視標追従時の眼球運動に関するスムーズ性評価

○甲斐 晶(関西大学大学院工学研究科)、堀井 健、小谷 賢太郎(関西大学工学部)

Evaluation of the smoothness of smooth pursuit on eye trajectories in tracking a visual target

Akira KAI (Graduate School of Engineering, Kansai Univ.),
Ken HORII, Kentaro KOTANI (Faculty of Engineering, Kansai Univ.)

1.はじめに

人が運動視標を眼でもって追跡する時、視標速度の速い場合、その眼球運動はサッケード運動のみであり、ある速度範囲においてはスムーズ運動となり、ある速度以下になると再びサッケード運動のみという状況になる。この二つの随意性眼球運動はその発現において深く関わりがあり、その境界値を求めることは人の運動視標に対する認知・制御メカニズムを知る上でも有意義である。しかしながら、これまでにそれらの境界値は明確に求められてきていない。いいかえると、スムーズ性の評価法が確立されていたとは言えない。

スムーズ性の評価方法には、Dodge¹⁾、渡辺²⁾、堀井³⁾らをはじめ多くの研究者によって種々の方法が提案されてきているが、定義が曖昧だったり、上・下限界速度値の内の片方にしか適用できないといった状況であった。石井⁴⁾によって提唱された跳躍率と速度追従率とを同時に考慮したスムーズ性の評価法は、Schalen⁵⁾、Robinson⁶⁾、Collewijn⁷⁾らの方法の中から、ゲイン利得と速度利得とを利用したものであり、広い範囲の速度域にも適用できる。しかしこの評価法でもって現在に至るまで、スムーズ性の評価が十分に行えなかった原因のひとつに、dual mode tracking時のサッケード運動検出の精度不足があった。

そこで本研究では、精度の高いサッケード運動の検出を基軸とし、広範囲の速度域に適用できると考えられる跳躍率と速度追従率とを用いたスムーズ性評価法の再検討を行い、これよりスムーズ性の評価基準ならびに境界値である上・下限界速度値を求めている。

2.スムーズ性の評価法

スムーズ性を評価するにあたり、以下に示す三つの評価値を用いた。

2-1 跳躍率⁴⁾

視線軌跡よりサッケード運動を検出するための条件には、長田⁸⁾が提唱した眼球の加速度を主体とした検出条件を用いた。表1にその条件を示す。

表1 サッケード運動検出条件

サッケード運動開始条件	サッケード運動終了条件
1. 第n+1点 1300[deg/sec ²]以上	1. 第n点 2000[deg/sec ²]以下
2. 第n+2点 3000[deg/sec ²]以上	2. 第n+1点 2000[deg/sec ²]以下
3. 第n+3点 5000[deg/sec ²]以上	3. 第n+1点 100[deg/sec]以下
以上の3つの条件を満たす第n点目をサッケード運動開始点とする	以上の3つの条件を満たす第n点目をサッケード運動終了点とする

跳躍率は視線軌跡に含まれるサッケード運動の割合を表すもので、

$$\text{跳躍率}[\%] = \frac{\text{処理区間内の跳躍成分の総和量}[\text{deg}]}{\text{処理区間内の移動量}[\text{deg}]} \times 100$$

と定義される。跳躍率が0[%]に近いほど、眼球は視標を忠実に追跡していることになる。

2-2 速度追従率⁴⁾

速度追従率は眼球の追従速度をもってスムーズ性を評価しようとするもので、

$$\text{速度追従率}[\%] = \frac{\text{スムーズ部分の平均速度}[\text{deg/sec}]}{\text{視標速度}[\text{deg/sec}]} \times 100$$

と定義される。速度追従率が100[%]に近いほど、眼球は視標を忠実に追従していることになる。

2-3 位置補正率

図1に視標振幅20[deg]、点灯割合50[%]、提示間隔1[deg]ならびに視標速度4[deg/sec]という低速度域に相当する仮現運動視標を追従した時に得られた視線軌跡の一例を示した。

図1 視線軌跡

図2 視線軌跡拡大図

この視線軌跡において、ところどころ眼振に類似するような部分が散見されるが、この部分を除けば視標をスムーズ運動で追従しているとみなされる。眼振に類似する部分を図2のように拡大してみると、視標の移動方向とは逆方向に跳躍する小さなサッケード運動であることがわかる。これは眼球が低速度の視標を追従するとき、眼球の追従速度の方が視標速度よりも速くなるために生じるものであり、眼球を視標に合わせようとする眼球位置補正のための運動である。この眼球位置補正のための運動は視標速度が遅くなればなるほど、その発現頻度が高くなる。ゆえに、低速度域での追従運動においては、上述の跳躍率と速度追従率からだけではスムーズ性の評価が不十分である。この発現頻度に注目し、次のような位置補正率を定義した。

$$\text{位置補正率}[\%] = \frac{\text{スムーズ運動中の眼球位置補正に費やす時間}}{\text{スムーズ運動の時間}} \times 100$$

跳躍率と速度追従率は各々サッケード運動とスムーズ運動の両面よりスムーズ性の評価を行おうとしたものであり、低速度域における位置補正率とあわせて、全速度域のスムーズ性評価が可能となる。

3. 実験結果

3-1 実験装置および実験条件

実験装置には SMI 社製アイリンクシステムを用いた。サンプリング周波数は 250Hz である。仮現運動視標の運

動波形として三角波を用いた。被験者は視力良好な大学生三名である。

3-2 視線軌跡

図3および図4に視標振幅 10[deg]、点灯割合 90[%]、提示間隔 1[deg]という条件の仮現運動視標を追従した時に得られた視線軌跡を示し、図中の表2と表3に、そのときの跳躍率、速度追従率、位置補正率の値を示した。

表2 解析結果(視標速度 4(deg/sec))

	跳躍率(%)	速度追従率(%)	位置補正率(%)
(1)	52.70	38.11	23.85
(2)	14.40	79.94	1.30
(3)	41.01	54.04	13.90

図3 視線軌跡(視標速度 4(deg/sec))

表3 解析結果(視標速度 6(deg/sec))

	跳躍率(%)	速度追従率(%)	位置補正率(%)
(1)	15.05	100.29	1.47
(2)	0.00	101.11	0.72
(3)	34.40	75.95	2.82

図4 視線軌跡(視標速度 6(deg/sec))

図3の視線軌跡は部分的にサッケード運動とスムーズ運動を交互に繰り返すという状況を示している。図4の視線軌跡は視標の運動が反転する位置、すなわち、最大振幅近傍で視標運動の不連続性により必然的にサッケード運動となるが、その他のところではほぼスムーズ運動である。

3-3 評価基準

運動視標の属性(視標速度、視標振幅、点灯割合、提示間隔)を種々変化させた時に得られた視線軌跡より、上述のように、跳躍率、速度追従率、位置補正率の値を求め、視線軌跡自体のスムーズ性に対する目視判定と被験者自身のスムーズ性に対する内観結果とを統合し、表4に示す評価基準を定めた。

表4 スムーズ性評価基準

跳躍率	30[%]以内
速度追従率	100±20[%]の範囲内
位置補正率	5[%]以内(低速度域のみ適用)

3-4 上・下限界速度

表4の評価基準のもとで、視標の属性(視標振幅、点灯割合、提示間隔)と上・下限界速度との関係を求めると図5～図10が得られた。

視標振幅値が大きくなると上限界速度値は大きくなり(図5)、下限界速度値に対しては影響はほとんどないことがわかる(図8)。この結果は、視標振幅の変化が上限界速度に大きく影響を及ぼす³⁾ということに一致した。

図6および図9より、点灯割合の値が増加しても上限界速度に対する影響はほとんどなく、下限界速度値は少し増加することがわかる。この結果は、点灯割合の値は下限界速度値に対して大きく影響を及ぼし、上限界速度値に対してはほとんど影響を及ぼさない⁴⁾ということに一致した。

図7より、提示間隔の変化による上限界速度値への影響

はほとんどないことがわかる。この結果は、提示間隔の値が大きくなると上限界速度値は降下する³⁾という報告とは一致しない。

図10より、提示間隔値が大きくなると下限界速度値も大きくなっていることがわかる。すなわち、下限界速度値は提示間隔の値に大きく影響を受ける。このことは、下限界速度値は視標の提示間隔に依存するという報告⁴⁾と一致した。

図5 視標振幅と上限界速度の関係

図8 視標振幅と下限界速度の関係

図6 点灯割合と上限界速度の関係

図9 点灯割合と下限界速度の関係

図7 提示間隔と上限界速度の関係

図10 提示間隔と下限界速度の関係

4. まとめ

- ① スムーズ性評価基準として、跳躍率、速度追従率、位置補正率を定めた。
- ② 仮現運動視標追従時におけるスムーズ運動の限界速度に関して、視標の高速度域においては視標振幅が大きく影響していることがわかった。また、提示間隔は上限界速度にはほとんど影響を及ぼしていないことがわかった。
- ③ 低速度域においては、眼球は位置補正を行いつつながら視標を追従しており、そのときのスムーズ運動の限界値には提示間隔が大きく影響していることがわかった。

参考文献

- 1) Dodge. R : Optic Nystagmus, Arch. Neurol and Psychiat., 23, pp21-34, 1930
- 2) 渡辺 敏 : 眼球運動の制御機構, NHK 技術研究 pp20-42, 1966
- 3) 堀井 健 : 眼球運動におけるスムーズ性の一判定法, Human Interface vol.5, pp61-64, 1990
- 4) 石井 英雄 : 随従性速度特性から見た眼球運動制御系、関西大学大学院修士論文, 1987
- 5) Lucyna Schalen : Quantification of tracking eye movements in normal subjects, Acta Otolaryng. 90, pp404-413, 1980
- 6) D.A Robinson, et al : The upper limit of human smooth pursuit velocity, Vision Research, vol.25, pp561-563, 1985
- 7) H. Collewijn : Human smooth and saccadic eye movements during voluntary pursuit of different target motion on different background, J. physiol. 351, pp217-250, 1984
- 8) 長田 卓也、河野 智弘 : サッケード運動の検出条件の再考ならびに持続時間を考慮したサッケード運動シミュレーション、関西大学卒業論文, 1999