

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21500298

研究課題名（和文）運動学習を実現する小脳内情報処理の理解と実機モータ制御への応用

研究課題名（英文）Understanding the cerebellar information processing for motor learning and application to real world motor 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

研究成果の概要（和文）：運動学習の中核を担う小脳内情報処理機構を魚類を用いた神経生理学実験により明らかにした。また、その知見を数理モデルとして集約し、計算機内に実装して、ロボットアーム等に用いられる実機モータの制御に応用することに成功した。

研究成果の概要（英文）：We conducted neurophysiological experiments in fish to understand the cerebellar information processing for motor learning, constructed a mathematical model based upon the evidence, and successfully applied the cerebellar model to control a direct current motor that is used to move robot arms.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：生体情報工学

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：運動制御，運動学習，ブレイン・マシンインタフェース，小脳，眼球運動，金魚

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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った。

## 2. 研究の目的

(1) 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

見をロボット制御に応用することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 小脳は適応的生体運動制御の中核を担い、運動の大きさや方向、速度や時間経過を生涯の長い期間に亘り正しく調整する役割を果たしている。したがって本研究ではまず、こうした小脳神経回路網における情報処理機構の理解を目指した。

(2) 次に、これらの結果とこれまでの神経科学分野における知見を統合し、新しいロボット制御への応用を試みた。すなわち、小脳型神経回路数理モデルを構築し、これによる実機モータ制御を行った。

(3) さらに、小脳神経活動を利用した新たなブレイン・マシンインターフェース(BMI)によるロボット制御法を開発した。

#### 4. 研究成果

(1) 金魚を用いた神経生理学実験により、眼球運動学習中の小脳 Purkinje 細胞活動を記録した (図 1)。

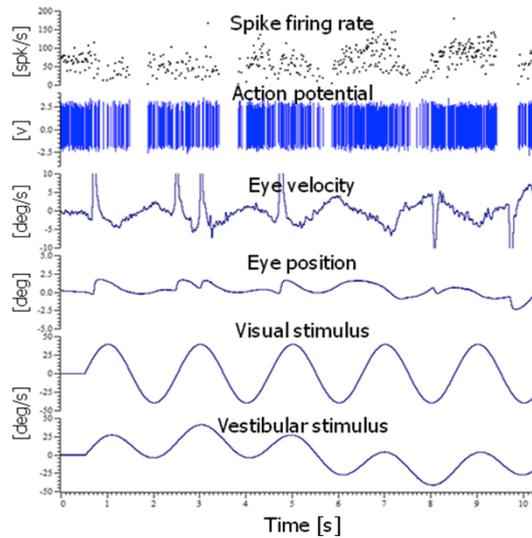


図 1: 眼球運動学習中の金魚小脳 Purkinje 細胞活動 (最上段 スパイク発火頻度, 2 段目 細胞外記録神経電位, 3 段目 眼球速度, 4 段目 眼球位置, 5 段目・最下段 運動学習誘発のための視覚ならびに前庭刺激)。

(2) これらの実験データを解析し、得られた知見を集約して小脳皮質の数理モデルを構築し、計算機上に実装した (MATLAB Simulink を使用。図 2)。

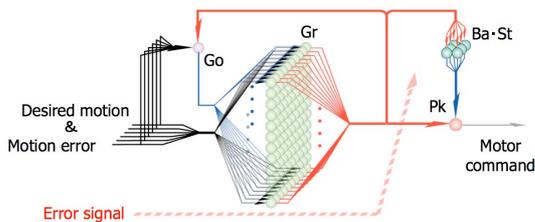


図 2: 構築した小脳神経回路モデルの構造。MATLAB (Mathworks) 上で実装し、シミュレーションならびに実機モータ制御に応用した。

(3) まずシミュレーションにより、図 2 の小脳モデルの有効性を確認し、次に、実機直流モータの制御に応用した (図 3)。その結果、小脳モデルでは、従来のフィードバック制御では得られない高い適応制御能力を実現できることが確認された。

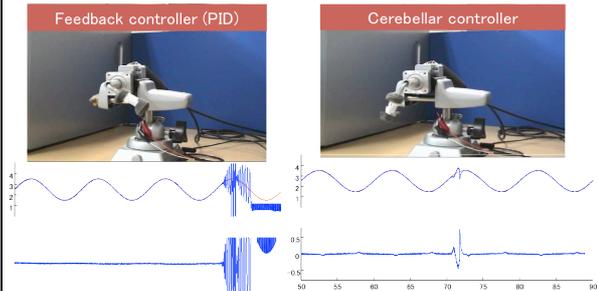


図 3: 構築した小脳モデルによるロボットアーム (直流モータ) 適応制御例。正弦波状目標軌道に対する追従結果。左は従来の PID 制御器による制御, 右が小脳モデルによる制御。途中, アームに負荷をかけている (右 41 秒付近, 左 71 秒付近)。

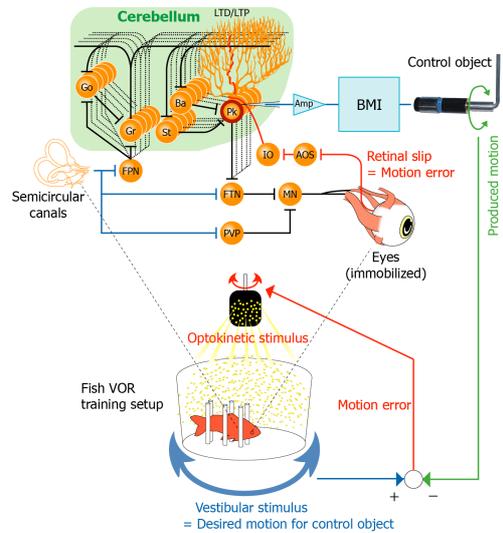


図 4: 金魚小脳ブレイン・マシンインターフェース

(4) 最後に、図 4 に示す前庭動眼反射と呼ばれる眼球運動の学習とブレイン・マシンインターフェースを組み合わせたスキームを考案し、金魚小脳活動によるロボットアーム制御を試み、適応学習が成立することを実証した。

#### 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 13 件)

- ①片桐 和真, 田中 良之, 平田 豊: 小脳・マシンインターフェースによる単一 Purkinje 細胞活動と運動学習の因果関係直接評価法, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J95-D, No. 5, pp. 1304-1311, 2012, May.
- ②和久井 秀樹, 平田 豊: 輻輳角を指標とした漫然状態検知, 生体医工学会論文誌, 査読有, 第 49 巻 5 号, pp. 693-702, 2011, Oct.

- ③ Yamazaki, T., Ikeno, H., Okumura, Y., Satoh, S., Kamiyama, Y., Hirata, Y., Inagaki, K., Ishihara, A., Kannon, T., Usui, S.: Simulation Platform: A Cloud-Based Online Simulation Environment Neural Networks, 査読有, Vol. 24, No. 7, pp. 693-698, 2011, Sept.
- ④ Inagaki, K., Hirata, Y., Usui, S.: A model-based theory on the signal transformation for the microsaccade generation Neural Networks, 査読有, Vol. 24, No. 9, pp. 990-997, 2011, Nov.
- ⑤ 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, 査読有, J94-D 巻, 5 号, pp. 919-928, 2011, May.
- ⑥ Shirakata, T., Tanida, K., Nishiyama, J., Hirata, Y.: Detect the Imperceptible Drowsiness, SAE Int. J. Passeng. Cars-Electron. Electr. Syst. 査読有, Vol. 3, No. 1, pp. 98-108, 2010, Aug.
- ⑦ 西山 潤平, 木下 伸一, 平田 豊: 前庭動眼反射による眠気予兆検出, 生体医工学会論文誌, 査読有, 第 48 巻 1 号, pp. 1-10, 2010, Jan.
- ⑧ 橋本 勉, 牧 孝郎, 坂下 祐輔, 西山 潤平, 藤吉 弘亘, 平田 豊: 瞳孔径変化による虹彩パターン伸縮のモデル化と眼球回旋運動計測への応用. 電子情報通信学会論文誌, 査読有, J93-D 巻, 1 号, pp. 39-46, 2010, Jan.
- ⑨ 平田 豊: 小脳と BMI, 生体の科学, 査読無 第 62 巻 4 号, pp. 298-304, 2011, Aug.
- ⑩ 平田 豊: 記憶のシステム: 小脳, Clinical Neuroscience, 査読無, Vol. 29, No. 2, pp. 167-171, 2011, Feb.
- ⑪ 平田 豊, 田中 良幸: 小脳神経ネットワークによる情報処理機構を模したロボット制御法の開発. 情報科学リサーチジャーナル Vol. 17, 2010, Mar.
- ⑫ 平田 豊: 目の輝きのメカニズム, 日本医学新報, 査読無, No. 4442, pp. 83-84, 2009, Jun.
- ⑬ Usui, S., Inagaki, K., Kannon, T., Kamiyama, Y., Satoh, S., Kamiiji, N., Hirata, Y., Ishihara, A., Shouno, H.: A Next Generation Modeling Environment PLATO: Platform for Collaborative Brain System Modeling. In ICONIP 2009, Ed. C. S. Leung, M. Lee, and J. H. Chan,

査読無, Part I, LNCS 5863, pp. 84-90, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, Dec.

[学会発表] (計 77 件)

- ① 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 山田 真吾, 平田 豊: 前庭動眼反射を用いたリアルタイム眠気予兆検知システムの開発と評価, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE2011-148, vol. 111, no. 482, pp. 213-217, 2012, Mar. (玉川大)
- ③ 金子 寛彦, 和田 佳郎, 平田 豊, 柴田 智広, 久代 恵介, 疋田 真一, 小高 泰, 三浦 健一郎, 松田 圭司, 鹿内 学, 長谷川 達央, 岩木 直, 水科 晴樹, 五島 史行, 野村 泰之, 村井 紀彦, 松延 毅, 栗田 昭宏, 原田 竜彦, 伊藤 泰明: 放物線飛行による微小重力および過重力下での傾き感覚に対する視覚と頸部深部感覚の関与, 第 28 回 宇宙利用シンポジウム予稿集, 日本学術会議講堂, 2012, Jan.
- ④ Hirata, Y.: A cerebellum-machine interface enables changes in neuronal activity to be causally linked with behavioral adaptation., Proc. The 3rd Global COE International Symposium Electronic Devices Innovation EDIS 2011, pp. 44-45, 2011, Dec. (Osaka)
- ⑤ 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.
- ⑥ Hirata, Y., Okamura, N., Baker, R.: Monocular and binocular behavior of the oculomotor neural integrator in goldfish., Society for Neuroscience, 2011. Nov., Washington DC.
- ⑦ 和久井 秀樹, 平田 豊: 輻輳角を指標とした漫然状態検知. 自動車技術会 2011 年秋季大会前刷集, 札幌コンベンションセンター, 2011, Oct.
- ⑧ Kashima, T., Wada, Y., Inui, T., Hirata, Y.: Effect of gravity on learning and memory of prism adaptation., Proc. 33rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and

- Biology. Society, pp.3568-3572, 2011, Sep. Boston
- ⑨ Hirata, Y., Katagiri, K., Tanaka, Y.: Direct causality between single Purkinje cell activities and motor learning revealed by a cerebellum-machine interface utilizing VOR adaptation paradigm., 4th International Symposium Society for Research on the Cerebellum. 2011, Sep.
- ⑩ Usui, S., Ikeno, H., Yamazaki, T., Okumura, Y., Kamiyama, Y., Hirata, Y., Ishihara, A., Kannon, T., Inagaki, K., Satoh, S., Kamiji, N.: Simulation Platform, INCF congress, Abstract Book, pp. 318-319, 2011, Sep. Boston
- ⑪ 片桐 和真, 田中 良幸, 平田 豊: 小脳マシンインタフェースを利用した運動学習と単一 Purkinje 細胞活動間の因果関係評価, 第 26 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 2011, Sep. (立命館大)
- 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.
- ⑬ Yamazaki, T., Okumura, Y., Satoh, S., Kamiyama, Y., Hirata, Y., Inagaki, K., Ishihara, A., Kannon, T., Usui, S.: Simulation Platform: Cloud-computing meets computational neuroscience., 20th Annual Computational Neuroscience Meeting CNS\*2011, 2011, Jul. Stockholm.
- ⑭ Hirata, Y.: The pupil and the VOR. Neuroscience seminar., University of Munich Hospital, 2011, Mar.
- ⑮ Hirata, Y.: Cerebellum-Machine Interface to understand the cerebellum as an adaptive motor controller. CoTeSys Seminar., Technische Universitat Munhen, 2011, Mar.
- ⑯ 和田 佳郎, 金子 寛彦, 平田 豊, 柴田 智広, 久代 恵介, 疋田 真一, 小高 泰, 三浦健一郎, 松田 圭司, 鹿内 学, 長谷川 達央, 岩木 直, 水科 晴樹, 五島 史行: ISS 実験計画: 長期宇宙滞在中の傾き感覚の形成に対する視覚と頸部深部感覚の関与, 第 27 回 宇宙利用シンポジウム予稿集, 宇宙航空研究開発機構・相模原キャンパス, 2011, Jan.
- ⑰ Hirata, Y.: What can we learn from goldfish about cerebellar motor learning?, Neuroscience seminar Stanford University, 2010, Nov.
- ⑱ 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)
- ⑲ Hirata, Y., Katagiri, K., Tanaka, Y.: Adaptive control of a robot arm by a single Purkinje cell using a vestibulo-ocular reflex motor learning paradigm., Program No. 786.6. 2010 Abstract Viewer/Itinerary Planner: Society for Neuroscience, 2010. Online. San Diego
- ⑳ Katagiri, K., Tanaka, Y., Hirata, Y.: Cerebellar Brain Machine Interface to evaluate roles of a single Purkinje cell in motor learning. Neuroscience Research 685, e328, 2010 (Neuro2010, Kobe)
- ㉑ Usui, S., Yamazaki, T., Ikeno, H., Okumura, Y., Satoh, S., Kamiyama, Y., Hirata, Y., Inagaki, K., Ishihara, A., Kannon, T., Kamiji, N., Akazawa, F.: Simulation Platform: Model simulation on the cloud Frontiers in Neuroinformatics. Conference Abstract: INCF Neuroinformatics2010, 2010, Sep., Kobe.
- ㉒ Inagaki, K., Kannon, T., Kamiyama, Y., Satoh, S., Kamiji, N., Hirata, Y., Ishihara, A., Shono, H., Usui, S.: Environment for an integrative model simulation: PLATO INCF Neuroinformatics2010, 2010, Sep. Kobe.
- ㉓ 片桐 和真, 田中 良幸, 平田 豊: 小脳-機械インタフェースによるモータ適応制御, 第 25 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.83-84, 2010, Sep. (岡山大)
- ㉔ 西山 潤平, 木下 伸一, 加島 崇史, 鹿島 智徳, 平田 豊: 瞳と反射性眼球によるドライバの眠気とその予兆検出法, 第 25 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.193-196, 2010, Sep. (岡山大)
- ㉕ 平田 豊: 前庭動眼反射の学習機構理解と眠気予兆検出への応用, 電気関係学会東海支部連合大会シンポジウム「眼球運動の制御・学習機構理解と応用」電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, CD-ROM, S2

- 5, 2010, Sep. 中部大
- ②⑥和田 佳郎, 平田 豊: 宇宙で回旋性眼球運動が誘発された理由を考える. 電気関係学会東海支部連合大会シンポジウム「眼球運動の制御・学習機構理解と応用」, 電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, CD-ROM, S2-2, 2010, Sep. 中部大
- ②⑦Inagaki, K., Hirata, Y., Usui, S.: A modeling study on the signal transformation for the microsaccade generation., 19th Annual Computational Neuroscience Meeting CNS\*2010, 2010, Jul. San Antonio.
- ②⑧Inagaki, K., Kobayashi, S., Hirata, Y.: The origin of the frequency selectivity in VOR motor learning revealed by a realistic cerebellar spiking neuron network model., 19th Annual Computational Neuroscience Meeting CNS\*2010, 2010, Jul. San Antonio
- ②⑨片桐 和真, 田中 良幸, 平田 豊: 小脳BMIによる単一Purkinje細胞活動を用いた直流モータ適応制御, 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 2010, Jul. (ホテルさっぽろ芸文館)
- ②⑩Ohata, Y., Tanaka, Y., Kawamoto, T., Hirata, Y.: Adaptive control of 2-wheeled balancing robot by cerebellar neuronal network. 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 2010, Jul. (ホテルさっぽろ芸文館)
- ②⑪高木 悠喜, 三浦 祥平, 平田 豊: 重力が眼球運動中枢積分器の学習と記憶保持に与える影響, 包括脳ネットワーク夏のワークショップ, 2010, Jul. (ホテルさっぽろ芸文館)
- ②⑫加島 崇史, 和田 佳郎, 桑田 成雄, 平田 豊: プリズム適応における学習と記憶保持特性に与える重力の影響, 第4回Motor Control 研究会抄録集, p.25-26, 生理学研究所, 2010, May. (自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター)
- ②⑬Shirakata, T., Tanida, K., Nishiyama, J., Hirata, Y.: Detect the Imperceptible Drowsiness. Proc. Society of Automotive Engineers World Congress 2010, Apr. (Detroit)
- ②⑭加島 崇史, 和田 佳郎, 桑田 成雄, 平田 豊: プリズム適応における学習と記憶保持特性に与える重力の影響, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2009-150, pp.367-372, 2010, Mar. (玉川大)
- ②⑮小林 誠一, 稲垣 圭一郎, 平田 豊: 小脳スパイクニューロンネットワークモデルの改良と運動学習再現シミュレーション, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2009-120, pp.191-196, 2010, Mar. (玉川大)
- ②⑯片桐 和真, 田中 良幸, 平田 豊: 小脳ブレインマシンインターフェースによるモータ適応制御, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2009-121, pp.197-200, 2010, Mar. (玉川大)
- ②⑰Nishio, K., Kimura, M., Nagahashi, T., Fujiyoshi, H., Hirata, Y.: Proposal of Inside-Out camera for measuring 3D gaze position in free space, CVPR2009 Video review, 2009.
- ②⑱Bassett, J., Ishihara, M., Baker, R., Hirata, Y.: Position-specific training in the oculomotor neural integrator. the Second International Symposium of the Society for Research on the Cerebellum, 2009, Oct., Chicago.
- ②⑳Katagiri, K., Tanaka, Y., Hirata, Y.: Is a cerebellar Purkinje cell capable of controlling a non-biological motor system?, the Second International Symposium of the Society for Research on the Cerebellum, 2009, Oct., Chicago.
- ③①Inagaki, K., Kannon, T., Kamiyama, Y., Sato, S., Kamiji, N., Hirata, Y., Ishihara, A., Shouno, H., Usui, S.: Platform for collaborative brain system modeling (PLATO) Program No. 290.21. 2009 Abstract Viewer/Itinerary Planner: Society for Neuroscience, 2009. Online., Chicago.
- ③②Bassett, J., Ishihara, M., Baker, R., Hirata, Y.: Position-specific training in the oculomotor neural integrator. Program No. 356.1. 2009 Abstract Viewer/Itinerary Planner: Society for Neuroscience, 2009. Online., Chicago.
- ③③Soga, J., Hirata, Y.: Changes in cerebellar Purkinje cell firing modulation during frequency differential VOR motor learning in goldfish. Program No. 660.22. 2009 Abstract Viewer/Itinerary Planner: Society for Neuroscience, 2009. Online., Chicago.
- ③④平田 豊: 眼球運動による眠気予知と金魚小脳活動によるモーター制御, 電気学会MSD委員会, 中部大学, 2009, Oct.
- ③⑤Hirata, Y., Nishiyama, J., Kinoshita, S.: Detection and Prediction of

Drowsiness by Reflexive Eye Movements.  
Proc. 31st Annual International  
Conference of the IEEE Engineering in  
Medicine and Biology Society,  
pp. 4015-4018, 2009, Sep. (Minneapolis)

- ④⑤ Usui S, Yamazaki T, Ikeno H, Okumura Y,  
Sato S, Kamiyama Y, Hirata Y, Inagaki  
K, Kannon T, Kamiji NL and Ishihara A:  
Simulation Platform: a test environment  
of computational models via web.  
Frontiers in Neuroinformatics.  
Conference Abstract: 2nd INCF Congress  
of Neuroinformatics Pilsen, Czech  
Republic, 2009, Sep.

- ④⑥ 稲垣 圭一郎, 平田 豊, 臼井 支朗: サッ  
カードを制御する神経回路網におけるマ  
イクロサッカー生成メカニズムに関す  
る一検討, 神経回路学会第 19 回全国大会  
講演論文集, pp. 124-125, 2009, Sep.  
東北大

- ④⑦ 小林 誠一, 稲垣 圭一郎, 平田 豊: 小脳  
スパイクニューロンネットワークモデル  
の改良と前庭動眼反射における周波数選  
択性の再現シミュレーション, 神経回路  
学会第 19 回全国大会講演論文集,  
pp. 90-91, 2009, Sep. 東北大

- ④⑧ Katagiri, K., Tanaka, Y., Hirata, Y.:  
Adaptive DC motor control by a  
cerebellar Purkinje cell the 7th  
edition of Progress in Motor Control,  
2009, Jul., Marseille, France.

- ④⑨ 片桐 和真, 田中 良幸, 平田 豊: 金魚小  
脳 Purkinje 細胞単一神経活動による直流  
モータ適応制御, 第 3 回 Motor Control 研  
究会抄録集, p. 31-32, 生理学研究所,  
2009, May. (自然科学研究機構岡崎コンフ  
アレンスセンター)

- ④⑩ 木下 伸一, 西山 潤平, 平田 豊: 反射性  
眼球運動によるドライバーの眠気と予兆  
検知, 自動車技術会 2009 年春季大会前刷  
集, パシフィコ横浜, 2009, May.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 5 件)

名称: 眠気予兆検出装置  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 特許 (韓国)  
番号: KR10-2011-7008567  
出願年月日: 平成 23 年 4 月 14 日  
国内外の別: 国外

名称: 眠気予兆検出装置  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 特許 (EP)  
番号: EP09814269.8  
出願年月日: 平成 23 年 4 月 11 日  
国内外の別: 国外

名称: 眠気予兆検出装置  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-529619  
出願年月日: 平成 23 年 3 月 18 日  
国内外の別: 国内

名称: 眠気予兆検出装置  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 特許 (中国)  
番号: CN200980136778.2  
出願年月日: 平成 23 年 3 月 18 日  
国内外の別: 国外

名称: 眠気予兆検出装置  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 特許 (米国)  
番号: US13/050.811  
出願年月日: 平成 23 年 3 月 17 日  
国内外の別: 国外

○取得状況 (計 1 件)

名称: 携帯通信端末  
発明者: 平田 豊  
権利者: 同上  
種類: 実用新案  
番号: 第 3158494  
取得年月日: 平成 22 年 3 月 10 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕

○ ホームページ等  
NC-Lab  
<http://nclab.solan.chubu.ac.jp/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