアスが形成されていた可能性がある。このバイアスを除去するために、実験 2 ではサッカード方向が試行ごとにランダムに決定された。

実験 2 の眼球運動条件の結果は、実験 1 の眼球運動条件の結果と類似していた。たとえサッカード方向がセッションを通して固定されていなくても、サッカードを開始する 500 ミリ秒前から、サッカード方向に触空間定位がずれ始め、それ以降はサッカード開始 500 ミリ秒後までサッカード方向へずれ続けた。

3.3 実験 3

実験 3 では、触空間定位における注意の影響を調べた。実験 1 と 2 の結果は、サッカードターゲットに向かう注意が影響していた可能性がある。この可能性を調べるために、参加者は仮想空間内の灰色の面の中央を凝視した状態で実験 2 と同じ実験を行った。実験 2 の状況では、灰色の面の中央に対して右 12 度か左 12 度の位置にサッカードターゲットが呈示されたため、この呈示が参加者の注意を引きつける手がかりとなる。しかし、注意の手がかりが呈示されても、触空間定位はほとんどずれることはなかった。

4. むすび

本研究は、サッカード眼球運動が触空間定位に与える影響を調べた。サッカードの開始前からサッカード方向に触空間定位がずれ始めることが明らかになった。このずれは、サッカードを同方向に繰り返し行うことによるバイアスや注意の効果では説明できなかった。これらの結果は、触空間知覚が眼球運動に依存していることを示唆する。

本研究の結果は、サッカード時の触空間定位のタイムコースがサッカード時の視空間定位のタイムコースと異なることを示している。触空間定位はサッカード開始 500 ミリ秒前からずれ始め、サッカード開始 500 ミリ秒後まで続いた。一方、視空間定位は、通常、サッカード開始 100 ミリ秒前からずれ始め、サッカード開始 100 ミリ秒後まで続くことが報告されている。従って、サッカード眼球運動は触覚と視覚で異なった効果をもたらすことが示唆される。この結果は多感覚統合の標準理論を支持しない。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP24K21492、JP21K12102 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Harrar V, Harris L R, 2009 "Eye position affects the perceived location of touch" *Exp Brain Res* **198** 403-10
- [2] Pouget A, Deneve S, Duhamel J R, 2002 "A computational perspective on the neural basis of multisensory spatial representations" *Nat Rev Neurosci* **3** 741-7
- [3] Amlot R, Walker R, Driver J, Spence C, 2003 "Multimodal visual-somatosensory integration in saccade generation" *Neuropsychologia* **41** 1-15
- [4] Blanke O, Grusser O J, 2001 "Saccades guided by somatosensory stimuli" *Vision Res* **41** 2407-12
- [5] Groh J M, Sparks D L, 1996 "Saccades to somatosensory targets. I. behavioral characteristics" *J Neurophysiol* **75** 412-27
- [6] Matsumiya K, 2022 "Multiple representations of the body schema for the same body part" *Proc Natl Acad Sci U S A* **119**
- [7] Naffrechoux M, Koun E, Volland F, Farne A, Roy A C, Pelisson D, 2024 "Eyes and hand are both reliable at localizing somatosensory targets" *Exp Brain Res* **242** 2653-2664
- [8] Dassonville P, Schlag J, Schlag-Rey M, 1995 "The use of egocentric and exocentric location cues in saccadic programming" *Vision Res* **35** 2191-9
- [9] Honda H, 1989 "Perceptual localization of visual stimuli flashed during saccades" *Percept Psychophys* **45** 162-74
- [10] Mateeff S, 1978 "Saccadic eye movements and localization of visual stimuli" *Percept Psychophys* **24** 215-24
- [11] Matin L, Matin E, Pearce D G, 1969 "Visual perception of direction when voluntary saccade occur: I. Relation of visual direction of fixation target extinguished before a saccade to a flash presented during the saccades." *Perception and Psychophysics* **5** 65-80
- [12] Honda H, 1991 "The time courses of visual mislocalization and of extraretinal eye position signals at the time of vertical saccades" *Vision Res* **31** 1915-21
- [13] Tachibana R, Matsumiya K, 2022 "Accuracy and precision of visual and auditory stimulus presentation in virtual reality in Python 2 and 3 environments for human behavior research" *Behav Res Methods* **54** 729-751
- [14] Matsumiya K, Uchikawa K, 2001 "Apparent size of an object remains uncompressed during presaccadic compression of visual space" *Vision Res* **41** 3039-50
- [15] Matsumiya K, Uchikawa K, 2003 "The role of presaccadic compression of visual space in spatial remapping across saccadic eye movements" *Vision Res* **43** 1969-81