

# 視覚探索におけるサッカードの自動的制御

十河 宏行  
武田 裕司

独立行政法人産業技術総合研究所  
人間福祉医工学研究部門

指定された位置にサッカードを行う時に、視線を向けないよう抑制された領域がサッカード軌道の近傍に存在すると、サッカードの軌道がその領域を避けるように曲がるということが知られている。このような自動的な眼球運動制御が逐次的な視覚探索中にも行われているかを検証するため、ランダムに配置された 16 個のアイテムの中からターゲットの有無を判断する課題遂行中の眼球運動を記録した。サッカード軌道の曲がり具合と過去の注視位置の関係を分析した結果、過去の注視点を避ける方向に軌道が曲がるということが明らかになった。また、この効果は直前の注視位置について顕著で、2 個前、3 個前の注視位置に遡るにつれて弱くなり、4~5 個以上前の注視位置ではほぼ消失することが示された。

Keywords: visual search, inhibition of return, saccade trajectory.

## 問題・目的

指定された位置にサッカードを行う時に、指定された位置以外に視線を向けないように抑制されている領域が存在すると、その領域を避けるようにサッカードの軌道が曲がるということが知られている(Sheliga, Riggio, & Rizzolatti, 1995)。しかし、被験者が自発的にサッカードの目標位置を選択できる状況においてもサッカード軌道の曲がり具合が起るか否かは明らかではない。本研究では、逐次的な視覚探索中に行われるサッカードの軌道の曲がり具合を測定し、探索中に一度注視した対象への抑制との関連を検討した。

## 方法

KY、HS、MS、YTの四名が被験者として実験に参加した。被験者の課題はCを0度、90度、180度、270度回転させた図形の中にOが含まれていればキーボードの"0"キーを、含まれていなければスペースキーを押すことであった。刺激のセットサイズは16に固定し、全試行の50%の試行においてOを提示した。刺激が提示されてから被験者がキーを押すまでの被験者の眼球運動を、Eyelink II (SR Research製)を用いて測定した。

## 結果

### 定性的な分析

ターゲット(O)がある試行では3.5~5.9回、ターゲットが無い試行では7.2~12.5回のサッカードが記録された。過去に注視した位置とサッカード軌道の関係を知るためには1試行あたりのサッカード回数が多いほうが有利なため、以後の分析ではターゲットが無い試行のみを対象とした。

サッカード軌道の曲がり具合を定量的に評価するため、軌道のarea curvatureを計算した(Figure 1, see Ludwig and Gilchrist, 2002)。軌道の曲がり具合と過去に注視した位置の関係を概観するため、サッカード長が1、方向が右に水平なるように軌道を正規化し、それに合わせ

て過去に注視した位置をスケーリングして重ね合わせた。Aは負、Bは正のarea curvatureを持つサッカードについて過去の注視点を重ね合わせた図である。AからBを減算すると、Figure 2Cが得られる。赤い領域はサッカードが負のarea curvatureを持つときに過去の注視点が多く存在していた領域、青い領域はサッカードが正のarea curvatureを持つときに過去の注視点が多く存在していた領域を示している。Figure 2Cより、過去の注視点が多く存在している領域を避ける方向に軌道が曲がる傾向にあることがわかる。

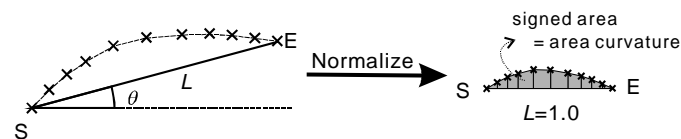


Figure 1. Definition of area curvature. S and E: the start and end point of the saccade. L: saccade length.  $\theta$ : saccade direction.

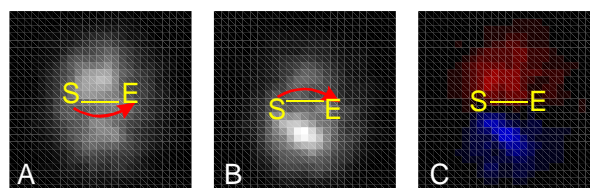


Figure 2. Qualitative analysis of the relationship between saccade trajectory and previous fixations. A: Distribution of previous fixations for saccades with negative area curvature. B: Distribution of previous fixations for saccades with positive area curvature. C: Difference between A and B.

### 重回帰による定量的な分析

Figure 2の分析は、サッカード軌道の曲がり具合と過去の注視点の分布の関係を定性的に示している。しかし、サッカードの方向なども軌道の曲がり具合に影響を与えることが知られており(Viviani, Berthoz & Tracey, 1977)、過去に注視した位置を避ける効果が観察された軌道の曲がり具合にどの程度寄与しているか明らかではない。こ

の問題を解決するため、以下のモデルを用いて過去に中止した位置を避ける効果と軌道の曲がりの大きさの関係を検討した。

$$\kappa = C + q_1 \sin(q_2 \theta + q_3) + \sum_{i=1}^8 w_i f(FX_i, FY_i) \quad (1)$$

$$f(x, y) = G(x - m_x, y - m_y, s_x, s_y) - G(x - m_x, y + m_y, s_x, s_y) \quad (2)$$

Gは平均と標準偏差が $(m_x, m_y)$ 、 $(s_x, s_y)$ の2次元Gauss分布である。 $\kappa$ はarea curvature、 $\theta$ はサッカド方向、 $(FX_i, FY_i)$ は*i*個前の注視点の位置を表している。式(1)右辺第1項はパイアス、第2項はサッカド方向による効果を示している。第3項は過去の注視点位置の効果を表しており、現在の注視点の周囲に*f*(式(2))で表現されるフィールドが存在し、過去の注視点がこのフィールド内にあった場合に*f*の値に応じて軌道を曲げる作用が起こることを仮定している。 $w_i$ は何個前の注視点かによって効果の強さが変わることを仮定している。 $C$ 、 $q_{1-3}$ 、 $w_i$ 、 $(m_x, m_y)$ 、 $(s_x, s_y)$ がパラメータである。非線形回帰によってこれらのパラメータを推定した結果をFigure 3に示す。Figure 3Aおよび3Bはそれぞれ推定された*f*(式(2))と $w_i$ の平均を示している(但し $w_i$ は被験者毎に $w_{1-8}$ の標準偏差で正規化してから平均している)。過去の注視点からの効果はより以前の注視点に遡るにつれ指数的に減衰し、約3個前の注視点まで効果が持続することがわかった。3個前の注視が終了する時刻を計算すると、サッカド開始から600~750msであった。この時間特性は復帰抑制とサッカド軌道の曲がりをspatial cueing課題を用いて調べたGodijn & Theeuwes (2004)の結果と一致する。Figure 3Dは回帰の成績を $R^2$ 値で評価したものである。図の”Direction + fixation”と表記されたバーが式(1)を用いて回帰した結果を示している。”Direction only”と表記されたバーは、比較のために式(1)の第3項を除いて(すなわちサッカド方向の効果のみで)回帰した時の成績を示している。”Direction + Fixation”の $R^2$ 値は”Direction only”の $R^2$ 値に対して0.09~0.17高かった。この結果は、過去の注視点の効果(式(1)第3項)によってarea curvatureの分散の9~17%を説明出来ることを意味している。

## 考察

今回の実験から、逐次的な視覚探索中のサッカド軌道は前に注視した位置を避ける方向に曲がること示された。この結果は、直前に注視した対象に再び注意を向けないように抑制するシステムが、サッカドの軌道という眼球運動制御のダイナミックな側面に影響を与えることを示している。

視覚探索中に生じる一度注視した対象への抑制は復帰抑制の一種であると考えられている。弁別課題における復帰抑制の効果が現れるまでには約700msを要す

ことから(Lupiañez, Milán, Tornay, Madrid, & Tudela, 1997)、今回の実験で確認された抑制効果は復帰抑制の立ち上がりと入れ替わるように減衰していることになる。サッカド軌道の曲がりを生む抑制システムと復帰抑制は、相補的に視覚探索中の眼球運動制御に関わっている可能性が考えられる。

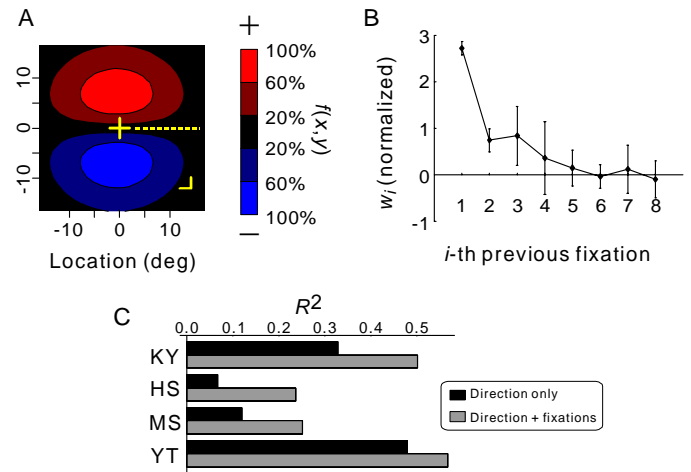


Figure 3. Performance of the model. A: estimated  $f(x,y)$ , average of four participants. Yellow cross and horizontal dotted line represent the start point and direction of saccade, respectively. B: estimated  $w_i$ , average of four participants. Note that the value was normalized by standard deviation of  $w_{1-8}$  before averaging. C: performance of the model. See text for definition of “Direction only” and “Direction + fixations”.

## 引用文献

- Lupiañez, J., Milan, E. G., Tornay, F. J., Madrid, E., & Tudela, P. (1997). Does IOR occur in discrimination task? Yes, it does, but later. *Perception & Psychophysics*, 59, 1241-1254.
- Ludwig, C. J. H. & Gilchrist, I. D. 2002 Measuring saccade curvature: a curve-fitting approach. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 34, 618-624
- Godijn, R., & Theeuwes, J. 2004 The relationship between inhibition of return and saccade trajectory deviations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30, 538-554
- Sheliga, B. M., Riggio, L., & Rizzolatti, G. 1995 Spatial attention and eye movements. *Experimental Brain Research*, 105, 261-275
- Viviani, P., Berthoz, A., & Tracey, D. (1977). The curvature of oblique saccades. *Vision Research*, 17, 661-66