

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680019

研究課題名(和文) ヒト視線安定化メカニズムの理解とロボティクス応用

研究課題名(英文) Understanding gaze stabilization mechanism and robotics application

研究代表者

下ノ村 和弘 (Shimonomura, Kazuhiro)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：80397679

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、運動計測実験およびロボット実装を通して、ヒト視線安定化メカニズムを理解することを目的とした。まず、ウェアラブル眼球・頭部運動同時計測システムを開発し、これを用いて、歩行中やボール捕捉のような運動中の眼球・頭部運動を計測した。また、ヒト視線安定化メカニズムに関する知見や仮説を実装するためのステレオロボットビジョンを開発した。前庭覚情報に基づく眼球のフィードフォワード制御や、眼球と頭部の協運動制御を実装し、カメラ画像上の視標位置が安定することを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the author developed a wearable system for measurement of eye and head movements and a robot vision system aiming at understanding the mechanism for gaze stabilization in human vision. The wearable measurement system consists of an eye camera which measures eye movements, and a view camera which is downward directed and captures a marker placed on the body of person being measured. Based on the posture of the marker, head movement is measured. The robot vision system was developed to implement and evaluate hypotheses related to the mechanism for gaze stabilization through experiments in real world. The robot vision system consists of two CMOS cameras, gyroscope, Field Programmable Gate Array (FPGA), and micro controller. We implemented several functions for gaze stabilization on the robot, such as a feed-forward control of cameras based on gyroscope signals corresponding to vestibular sensory information.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：視線安定化 眼球・頭部運動 ロボットビジョン

1. 研究開始当初の背景

ヒトの歩行時、頭部は下肢の動きの影響により上下左右に揺れている。それにも関わらず、我々は歩きながら対象物を明瞭に見ることができる。これは、眼球と頭部が視線の安定を保つように協調的に動いているためである。視線安定化のための眼球運動として、前庭眼反射がよく知られている。これは、前庭系からの頭部回転および並進運動に関する情報に基づいて、これらの頭部揺れによる視覚のぶれを抑制するために眼球に生じる反射運動である。一方、頭部運動が視線安定化に関与することは、比較的最近まで知られていなかった。ヒトの眼球および頭部運動制御には様々な入力に関与することが知られている。眼球の運動制御の入力として、視覚フィードバック (OKR, smooth pursuit, saccade, vergence) および前庭覚フィードフォワード (VOR) などが挙げられる。また、頭部の運動制御の入力としては、前庭覚フィードフォワード (VCR)、視覚フィードバック、および頸筋反射 (CCR) などが考えられている。近年、運動計測技術の進歩により眼球・頭部・体幹の精密な同時計測が可能となり、これらの眼球および頭部運動制御入力がヒトの視線安定化においてどのように寄与しているのか、知見が蓄積されつつあるが、全体像は明らかになっていない。ヒト視線安定化のメカニズムが解明されることで、将来的にヒューマノイドを含む歩行型ロボットに様々な複雑な運動を行わせる際の視線安定化、バランス制御の戦略に示唆を与えることが出来ると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 眼球および頭部の協調的運動を含むヒト視線安定化のメカニズムを理解するためには、眼球および頭部運動を同時に計測することが必要となる。従来、光学式の眼球運動計測装置に加えて、頭部運動を計測するために、頭部および体幹部にマーカを取り付け、これらを外部固定のカメラで撮影してマーカの動きを解析するいわゆるモーションキャプチャシステムが用いられてきた。このようなシステムにおいては、外部カメラの視野内でしか計測することができないため計測範囲が制限され、結果的に被測定者の行動範囲が制限されてしまうこと、行動範囲を確保するためには複数のカメラを使用しなければならないためコストがかかること、またタスクによっては取り付けられたマーカが体の一部で隠れてしまい計測の妨げになる状態 (オクルージョン) が発生する。そこで本研究では、必要な計測装置全てを被測定者に取り付けることで、行動範囲の制約を受けず、オクルージョンの発生を低減させることができるウェアラブル眼球頭部運動同時計測システムを開発し、これを用いて運動中の眼球・

頭部運動を計測することで、これらの協調様式を理解することを目的とする。

(2) 一方で、特に歩行などの運動中の視線安定化に関する実験においては、計測の難しさからデータのばらつきが大きい上に、異なる研究報告の間で実験条件が必ずしも統制されていないため、これらを繋ぎ合わせるだけで全体像を解釈することは容易ではない。また、視線安定化機構のある側面のみに着目して得られた実験結果やそこから導き出された仮説が、別の異なる状況下でどのようにはたらくかは明確ではない。そこで本研究は、ヒト眼球頭部運動計測と並行して、人間のように眼球と頭部に回転自由度をもつステレオロボットビジョンを用いて、これにヒト運動計測により得られた断片的な知見や仮説を実装し、様々な環境条件下で視線安定化の結果を評価・考察することで、工学的な立場からの解釈や応用に適したアブストラクトレベルで、様々な制御入力やそれらの調整機構をもつ人間の視線安定化機構の全体像の理解を目指す。

3. 研究の方法

(1) ウェアラブル眼球・頭部運動同時計測システムの開発では、ヘッドマウント型の視線計測装置 (DITECT ViewTracker) (図 1 左) をベースとして使用した。この計測装置は、視線計測のための眼球用カメラとハーフミラー、視野画像を得るためのビューカメラから構成される。眼球運動については、眼球用カメラとハーフミラーを用いることで、視界の邪魔にならないような計測が可能である。また、頭部運動については、眼球用カメラから得られる画像と同期した画像を取得することができるビューカメラを用いる。本研究ではこの 2 つのカメラを用いて、眼球と頭部運動の同時計測を行う。ビューカメラを用いて頭部運動を計測するために、被測定者の体幹部に固定マーカを取り付ける (図 1 右)。頭部を動かすことによって変化するビューカメラ画像上でのマーカの位置座標を取得することで頭部運動の計測を行う。外部カメラを用いず、ヘッドマウント型であるため、様々な運動下においても行動範囲に左右されることなく眼球と頭部運動の同時計測が可能である。また、計測に用いるカメラやマーカは被測定者の頭部および胸部に取り付けられており、手を動かすようなタスク中の計測においてもオクルージョンが起こりにくい。本装置では、頭部の回転運動を計測する (並進運動は考えない) ため、2 つのマーカにより得られるその中点の画像上の縦、横それぞれの位置座標 (xc, yc) と、2 点を通る直線の角度の合計 3 つの情報を用いて、頭部とマーカの運動学モデルを用いて yaw, pitch, roll 方向の回転を求めた。提案システムにおける頭部運動計測の精度を評価した結果、真



図 1 眼球・頭部運動同時計測システム

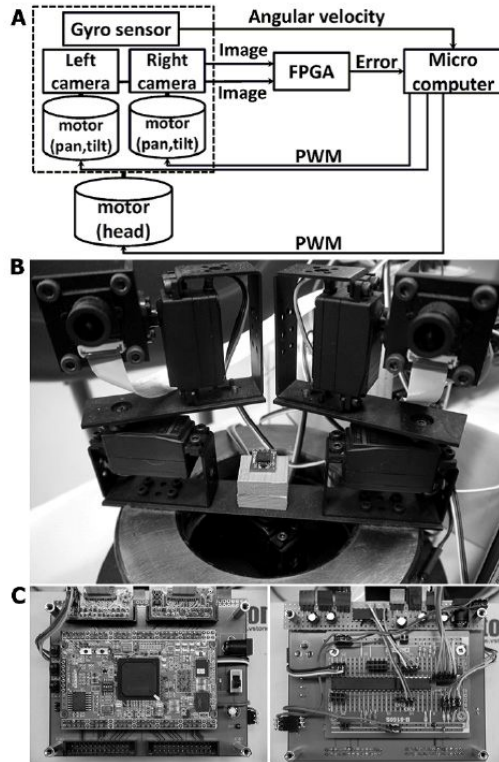


図 2 ステレオロボットビジョンシステム

値との平均二乗誤差が $0.92[\text{deg}]$ であり、十分な計測精度が得られることを確認した。

(2) 眼球と頭部に回転自由度をもつステレオロボットビジョンを用いた視線安定化実験におけるシステム構成を図 2 に示す。左右カメラは、それぞれ 2 個のサーボモータによりパンおよびチルト方向に回転する。Field Programmable Gate Array (FPGA) は、カメラからの画像を取得し画像上での視標位置を検出し、マイコンにその位置情報を送信する。マイコンは、FPGA により取得した視標位置情報とジャイロセンサにより取得した頭部の角速度情報を基に、左右カメラの回転角度をそれぞれ算出し、PWM 信号に変換してサーボモータに送信する。頭部をパン方向に回転するサーボモータの回転角度は、左右カメラの回転角度に基づいて算出される。頭部回転サーボモータとカメラ回転用のサーボモータは共にパン方向に回転するため、本システムはパン方向に冗長な自由度を持つ。イメージセンサのフレームレートは $30[\text{fps}]$ 、

サーボモータの制御レートは $100[\text{Hz}]$ 、ジャイロセンサのサンプリングレートはおよそ $1[\text{kHz}]$ である。画像上での視標位置データ収集のためシリアル通信でマイコンから PC にデータを送信する。

4. 研究成果

(1) 眼球・頭部運動同時計測実験では、まず、歩行時の眼球・頭部運動を、開発したウェアラブル眼球・頭部運動同時計測システムを用いて計測した。先行研究により、前方に固定された視標を見ながら歩行した場合、頭部の pitch 方向への回転の大きさは視標までの距離によってはあまり変化しないことが報告されている。一方で眼球運動は視標距離の変化の影響を受け、視標が頭部より約 $80[\text{cm}]$ 前方に位置する Head fixation point (HFP) よりも遠い場合は頭部の回転方向と逆方向に回転する。本計測実験では、先行研究と同様の結果が得られるか確認するために、前方に固定された視標を、視標距離が $80[\text{cm}]$ 以上となる区間で注視しながら実際に歩行した場合の眼球と頭部運動を計測した。眼球と頭部運動の pitch 方向の計測結果を図 3 に示す。眼球と頭部運動に逆位相の関係が見られ、先行研究の報告と同様に、視標が HFP よりも遠い位置にある場合、眼球が頭部運動に対して補償的に動き、視線の安定化を図っていることを示唆する結果が確認できた。

次に、動く視標に対する追従運動中の視線安定化に関わる眼球および頭部運動を調べるために、被計測者が前方からトスされたボールを顔の正面でキャッチする運動中の眼球頭部運動計測を行った。被計測者が歩行した状態で視標を追従した場合の、眼球と頭部運動の計測結果 (pitch 方向) の例をを図 4 に示す。眼球運動の波形には、被計測者が静止した状態で同じタスクを行った場合には見られなかった細かい揺れが見られる。これは、歩行によって生じた揺れを補正するための眼球運動である。すなわち、この場合、視線安定化は眼球運動が主になって行われており、頭部運動はほぼ視標追従のためのみはたらいっていることが示唆された。

(2) ステレオロボットビジョンを用いた実験では、まず、外力による頭部の揺れや随意的な頭部運動による視線のずれを補償するための眼球運動である VOR の機能を実装し、その基本的な働きを確認した。ロボット前方で静止した視標を、ロボットビジョンが両眼で注視した状態から、頭部を左右に周期的に回転させたときの視標追従結果を図 5 上に示す。縦軸は視標位置と目標位置との画像上での位置誤差、横軸は時間を示す。この場合、眼球は、視標位置による視覚フィードバック入力に加えて、サンプリング周期の短い慣性センサ信号に基づくフィードフォワード入

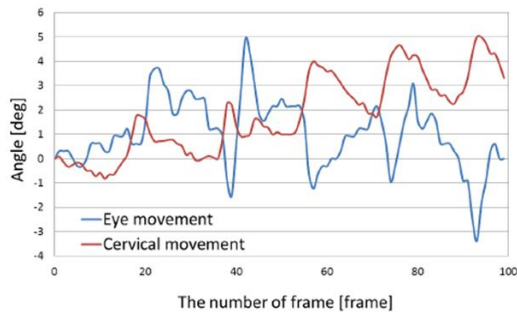


図3 歩行中の眼球・頭部運動(pitch方向)

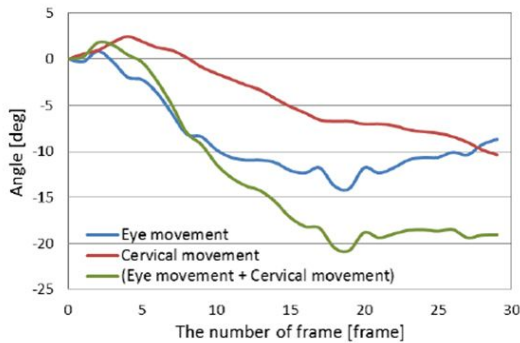


図4 動的視標追従下での眼球・頭部運動

力により駆動される．このため、頭部の揺れによる視線のずれは効果的に補償され、画像上での位置誤差は極めて小さく抑えられている．比較のために、VOR を無くした場合について実験した．サンプリング周期の長い視覚フィードバック入力のみで視線のずれを補償することになるため、誤差は大きく増加した．次に、視線のずれが、頭部回転により引き起こされた場合と、視標の移動により引き起こされた場合について実験した．これは、VOR の働きを説明する場合にしばしば用いられる状況であり、「本を読んでいるとき、頭を固定して目の前の本を動かすと文字が読みづらいが、逆に、本を固定したまま頭を回転させた場合は、文字は比較的明瞭に見える」という状況の模擬である．図5下に実験結果を示す．視標移動時と頭部回転時で、頭部に対する相対的な視標移動量はほぼ同じになるようにした．視標移動時は、眼球運動は視覚フィードバック入力のみで駆動されるが、一方、頭部回転時は、視覚フィードバック入力に VOR が加わるため、誤差は小さく抑えられる．これらの結果により、視線安定化における VOR の基本的役割が確認できる．

眼球や頭部の運動制御により視標に追従することができるが、これらの制御は、視標位置と目標位置（視野中心）の間に誤差が生じた後に行われるため、視標が動いた瞬間には誤差が生じる．そこで、工学的な視線安定化のアプローチとして、このようなカメラ運動制御の後に残る視標位置と視野中心との

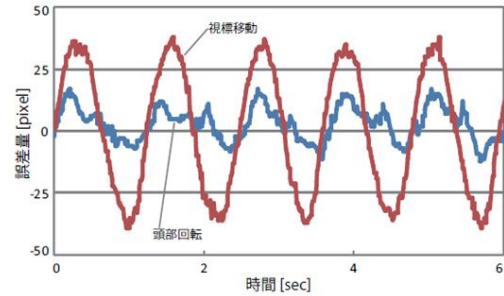
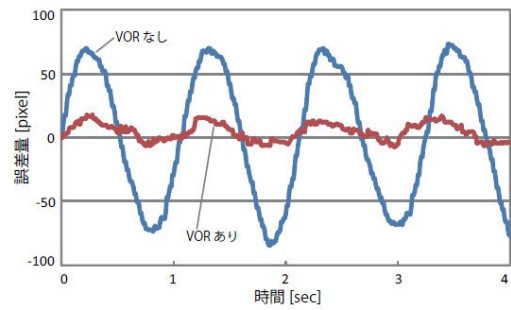


図5 ロボットビジョンによる視標追従結果

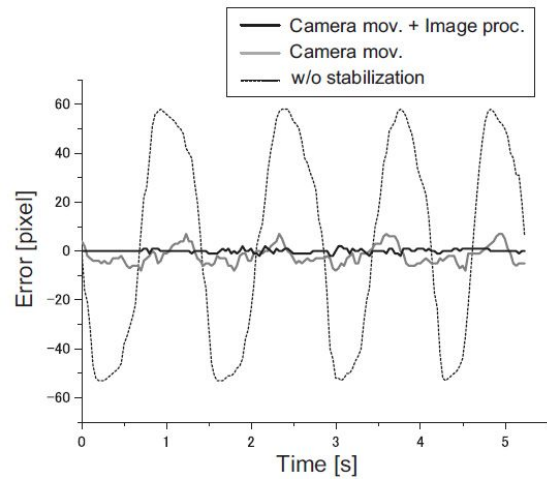


図6 画像シフトの効果

誤差をキャンセルするために、視野中心と視標位置との差に基づいて画像を上下左右にシフトすることで、視野中心に視標を移動させた．前方で静止した視標を、両眼で注視した状態からカメラロボット全体をロボットアームで左右に周期的に回転させた時の視標追従結果を図6に示す．カメラ運動制御を行った結果、視線のずれを効果的に補償しており、画像上の位置誤差として約 8[pixels]程度に抑えている事がわかる．さらに画像シフトを追加することでぶれを 1[pixel]以内に抑えることができた．

(3) 本研究では、ウェアラブル眼球・頭部運動同時計測システムを開発した．これを用いて、歩行中やボール捕捉のような運動中の眼球・頭部運動を計測し、視線安定化における眼球および頭部の役割分担の一端に関する知見は得られたが、ほかの様々な状況における協調様式を調べる実験は今後の課題と

したい。また、ヒト視線安定化機構に関する知見や仮説を実装するためのステレオロボットビジョンを開発した。主要なメカニズムである VOR を実装し、カメラ画像上の視標位置が安定することを確認した。これを用いて、様々な仮説を実装し評価することは、運動計測実験とあわせて今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

鹿嶋拓人, 下ノ村和弘, "注視点ベースロボット視線安定化," 日本ロボット学会誌, vol.32, no.1, pp.84-90, 2014, 査読あり.

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/32/1/32_32_84/_pdf

[学会発表](計5件)

野村祐介, 下ノ村和弘, "歩行中の眼球頸部運動同時計測のためのウェアラブルシステム," 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会(SS12013), ピアザ淡海(滋賀県), 2013.11.19.

鹿嶋拓人, 下ノ村和弘, "注視に基づくロボット視線安定化," 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会(SS12013), ピアザ淡海(滋賀県), 2013.11.19.

野村祐介, 下ノ村和弘, "ウェアラブル眼球頸部運動同時計測システムの検討," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば国際会議場(茨城県), 2013.5.23.

呉允煥, 下ノ村和弘, "全方位光学系を用いた中心窩カメラのリアルタイム視線制御," 計測自動制御学会第13回SI部門講演会(SI2012), 福岡国際会議場(福岡県), 2012.12.20

鹿嶋拓人, 下ノ村和弘, "注視点ベースロボット視線安定化," 第30回日本ロボット学会学術講演会, 札幌コンベンションセンター(北海道), 2012.9.18.

[図書](計1件)

— Kazuhiro Shimonomura, "A neuromorphic robot vision system to predict the response of visual neurons," In Technological Advancements in Biomedicine for Healthcare Applications, Jinlong Wu, Ed., ISBN 978-1466621961, IGI Global, pp.193-199, 2012.10.

[その他]

ホームページ

<http://www.ritsumei.ac.jp/se/~skazu/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下ノ村 和弘 (SHIMONOMURA, Kazuhiro)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号: 80397679