

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	衝動性眼球運動・滑動性眼球運動・前庭動眼反射を統合的に実現可能な両眼視覚制御システム
Title	Binocular motor control system integrating Saccade, Smooth Pursuit and VOR
著者	米山 諒
Author	Ryo Yoneyama
掲載誌/書名	ロボティクス・メカトロニクス講演会2013, , ,
Journal/Book name	ROBOMECH2013 IN TSUKUBA, , ,
発行日 / Issue date	2013, 5
URL	http://www.jsme.or.jp/publish/transact/index.html
権利情報 / Copyright	本著作物の著作権は日本機械学会に帰属します。
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

衝動性眼球運動・滑動性眼球運動・前庭動眼反射を 統合的に実現可能な両眼視覚制御システム

Binocular motor control system integrating Saccade, Smooth Pursuit and VOR

教 張 曉林 (東工大) 〇学 米山 諒 (東工大)

Xiaolin Zhang, Tokyo Institute of Technology, zhang@pi.titech.ac.jp
Ryo YONEYAMA, Tokyo Institute of Technology, yoneyama@ipr.pi.titech.ac.jp

In recent years, expectations for mobile robots and humanoid robots which work in the human living environment is growing. Such a robot needs vision system to obtain information about the outside world. However, in traditional vision system, it is difficult to obtain information stably. On the other hand, humans solve this problem by information processing and eye movement characteristics of retina. We tried to realize a behavior of human eye movement by making binocular control model based on physiology and anatomy. However, in traditional model, the accuracy of Saccade is insufficient and there is a possibility of runaway. The purpose of this study is to propose a new method of Saccade and a binocular control model integrating Smooth Pursuit, VOR and Saccade. In addition, by implementing proposed model in binocular robot, we confirm the superiority of proposal model.

Key Words: Biomechatronics, Biomimetics, Robot Vision, Eye movement, Binocular motor system

1. はじめに

近年、人間の生活環境下において、人型ロボットや移動ロボットに対する期待が高まっている。このようなロボットには外界の情報を得るための視覚システムが必要である。しかし、従来の視覚システムでは、ロボットが動いた時に生じるブラーなどの影響により、外界の情報を安定して取得することは難しい。一方でヒトは、頭部が揺れる歩行中でも、安定して視標を注視することや、その状態からすぐさま別の視標に視線を切り替えることが可能であり、網膜情報処理・眼球運動特性によってこれらの問題を解決しているといえる。

眼球運動の制御機構に関しては、様々な眼球運動システムが提案されているが、単眼を想定したものが多く、また様々な眼球運動を統合的に実現したものは存在しない。そこで我々は、生理学・解剖学的知見に基づいて両眼運動制御モデルを構築することで、ヒトの眼球運動特性を工学システムで実現することを試みてきた。しかし、先行研究では Saccade の精度が十分ではなく、Saccade を繰り返し行うことにより暴走してしまうなど、制御システムとしての安定性が不十分であった。

本研究ではまず、生理学の研究成果を元に、従来の Saccade 手法の問題点を解決した新たな Saccade 手法を提案する。また、提案した Saccade 手法を取り入れることにより、従来の両眼運動制御モデルを拡張し、Saccade, Smooth Pursuit, VOR を統合的に実現可能な新たなモデルを提案する。そして、提案モデルを工学システムとしてロボットに実装し、各種眼球運動に実験を行うことで、提案モデルによって先述の眼球運動が統合的に実現可能であることを示し、その有意性を示す。

2. ヒトの視覚システム

2.1 ヒトの眼球

本節では、ヒトの眼球の構造と機能について述べる。まず、表 1 に眼球の部位とカメラとの対応関係を示す。網膜がカメラと最も異なる点は、視野全体での感度と解像度が一定でないことである。網膜上に並ぶ視細胞には桿体と錐体の 2 種類があり、桿体は薄暗い状態の時、錐体は明るい状態の時に働

くことで様々な明るさに対応している。また、桿体と錐体では吸収する光の波長も異なっている。桿体は波長が 490[nm] の光に対して分光感度のピークを持つものしか存在しないため、明暗の情報を得ることはできるが、色情報を得ることはできない。しかし、錐体は分光感度のピークにより S, M, L の 3 種類が存在するため、色情報を得ることができる。

錐体は視野の中心部に密集するように分布しており、この領域を中心視という。中心視は見ている対象の詳しい情報を得るのに適しているが、中心から約 1.5[deg] という非常に狭い範囲しか見ることができない。

一方、桿体は視野の周辺部に広く分布しており、この領域を周辺視という。周辺視は対象の詳細な情報を得ることはできないが、対象の運動や位置などの情報を得ることができる。ゆえに、対象の詳しい情報を得ようとする場合は、視軸を高速で移動させることにより対象を中心視で捉える必要がある。このときに生じる眼球運動を衝動性眼球運動 (Saccade) と呼ぶ。次節では、こうした眼球運動について述べる。

Table1 Correspondence table of eye and camera

眼球	カメラ	役割・機能
虹彩	絞り	入射する光量を調節する
水晶体	レンズ	焦点距離を調節する
網膜	撮像素子	入射光を電気信号に変換する

2.2 眼球運動の種類

本節では、研究の対象とする眼球運動の概要および、その特徴について述べる。なお、本研究において、眼球運動に関する小脳の学習機能については触れず、提案する制御システムにも学習機能は持たせないものとする。

2.2.1 滑動性眼球運動 (Smooth Pursuit)

運動する視標を中心視で捉え続ける運動として滑動性眼球運動 (Smooth Pursuit) がある。これは網膜により検出された視標と視軸のズレ (網膜誤差) を用いたフィードバック制御にあたる。ヒトにおいて、その最高速度は約 30 [deg/s] であり、これ以上の速度で運動する対象は衝動性眼球運動 (Saccade) と Smooth Pursuit を交互に繰り返し、追従する。

2.2.2 衝動性眼球運動 (Saccade)

Saccade は、空間上に現れた視標を中心視で捉えるために、視軸を高速で動かす眼球運動である。Saccade 生起のトリガーとしては、音や触覚などもあり、記憶された空間内の物体などを対象とすることもできるが、本研究では周辺視内に現れた視標に対するものを Saccade として扱う。なお、Saccade 中は視覚情報が抑制されるため、網膜誤差などの情報を得ることができない。その点において、Saccade はフィードフォワード制御であるといえる。

2.2.3 前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular Reflex:VOR)

ヒトは振動などの外乱により頭部の運動が生じた際、反射的にその方向とは反対の方向に眼球を運動させることにより、網膜像の動揺を防ぐ。この眼球運動を前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular Reflex: VOR) という。なお、VOR は前庭器からの信号による生起される。

2.2.4 共役運動と輻輳運動

左右の眼球が同じ方向に回転する運動を共役運動、逆の方向に回転する運動を輻輳運動と呼ぶ。共役運動と輻輳運動は、他の眼球運動の構成要素として定義されており、すべての眼球運動は共役運動成分と輻輳運動成分に分離することが可能である。また、両眼協調運動の特徴として、輻輳成分は共役成分に比べてより強い協調が働いているため、その動特性は遅くなる。

3. 先行研究

本章では、前章で述べた眼球運動を統合的に実現する両眼運動制御モデルの先行研究について述べる。なお、本論文で用いる記号・座標系は図 2 に示すものを用いることとする。

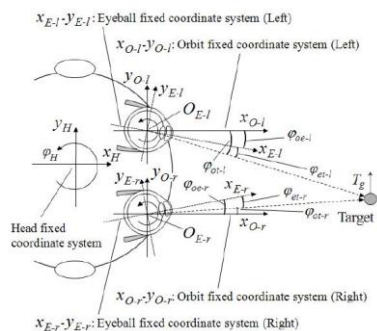


Fig 2 Coordinate system

3.1 Ohguni らによる両眼運動制御モデル

Ohguni らは Saccade の手法を提案し、それと他の眼球運動を統合的に実現可能な両眼運動制御モデル [1] (図 2) を提案した。以下ではこのモデルの特徴およびその問題点について述べる。

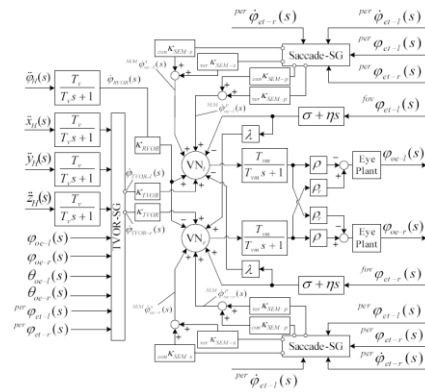


Fig 1 Ohguni's binocular motor control system

3.1.1 先行研究における Saccade

両眼運動制御モデルにおいて、輻輳成分のゲインは交差による影響を受けるため 1 より小さくなる。これは両眼協調運動の特徴でもあるが、Saccade においては最終的な視軸位置が目標位置に達しないという問題があった。この問題に対して Ohguni らは、最終的な出力のゲインを 1 とするために、入力に交差の影響を考慮したゲインを掛けることで問題の解決を図った。また、入力に視標の速度を追加することで、移動視標に対しても Saccade を可能とした。なお、Saccade の経路生成には、図 3 に示すような S 字加減速制御を用いている。

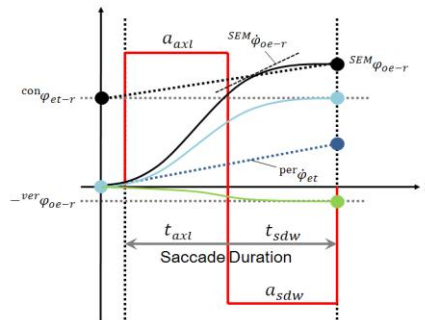


Fig 3 S-shape acceleration and deceleration

3.1.2 先行研究における Saccade の問題点

Ohguni らにより考案された Saccade は輻輳運動の制御について、実質的に両眼の交差を切っていることに相当するため、Saccade 中は両眼が独立に運動することになる。このとき、画像処理の結果により左右の眼でそれぞれ異なるものを視標としてしまった場合、輻輳成分の協調が保てなくなり、次の眼球運動への移行が困難となる。また、このモデルでは 1 回の Saccade により視標を捉えようとするため、Saccade 後の視野がきわめて狭くなる。これは視標までの収束時間の面では有利であるが、視標が運動しているときは Saccade 後の視野に視標が入らない可能性が高い。

4. 提案手法

4.1 提案する Saccade 手法

通常、ヒトの Saccade は 1 次 Saccade と修正 Saccade の 2

段階あることが Weber, Daroff の実験[2]により確かめられている。これによりヒトは Saccade 後の視野の広さを確保すると同時に、視標への素早い収束を可能にしている。そこで、本研究ではこの修正 Saccade を取り入れた新しい Saccade 手法を提案した。図 4 に提案手法の概略図を示す。

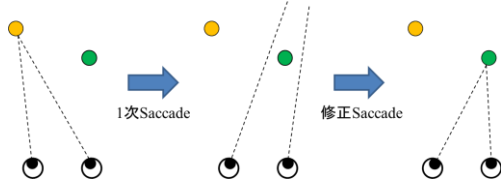


Fig 4 Proposed Saccade method

具体的には、1次 Saccade では共役運動成分のみを視標の位置情報から計算する。輻輳成分については、現在の視軸位置に比例した分だけ両眼が開くようにする。つまり、1次 Saccade では従来の Saccade に比べ広い視野を確保し、その後の修正 Saccade で両眼を素早く輻輳させることにより注視を完了する。これら一連の動作により Saccade 後の広い視野の確保と視標への素早い収束の両立が可能となる。この手法は 1次 Saccade に視標位置の輻輳成分を用いないため、もし異なる視標を Saccade 目標としても輻輳成分の混乱が起きず、先述した従来の Saccade の問題点を解決していると言える。

4.2 両眼視覚制御モデル

前節で提案した Saccade を取り入れた新しい両眼運動制御モデルを図 5 に示す。

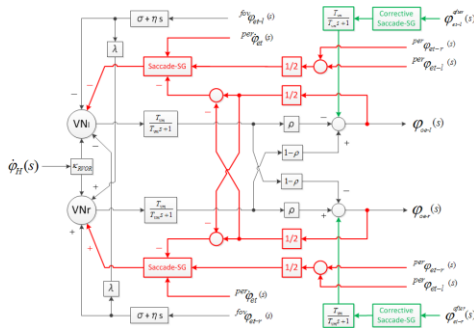


Fig 5 Proposed binocular motor control system

モデル中、赤で示した経路が 1次 Saccade 経路、緑で示した経路が修正 Saccade 経路である。なお、Saccade 以外の眼球運動については、先行研究（文献）の手法に従う。

5. 実験による検証

提案モデルの有意性を示すため、提案モデルを光学システムとしてロボットに実装し、各眼球運動に対して実験を行った。

5.1 実験装置

実験装置の外観と構成を図 6 に示す。眼球に相当するカメラ (FCB-H11 SONY 製) は、モータによりパン・チルト方向の 2 自由度の回転が可能でアクティブカメラとして機能する。ま

た、カメラから得られた画像を画像処理により中心部と周辺部に切り分けることで、1台のカメラで中心視と周辺視の両方を担うこととした。このとき、中心視の画角は水平:約 20[deg]、垂直:約 10[deg]であり、周辺視のそれは水平:約 50[deg]、垂直:約 28[deg]となる。また、ヒトの前庭器に相当するものとして、回転速度 3 自由度、並進加速度 3 自由度の計 6 自由度の動きが検出可能なセンサ (AccelRate3D MEMSENSE 社製) を搭載している。

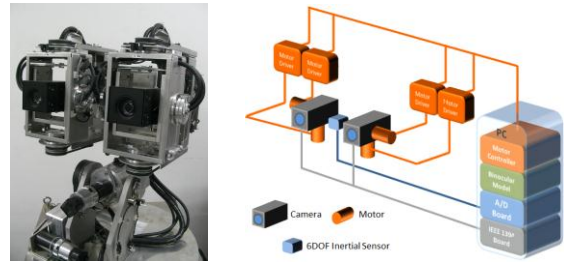


Fig 6 Appearance and composition of robot

5.2 画像処理

実験に用いる視標としては、単色のボールを用いた。カメラから得た画像に対して画像処理として二値化処理と膨張収縮処理を行った後に重心計算を行うことで、視標の画像中心からのズレを抽出し、光軸からの角度情報に透視投影変換することで網膜誤差を得る。なお、この処理は中心視と周辺視に共通である。

5.3 実験結果と考察

以下に、各眼球運動に対する実験概要とその結果を示す。

5.3.1 Smooth Pursuit

Smooth Pursuit の性能を検証するために、ロボットの正面 1.5[m]の位置を下限とする単振子を振動させ、それをロボットに追従させる実験を行った。この時の視標位置および視軸位置を図 7 に示す。この結果より、最大速度約 40[deg/s]までの視標を常に中心視により追従可能であることが確認できた。ヒトに追従可能な最大速度が約 30[deg/s]であるという生理学的な報告もあることから、提案したシステムの Smooth Pursuit は十分な性能を持っていると言える。

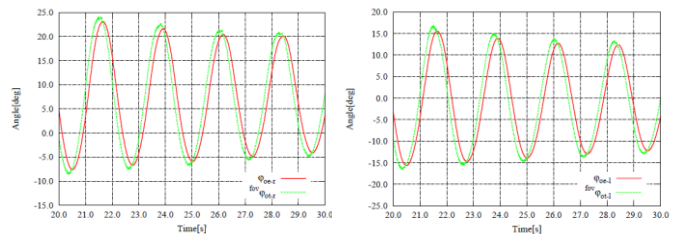


Fig7 Smooth Pursuit

5.3.2 RVOR

実験装置の構造上、装置に並進方向の運動を与えることが困難であるため、VORの内、回転に対するVOR (RVOR) のみ性能を検証した。ロボットの正面 1.5[m]の位置に視標を固定し

ロボットに注視させた後、人の手で頭部に水平方向の外乱を加え、その時の頭部の回転および網膜誤差を記録した。VORの有無による結果の違いを図8に示す。この結果から、VORを機能させた時には網膜誤差が約1/5に抑えられていることが分かる。このことから、提案モデルにおけるVORが正しく機能していることが確認できた。

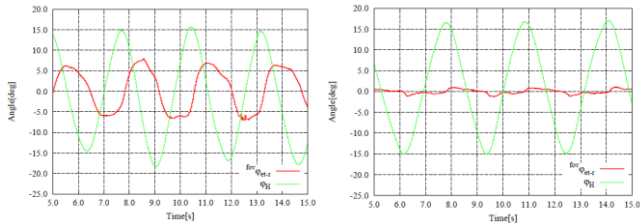


Fig 8 RVOR

5.3.3 Saccade

Saccadeについては、静止視標に対するものと移動視標に対するものの両方の性能を検証した。

まずは静止指標に対するSaccadeを検証するために、ロボットの前方1.5[m]、右0.5[m]の位置に視標を固定し、それに対してSaccadeを起こす実験を行った。そのときの視軸位置を図9に示す。この結果より、1次Saccadeにより視標の方向を向いた後、修正Saccadeにより視標を注視していることが分かる。これにより、提案したSaccade手法が正しく機能していることが確認できた。

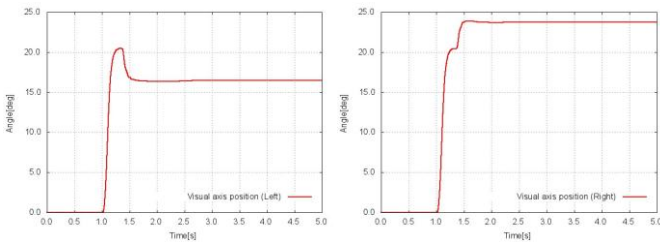


Fig9 Saccade

次に、移動視標に対するSaccadeの性能を検証するため、視標を並進移動が可能な単軸ロボットに取り付け、それに対してSaccadeを起こす実験を行った。実験時、単軸ロボットの移動速度は約0.9[m/s]である。このときの結果を図10に示す。この結果から、移動視標に対してのSaccadeを起こし、最終的に視標を注視できていることが分かる。なお、グラフ中で視標位置をプロットしていない箇所があるが、それはSaccade抑制によりSaccade中に画像処理をしていないためである。

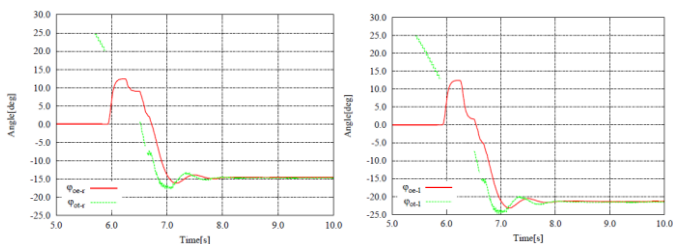


Fig10 Saccade to moving target

次に、頭部に外乱を加えた時の静止視標に対するSaccadeの性能を検証するために、ロボットの正面1.5[m]に視標を固定

し、頭部に外乱を加えた状態で視標に対してSaccadeを起こした。このときの頭部位置、視軸位置および視標位置を図11に示す。この結果から、頭部に外乱の加わる状況下でも視標に対してSaccadeを起こし、注視を保っていることが確認できる。

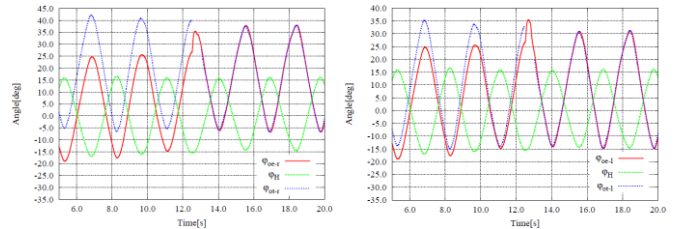


Fig 11 Saccade under disturbance

最後に、頭部に外乱を加えた状況下での移動視標に対するSaccadeの性能を検証するために、頭部に外乱を加えた状態で単軸ロボットに取り付けた視標にSaccadeを起こす実験を行った。このときの頭部位置、視軸位置および視標位置を図12に示す。この結果から、外乱の加わる状況下でも移動視標に対してSaccadeを起こし、注視に成功していることが分かる。なお、移動視標に対するSaccadeと同様、Saccade中は画像処理を行わないため、その間の視標位置はプロットしていない。

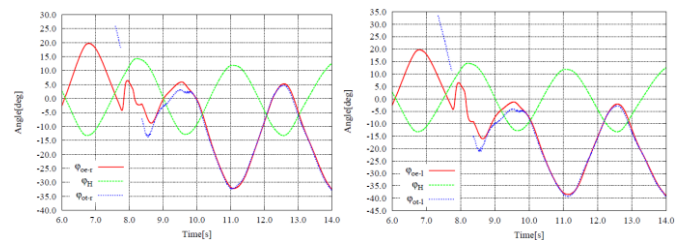


Fig 12 Saccade to moving target under disturbance

6. おわりに

以下をもって本論文の結論とする。

- 修正Saccadeを取り入れたSaccade手法を提案し、提案手法と従来の両眼制御モデルを元に新たな両眼制御モデルを提案した。
- 提案した両眼制御モデルの各眼球運動 (Smooth Pursuit, RVOR, Saccade) に対して実験を行い、その性能を検証した。
- 検証の結果、Smooth Pursuit, VOR, Saccadeが1つの制御システムで実現可能であることを確認し、その有意性を示した。

文 献

- [1] 大國俊啓, 張曉林 衝動性眼球運動・滑動性眼球運動・前庭動眼反射を統合的に実現した両眼運動制御システム. The 2010 Annual Meeting, I.E.E. Japan
- [2] RONALD B. WEBER and ROBERT B. DAROFF, CORRECTIVE MOVEMENTS FOLLOWING REFIXATION SACCADDES: TYPE AND CONTROL SYSTEM ANALYSIS. Vision Res, Vol. 12, pp. 467-475, 1972.