

Title	Stochastic Physiological Gaze-evoked Nystagmus in Healthy People During Fixational Eye Movements at Small Gaze Eccentricities: Characterization of Gaze Dynamics and Neuromechanical Modeling
Author(s)	Ozawa, Makoto
Citation	大阪大学, 2022, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/89651
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (小澤 誠)	
論文題名	Stochastic Physiological Gaze-evoked Nystagmus in Healthy People During Fixational Eye Movements at Small Gaze Eccentricities: Characterization of Gaze Dynamics and Neuromechanical Modeling (健常者における小角度水平偏心視標固視中の確率的な生理的注視誘発眼振：視線動態の定量化とニューロメカニカルモデリング)
論文内容の要旨	
<p>本論文の目的は、健常者における視標固視中の眼球姿勢維持の脳神経制御メカニズムを明らかにすることである。特に、大角度水平偏心視標固視中にしばしば発生することが知られている生理的注視誘発眼振と、小角度水平偏心視標固視中の視線ゆらぎ（固視微動）を対比し、両者の関係性を通じて、眼球姿勢維持の脳神経制御メカニズムに迫った。まず、小角度水平偏心視標固視中の固視微動を計測し、その水平偏心固視位置依存性を定量化した。その結果、小角度水平偏心視標固視中の固視微動に含まれるドリフト（ブラウン運動様の眼球運動成分）は、水平偏心固視点から顔中心方向に向かう一方向性（求心性）の線形トレンドを呈することを明らかにした。また、固視微動に含まれるマイクロサッケード（弾道的な眼球運動成分）は求心性ドリフトのトレンドを打ち消すように、その振幅と発生頻度を変調させていることを明らかにした。すなわち、小角度水平偏心視標固視中の視線はマイクロサッケードの合間に、あたかも常に正面を向いた準安定平衡姿勢が存在するかのように、求心的なドリフトによって正面に向かって非常にゆっくりと緩和する一方で、遠心性のマイクロサッケードの働きによってドリフトと反対方向に間欠的に目標位置へ引き戻され、これら双方のバランスによって確率的な注視誘発眼振の性質を有する小角度水平偏心視標の固視が実現されていることが示された。次に、健常者の小角度水平偏心視標固視中の固視微動および生理的注視誘発眼振の視線動態特性を再現する数理モデルを構築することで、視標固視中の眼球姿勢維持の脳神経制御メカニズムを探究した。ヒト眼球運動系の機械力学的パラメータに関する先行研究を精査し、前述の求心性ドリフトと遠心性マイクロサッケードの動態を定量的に再現することのできる外眼筋モデルとそれを駆動する神経モデルから成るニューロメカニカルモデル（確率微分方程式モデル）を構築することに成功した。こうして得られた眼球姿勢のメカニカルモデルを制御するマイクロサッケード生成の構成論的モデルを用いることで、健常者の小角度水平偏心視標固視中の視線動態を再現する計算機実験を行った。その結果、上述した視線動態の再現には、顔正面位置というよりは、水平偏心した真の目標点よりも少しだけ内側（正面位置側）に擬似的目標点が存在しなければ（設定されなければ）ならないことが明らかになった。すなわち、目標点の固視よりも少し達成が容易な（lazyな）擬似的目標点が存在し、そこへ緩和する眼球姿勢を真の目標点を指向したマイクロサッケードにより修正することで、小角度水平偏心視標固視とそれに伴う固視微動が実現されている可能性が計算論的にも示唆された。以上の結果は、従来から独立した現象と見做されていた固視微動と生理的注視誘発眼振が、同一の神経制御機構によって生成される現象として統合的に理解できる可能性を示唆するものである。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 澤 誠)	
	(職) 氏 名
論文審査担当者	主 査 教 授 野村 泰伸
	副 査 教 授 清野 健
	副 査 教 授 大城 理

論文審査の結果の要旨

所望の対象物を固視すること、すなわち、対象物に視線が維持されるように眼球姿勢を一定に保つ運動制御は、正確な視覚情報の取得を実現するために必要な重要な生体機能である。本論文は、大角度水平偏心視標固視中に発生することが知られている生理的注視誘発眼振と、小角度水平偏心視標固視中の固視微動を比較・検討することを通じて、眼球姿勢維持の脳神経制御メカニズムに迫った。まず、小角度水平偏心視標固視中の固視微動が計測され、その水平偏心固視位置依存性が定量化された。その結果、小角度水平偏心視標固視中の固視微動に含まれるブラウン運動様の眼球運動成分であるドリフト成分は水平偏心視標位置から顔中心に向かう一方向的求心性の線形トレンドを呈することが明らかにされた。一方、固視微動に含まれる弾道的眼球運動成分であるマイクロサッケードは、求心性ドリフトのトレンドを打ち消すように、その振幅と発生頻度に変調されていることが明らかにされた。すなわち、目標姿勢に対する眼球姿勢維持は、目標姿勢からのズレを時々刻々と連続的に修正するような標準的位置(P)・積分(I)・微分(D)制御によっては達成されてはならず、ポアソン点過程に従って確率的に決まる時間間隔内における求心性ドリフトによる偏差の持続的な増大を許容しつつ、間欠的・インパルス的に発生するマイクロサッケードによって偏差を補正するような間欠制御によって達成されていることが示された。以上の定量化において、求心性ドリフトによる顔正面に向かうある種の緩和過程は、200秒を超えるゆっくりと緩和時定数を有することが明らかにされた。この異常に大きな時定数を有する緩和過程の生成メカニズムを明らかにすることを主要な目的として、小角度水平偏心視標固視中の固視微動ないし生理的注視誘発眼振の視線動態特性を再現する数理モデルが構築された。まず、ヒト眼球運動系の機械力学的パラメータに関する先行研究を精査することで眼球姿勢のメカニカルモデルが構築された。次に、眼球姿勢を修正するマイクロサッケード生成の構成論的モデルを用いることで、健常者の小角度水平偏心視標固視中の視線動態を再現するモデルが構築された。構築モデルの動態シミュレーションとパラメータ探索の結果、実験的に得られた小角度水平偏心視標固視中の視線動態は、モデルが呈する求心性ドリフトが緩和する平衡姿勢が、顔正面位置ではなく、水平偏心した真の目標点よりも少しだけ内側（正面位置側）に擬似目標点として存在する場合に、精度良く再現されることが示された。これらの小角度水平偏心視標固視中の固視微動の実験的および計算論的解析結果は、従来から独立した現象と見なされて来た固視微動と生理的注視誘発眼振が、同一の神経制御機構によって統合的に説明できる可能性を示唆するものであり、眼球運動制御の研究分野における画期的成果であると考えられる。以上のことから、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。