

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300115

研究課題名(和文) 運動の制御と学習に関わる小脳・脳幹ループの役割理解と実機制御への応用

研究課題名(英文) Understanding roles of the cerebellar-brainstem loop in adaptive motor control and application to real world robot control

研究代表者

平田 豊 (HIRATA, Yutaka)

中部大学・工学部・教授

研究者番号：30329669

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：生体特有の適応運動制御機構を工学的に実現することを目指し、生体運動制御の脳内メカニズムを探り、得られた知見をロボットや医療機器等の実機制御に応用することを目的とした。以下の成果を得た：1) 眼球運動学習時の小脳と脳幹神経活動を記録し、学習に伴う脳内信号伝達変化を見出した。2) これらの結果をもとに小脳・脳幹ループを陽に記述した眼球運動の数理モデルを構築し、その有効性を確認した。3) このモデルを実時間動作が可能となるよう改良し、実機適応制御器としてロボット制御に応用して、有効性を実証した。4) 金魚小脳によるロボット適応制御を実現するための小脳・マシンインタフェースを開発し、実験環境を整備した。

研究成果の概要(英文)：The aim of the research was to apply knowledges on neural mechanisms of biological adaptive control to various engineering problems. To achieve the goal: 1) We conducted neurophysiological experiments in goldfish while they were learning new eye movement control. We recorded single unit activities from the cerebellum and brainstem areas known to be involved in the oculomotor control, and identified their characteristics during the eye movement learning. 2) Based upon the results and accumulating related evidence from other labs, we configured a mathematical model of eye movements in which the cerebellar-brainstem loop is explicitly described, and demonstrated its validity. 3) By simplifying the model so that it runs in real time, we employed the model as an adaptive controller of robots, and demonstrated its validity in actual robot control experiments. 4) We further developed a cerebellum-machine interface that enables adaptive robot control by goldfish cerebellar neuronal activities.

研究分野：生体情報工学，神経科学

キーワード：運動学習 眼球運動 小脳 モデル BMI 適応制御 ロボット

1. 研究開始当初の背景

生体運動制御の特徴は、その精緻性とロバスト性にあり、さらに生涯に亘りこれらを維持するための適応性にあると考えられる。ロボット等の機械運動制御系では、高い精緻性を有するものの、未だ実用上十分なロバスト性や適応性は実現されていない。すなわち、現在の実機制御技術では、機械系の経時・経年変化や故障に対し、制御信号を適応的に変化させ機能を最適に維持し続けることは困難である。生体で実現される適応的運動制御の中核は小脳が担っている。また、小脳からの出力が脳幹等に存在する pre-motor 神経回路を介して再び小脳に戻されるフィードバックループが、生体適応制御において重要な役割を果たしているものと考えられている。本研究では、古くから小脳・脳幹研究のモデルシステムとして用いられてきた前庭動眼反射 (Vestibulo-ocular reflex: VOR) と呼ばれる眼球運動の制御機構と、視線移動時に生じる急速な眼球運動 (サッカド) 後に必要とされる動眼神経積分器 (Oculomotor neural integrator: ONI) と呼ばれる眼位保持機構を対象とする。VOR および ONI は、機能の明確さや観測の容易さに加え、解剖学的に小脳ならびに脳幹を含む神経回路構造の詳細が同定されていることから、生体における適応運動制御を研究する上で格好の対象とされてきた。申請者はこれまで、システム同定の観点から VOR 制御システムを捉え、サルならびに金魚を用いた適応学習実験を実施して、小脳が適応の座の一つであることを明示し、かつその役割を情報論的に明らかにしてきた (Hirata & Highstein, J. Neurophysiol, 2001; Hirata & Highstein, Annals NY Acad. Sci., 2002; Brazquez, et al., J. Neurosci, 2003; Blazquez et al., J. Neuropysiol., 2006)。また、従来広く用いられてきた単一正弦波やステップ状の単純刺激に対し、より複雑な非線形信号変換を要する適応課題を用い、VOR 適応制御の柔軟さ (自由度) とその限界、ならびにそれらを規定する小脳神経回路網による信号変換能力の重要性に言及した (Hirata et al., J. Neurophysiol, 2002; 吉川, 平田, 信学論 D, 2008)。さらに、小脳の生理・解剖学的知見を忠実に盛り込み、小脳神経回路モデルのプロトタイプを構築し、モデルが VOR に関する実験データを良く再現できることを示した (稲垣, 平田, 信学論 D, 2007; 稲垣他, 信学論 D, 2011)。また、このモデルを実時間処理が可能なレベルに簡略化し、適応制御コントローラとして用いることにより、実機 DC モータ制御において高い適応制御能力を示す事 (Hirata et al., Neural Control of Movement, 2008)、ならびに二輪倒立型ロボットの単純な目標軌道に対する倒立制御においても、負荷変化時に良好な適応能力を示す事 (Tanaka et al., IEEE EMBS, 2010) を実証している。また、

小脳神経活動と運動学習の間の直接的因果関係を実証するために、小脳用ブレイン・マシンインタフェース (BMI) のプロトタイプを構築し、単一 Purkinje 細胞によるロボットアームの適応制御を試みていた (平田, 生体の科学, 2011; Clinical Neurosci, 2011)。一方、ONI については、左右眼それぞれにおける耳側と鼻側の眼位保持の学習特性に見られる独立性と従属性を実験により世界に先駆け明らかにした (Okamura et al., OCNS, 2011)。当初、ONI の出力細胞と考えられている脳幹神経細胞からの神経電位計測技術を確立し、これらの独立性と従属性の起源を神経生理学的に探っていた (Hirata et al., Soc. Neurosci. Abstr, 2011)。また、これまでの解剖学的知見を元に、脳幹において ONI の時間積分機能を実現するための神経回路モデルのプロトタイプを構築し (Inagaki et al., Neural Networks, 2011)、神経電位計測データとの関係解析を開始していた (Okamura et al., JNNS, 2011)。

2. 研究の目的

本研究では、生体特有の適応運動制御機構を工学的に実現することを目指し、生体運動制御の脳内メカニズムを探り、得られた知見をロボットや医療機器等の実機制御に応用することを目的とした。この目的を達成するために、以下の具体的研究項目について研究を実施した：

1) VOR, ONI 運動学習時の小脳, 脳幹神経活動評価：VOR ならびに ONI 運動学習時の小脳と脳幹 pre-motor 細胞の活動を神経生理学的手法により計測し、学習に伴う信号伝達変化、特に小脳-脳幹ループ内の活動変化を明らかにする。

2) 小脳-脳幹ループを陽に記述した VOR, ONI 運動学習モデルの構築：従来の解剖学的知見と 1) の結果を統合し、小脳神経回路構造ならびに脳幹 ONI 神経回路構造、および小脳-脳幹ループ構造を陽に記述した数理モデルを構築する。

3) 小脳-脳幹型コントローラの構築：2) で構築したモデルを実時間処理可能な規模に簡略化し、外部機器の適応型コントローラを構築する。その応用として制御が比較的難しい不安定系である二輪倒立型ロボットの倒立・移動制御と、近年需要が高まっているパーキンソン病患者等に見られる手の震え (振戦) を抑制するための制振自助具制御に応用する。

4) 小脳-脳幹 BMI によるロボット制御：VOR ならびに ONI 運動学習を担っているものと考えられている前庭小脳の出力細胞 (Purkinje 細胞) 活動により、BMI を介して外部機器 (ロボットアーム) の制御を行う。また、ONI を実現する脳幹 pre-motor 細胞活動を用いて同様の BMI 実験を実施する。

3. 研究の方法

研究項目 1)における行動・神経生理学実験には、これまでの申請者の研究で用いてきた体長 12~15cm の和金 (Cyprinus auratus) を用いる。和金の VOR ならびに ONI に関わる神経経路は、小脳を含め、解剖・生理学的によく同定されている (Straka et al., 2006)。申請者は海外共同研究者 Robert Baker 教授 (New York Univ.) との研究交流を通し、金魚の VOR ならびに ONI に関わる小脳および主要神経核 (前庭神経核, Area I, Area II) からの単一神経細胞活動記録ならびに眼球運動測定技術, VOR 適応誘発技術, ONI 適応誘発技術を習得しており, 本研究でもこれらの基本技術 (吉川, 平田, 2008; Yoshikawa, Hirata, 2006; Okamura et al., 2011) を用いる。眼球運動はサーチコイル法により両眼の運動を測定し, そのため金魚には実験直前に水槽内で eye coil (銅線, 直径 5mm, 50 回巻) を両眼の角膜上に縫付し, 水槽外側に設置された磁界発生コイルにより金魚眼球周辺に一樣交流磁界を生成する。神経電位計測は, VOR ならびに ONI に共通して関わる前庭小脳内と脳幹 pre-motor 領域 Area I 内神経細胞活動を単一ユニット細胞外記録法によりガラス微小電極 (tip diameter $2\sim 3$ μ m, impedance $2\sim 4$ M Ω) で測定する。本研究では, これまでの研究により確立された VOR ならびに ONI 運動学習パラダイムを改良し, 小脳・脳幹神経回路の機能をより詳細に評価するために次のようなパラダイムを用いる: VOR は, 頭部運動時に眼球をそれとは反対方向にほぼ同じ速さで反転させる事により, 視界のブレを防ぐ反射性の眼球運動であり, 頭部運動に視覚刺激 (視野全体の一定方向への動き) を組み合わせられて被験動物に与える事により, その運動学習を誘発できる。例えば, 頭部運動と同相に視覚刺激を与え続けると, 10 分ほどで暗闇での「眼球速度/頭部速度」で定義される VOR ゲインは有意に減少し, 逆に両刺激を逆相に与え続けると VOR ゲインは上昇する。金魚は水槽に固定されており, 頭部運動刺激は水槽を回転させる事により与える。また, 視覚刺激は水槽上部に取り付けられているプラネタリウムにより, ランダムドットパターンを水槽壁面に投影して金魚に与える。本研究で用いる VOR 適応学習のパラダイムは, 従来のゲイン変化のみを要する単純な適応制御課題ではなく, 非線形な感覚-運動情報変換を要する複雑課題を用いる。例えば, 正弦波状頭部刺激にこれを全波整流した視覚刺激を組合せる場合, VOR は一方向への頭部運動時にはゲインを 2 倍とし, 同時に他方向への運動時にはゲインを 0 にすることが要求される。これまでの研究により, 金魚ならびにサルはこうした半波整流型運動制御を適応的に獲得できることを確認している (Hirata et al., 2002; Yoshikawa et al., 2004; 吉川, 平田, 2008)。ONI は, 視線移動時に発生するサッカードと呼ばれる急速眼球

運動後に眼位を保ち, 移動後の視線を保持するための機構である。これは, サッカードを生じさせるために脳幹 Burst 細胞で生成されるインパルス状活動変化を積分し, ステップ状神経活動に変換することにより実現されるものと考えられている (Robinson, 1974)。その運動学習は, サッカード後の眼位に応じて視覚刺激を与える事により誘発できる。例えば, サッカードにより中間眼位 (null eye position) から耳側に視線が移動した場合には鼻側に動く視覚刺激を与え, 逆に鼻側に視線移動した場合には耳側視覚刺激を与えると, 次第に暗闇での視線移動後の眼位が保てなくなり, null eye position に向かってドリフト (leak) するようになる。すなわち, 完全な積分器の伝達関数が $1/s$ であるのに対し, 学習後の積分器は $1/(s+a)$, $a>0$ となる。逆に鼻側視線移動時に鼻側視覚刺激, 耳側視線移動時には耳側視覚刺激を与え続けると, 暗闇では視線移動後, null eye position から眼位が遠ざかる (unstable) ようになる ($a<0$)。これが通常行われる ONI の学習パラダイムであるが (Major et al., 2004), 本研究では, ONI の左右眼差ならびに耳側・鼻側眼位による差異を評価するために, 片眼への視覚入力を遮断し, さらに, 眼位が耳側または鼻側にある時のみ視覚刺激を与える片眼眼位選択的パラダイムを用いる。例えば, 左眼を遮蔽し, 右眼位置が鼻側にある時のみ鼻側視覚刺激を与える学習を行わせると, 各眼の耳側, 鼻側の ONI 特性は学習刺激を与えた右眼鼻側が学習する (a が “unstable” に変化する) のみならず, 同眼の耳側が反対側に学習し (a が “leaky” に変化), 左眼の耳側, 鼻側も学習量は右眼より小さいものの, それぞれ学習が進む (Okamura et al., 2011)。本研究では, こうした VOR ならびに ONI に関する様々な複雑適応制御課題中の小脳皮質ならびに脳幹 pre-motor 神経細胞活動を眼球運動 (横, 縦方向眼球位置) とともに連続記録し, 適応の可否と細胞活動ならびに適応課題の複雑さの関係を調べる。研究項目 3) では, これまでに構築し, 眼球運動ならびに Purkinje 細胞活動を忠実に再現できることを確認した VOR モデル (稲垣, 平田, 2007; 稲垣他, 2011) に, 最新の知見に基づき小脳皮質神経回路網内シナプス可塑性を実装する。次に, これまでに構築した ONI を実現する脳幹神経回路モデル (Inagaki et al., 2011) を両眼ならびに耳側・鼻側別の記述に拡張し, 解剖学的知見に基づいて上述の小脳モデルに接続する。これにより, 小脳・脳幹ループを陽に記述した VOR・ONI 両眼球運動ならびにそれらの運動学習をシミュレート可能なモデルが構築される。このモデルを用い, 実装した小脳皮質内シナプス可塑性の組合せにより, VOR・ONI に関する複雑適応制御課題をシミュレートする。その際, VOR・ONI 運動学習における各シナプス可塑性の役割を評価すると同時に, 学習前・中・後の小脳皮質

内抑制性介在細胞の活動を解析し、これらの細胞がコードする情報を明らかにする。研究項目 3) では、この時点までに得られた知見を集約し、小脳・脳幹型実機適応コントローラを構築して、実機制御に応用する。応用例として、不安定系で比較的制御の難しい二輪倒立型ロボットの姿勢制御と、パーキンソン病患者に見られる振幅や周波数が時变的な手の振動（振戦）を補正するための制振自助具制御に取り組む。小脳・脳幹モデルによる制振自助具のアイデアは特許公開済みであり（九鬼他，特開 2008-67936），二輪倒立型ロボット制御に用いる小脳・脳幹型コントローラのパラメータを自助具制御用に最適化し、実用化を目指す。これらと平行して、研究項目 4) のために金魚小脳ならびに脳幹神経細胞を用いた BMI 技術を確立する。小脳・脳幹 BMI によるロボットアーム適応制御では、金魚の VOR および ONI 適応学習機能を利用する。すなわち、ロボットアームの目標軌道を水槽内に固定された金魚に前庭刺激として与え、その時に得られる小脳 Purkinje 細胞または脳幹 pre-motor 神経スパイク発火頻度を整形し、ロボットアーム駆動用モータに入力する。モータの動きをエンコーダで計測し、目標軌道との差を視覚刺激として金魚に与える。金魚はこの誤差信号（網膜像のブレ）を低減するように VOR と ONI を適応させ、それに伴い神経細胞発火パターンが変化し、その結果ロボットの動作が適応的に目標軌道に近づくものと期待される。

4. 研究成果

研究項目 1) に関しては、前庭動眼反射 (Vestibuloocular reflex: VOR) ならびに眼球運動積分器 (Oculomotor neural integrator: ONI) 運動学習時の小脳と脳幹 pre-motor 細胞の活動を神経生理学的手法（ガラス微小電極による単一神経細胞活動記録）により計測し、学習に伴う信号伝達変化、特に小脳-脳幹ループ内の活動変化を明らかにすることを目指した。その結果、VOR 運動学習中の小脳 Purkinje 細胞活動の連続記録に成功し、VOR ゲイン増加学習とゲイン減少学習における小脳の異なる役割を示唆する結果を得た (Hirata, 2012nov)。ONI 運動学習については、行動実験により左右眼の ONI の独立性と従属性の存在を明らかにし、後脳 Area I 細胞からの神経細胞活動記録にも成功した (岡村他, 2012mar; 太田, 平田, 2012sep)。

研究項目 2) については、これらの実験データならびに従来の解剖・生理学的知見をもとに、これまでに構築し、眼球運動ならびに Purkinje 細胞活動を忠実に再現できることを確認した VOR モデルに、最新の知見に基づき小脳皮質神経回路網内シナプス可塑性を実装した (Inagaki, Hirata, 2016 to be presented)。次に、これまでに構築した ONI

を実現する脳幹神経回路モデルを両眼ならびに耳側・鼻側別の記述に拡張した (稲垣, 平田, 2015jun)。これにより、小脳・脳幹ループを陽に記述した VOR・ONI 両眼球運動ならびにそれらの運動学習をシミュレート可能なモデルが一通り実装された。

研究項目 3) では、これまでに得られた神経生理学的知見ならびに行動実験の結果をもとに、小脳・脳幹型コントローラを構築し、実機制御に応用してその有効性を評価した。すなわち、実時間で動作する小脳・脳幹神経回路モデルを計算機上 (LabVIEW, National Instruments, を使用) に実装し、直流モータ、二輪倒立ロボット、クアドコプタの制御を行い、その有効性を実証した (Pinzon, Hirata, 2014)。また、これらの実機制御実験を通し、小脳・脳幹神経回路による適応制御の神経機構に関する興味深い知見を得た。具体的には、我々の脳内に最も多く存在する小脳顆粒細胞の数をコントローラ内で変更し、実機適応制御における性能を評価した結果、小脳顆粒細胞数が多いほど、コントローラ内のシナプス荷重の初期値が実機制御精度に与える影響が小さくなることが示された (Pinzon, Hirata, 2015)。さらに、不安定系で比較的制御の難しい二輪倒立型ロボットの姿勢制御において、正弦波状の目標軌道に対する追従制御途中に、ロボットに重りを付加したり、動作平面を突然傾けたりする実験を実施した。その結果、こうしたロボット自身の特性変化や動作環境の変化に対しても良好な適応制御能力を有することが実証された (Pinzon, Hirata, 2014)。一方、研究計画では、制振自助具制御にも取り組む予定であったが、研究遂行中に米国 Lift Labs 社が同様のスプーンを開発したことが報じられたため、本研究での開発は見合わせた。今後、このスプーンを評価し、我々の技術に優位性が認められれば開発に着手する。

研究項目 4) に関しては、これまでに実証されている VOR の周波数別運動学習機構を利用した実機制御を試みた。VOR 運動学習では、異なる 2 周波数で構成される頭部回転に対する眼球運動のゲインを、一方の周波数では増加させ、同時に他方では減少させることができる。こうした柔軟な適応制御が小脳内に存在する 1 つの Purkinje 細胞により実現されるという仮説に基づき、BMI 実験の環境を整備し、金魚を用いた実験を実施している。その結果、細胞により実機制御の適応能力が異なることが見出され、2 周波数両方の適応に関わる細胞といずれか一方の周波数の適応に関わるものがあることを示唆する結果が得られている (発表準備中)。脳幹 Area I と ONI 適応パラダイムを用いた BMI は、技術的な問題 (金魚 ONI 適応学中の Area I 細胞からの長時間連続記録) により、当初の計画通りには進まず、具体的な成果は現時点では得られていない。

<引用文献>

- ① Hirata, Y., Highstein, SM.: Acute adaptation of the vestibulo ocular reflex: signal processing by floccular and ventral parafloccular Purkinje cells. *J. Neurophysiology*, Vol. 85, No. 5, pp. 2267-2288, 2001, Apr.
- ② Hirata, Y., Highstein, SM.: Plasticity in the vertical VOR: A system identification approach to localizing the adaptive sites. In *The Cerebellum: Recent developments in cerebellar research.*, Ed. Highstein, SM., Thach, WT., *Annals of the New York Academy of Sciences*, Vol. 978, pp. 480-495, 2002, Dec.
- ③ Blazquez, PM., Hirata, Y., Heiney, SA., Green, AM., Highstein, SM.: Cerebellar signatures of VOR motor learning. *Journal of Neuroscience*, Vol. 23, No. 30, pp. 9742-9751, 2003, Oct.
- ④ Blazquez, PM., Hirata, Y., Highstein, SM.: Chronic Changes in inputs to dorsal Y, neurons accompany VOR motor learning. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 95, No. 3, pp. 1812-1825, 2006, Mar.
- ⑤ Hirata, Y., Lockard, JM., Highstein, SM.: Capacity of vertical VOR adaptation in squirrel monkey. *Journal of Neurophysiology*, Vol. 88, No. 6, pp. 3194-3208, 2002, Dec.
- ⑥ 稲垣圭一郎, 平田 豊:
小脳神経回路網を陽に記述した前庭動眼反射モデル. *電子情報通信学会論文誌*, J90-D 巻, 5 号, pp. 1293-1304, 2007, May.
- ⑦ 稲垣圭一郎, 小林誠一, 平田 豊:
小脳スパイクニューロンネットワークモデルによる周波数選択的 VOR 運動学習メカニズムの解析, *電子情報通信学会論文誌*, J94-D 巻, 5 号, pp. 919-928, 2011, May.
- ⑧ Hirata, Y., Tanaka, Y., Yagi, H.: Real time adaptive motor control by the cerebellar neuronal network model 18th Annual Meeting of Neural Control of Movement, 2008, Apr. (Naples, Florida)
- ⑨ Tanaka, Y., Ohata, Y., Kawamoto, T., Hirata, Y.: Adaptive control of 2-wheeled balancing robot by cerebellar neuronal network model. *Proc. 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1589-1592, 2010, Sep. (Buenos Aires)
- ⑩ 平田 豊:
小脳と BM, *生体の科学*, 第 62 巻 4 号, pp. 298-304, 2011, Aug.
- ⑪ 平田 豊:
記憶のシステム: 小脳
Clinical Neuroscience, Vol. 29, No. 2, pp. 167-171, 2011, Feb.
- ⑫ Okamura, N., Baker, R., Hirata, Y.: Monocular eye position specificity in the oculomotor neural integrator 20th Annual Computational Neuroscience Meeting CNS*2011, 2011, Jul. Stockholm. *BMC Neuroscience*, vol. 12, Suppl 1, pp. 151-152, 2011
- ⑬ Hirata, Y., Okamura, N., Baker, R.: Monocular and binocular behavior of the oculomotor neural integrator in goldfish, *Society for Neuroscience*, 2011. Nov., Washington DC.
- ⑭ Inagaki, K., Hirata, Y., Usui, S.: A model-based theory on the signal transformation for the microsaccade generation., *Neural Networks*, Vol. 24, No. 9, pp. 990-997, 2011, Nov.
- ⑮ Okamura, N., Baker, R., Hirata, Y.: Monocular hemi-field specificity and dependency of the oculomotor neural integrator. The 21st Annual Conference of the Japanese Neural Network Society, 2011, Dec.
- ⑯ Yoshikawa, A., Hirata, Y.: Mechanism of frequency selectivity in VOR motor learning: frequency channel or waveform learning? *Proc. 28th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 6217-6220, 2006, Aug. 30 ~ Sep. 3. (NY City)
- ⑰ 稲垣圭一郎, 平田 豊:
小脳神経回路網を陽に記述した前庭動眼反射モデル. *電子情報通信学会論文誌*, J90-D 巻, 5 号, pp. 1293-1304, 2007, May.
- ⑱ Inagaki, K., Hirata, Y., Usui, S.: A model-based theory on the signal transformation for the microsaccade generation. *Neural Networks*, Vol. 24, No. 9, pp. 990-997, 2011, Nov.
- ⑲ 発明者: 九鬼陽介, 糟谷明範, 平田 豊, 平山幸人, 桂川景輔:
出願者: 同
制振自助具
特開 2008-67936
- ⑳ Hirata, Y.: Cerebellum-Machine Interface to Understand Cerebellar Roles in Motor Learning *Proc. The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent*

Systems, The 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2012, Nov. (Kobe)

- ②岡村直樹, Baker, R., 平田 豊:
眼球運動積分器の単眼性と眼位依存性の評価, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2011-159, vol.111, no.483, pp.221-226 2012, Mar. (玉川大)
- ②太田健斗, 平田 豊:
両眼半視野視覚刺激フィードバック刺激を用いた眼球運動積分器学習の評価 電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, CD-ROM, 2012, Sep. 豊橋技科大
- ③稲垣圭一郎, 平田 豊:
眼球運動神経積分器を構成する両側性神経回路における同側フィードバックと対側抑制機構の役割評価, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2015-5, vol.115, no.111, pp.63-68, 2015, Jun. (沖縄科学技術大学院大学)
- ④Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.:
Mechanisms behind asymmetrical motor adaptation using a realistic bi-hemispherical neural network of the cerebellum for robot control, *Frontiers in Neural Circuits*, Vol.8, pp.1-14, 2014, Nov.
- ⑤Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.:
Realistic bi-hemispherical model of the cerebellum uncovers the purpose of the abundant granular cells during robot control, *Frontiers in Neural Circuits*, Vol.9, pp.1-13, 2015, May.

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11件)

- ① Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.
Frontiers in Neural Circuits, 査読有, Vol.9, pp.1-13, 2015
- ② Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.
Frontiers in Neural Circuits, 査読有, Vol.8, pp.1-14, 2014
- ③ 和久井秀樹, 平田 豊, 日本神経回路学会論文誌、査読無, Vol.21, No.1, pp.20-31, 2014
- ④ 和久井秀樹, 平田 豊, 生体医工学会論文誌, 査読有, 第51巻6号, pp.328-341, 2013
- ⑤ Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.,
Journal of Communication and Computer, 査読有, Vol.10, pp.585-592, 2013
[学会発表] (計105件)
- ① Miki, S., Urase, K., Baker, R., Hirata, Y., Cerebellar dependent motor learning of predictive eye movements associated with velocity storage in Human and fish, *Society for*

Neuroscience, 2015, Oct. (Chicago)

- ② Hirata, Y., Pinzon-Morales, R.
Use of Modeling and Brain-Machine Interface Approaches to Understand Cerebellar Function, The 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2015, July 28-30, 神戸国際会議場 (神戸)
- ③ Miki, S., Baker, R., Hirata, Y.
Predictive eye movements acquired by repetitive periodic optokinetic visual stimulation in goldfish, *Society for Neuroscience*, 2014, Nov 15-19, (Washington)
- ④ Pinzon-Morales, R., Hirata, Y.
The number of granular cells in a cerebellar neuronal network model engaged during robot control increases with the complexity of the motor task, 23rd Annual Computational Neuroscience Meeting, 2014, July 26-31, (Quebec)
- ⑤ Miki, S., Matsuyama, M., Baker, R., Hirata, Y.
Frequency dependent VOR motor learning in normal and cerebellectomized goldfish, *Society for Neuroscience*, 2013, Nov.9-13, (San Diego)

[図書] (計1件)

- ① 平田 豊 他, オーム社, 新インターユニバーシティ デジタル信号処理, 2013

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 状態推定装置, および状態推定プログラム

発明者: 小栗 崇治、平田 豊

権利者: 株式会社デンソー, 学校法人中部大学

種類: 特許

番号: 特願 2014-087512

出願年月日: 平成 26 年 4 月 21 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

The Neural Cybernetics Laboratory

http://bit.ly/hirata_nclab

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 豊 (HIRATA, Yutaka)

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 30329669