

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360111

研究課題名(和文) 歩行における高度踏破性及び頑健性を実現するための筋骨格・神経機構の構成論的解明

研究課題名(英文) Elucidation of the roles of neuromusculoskeletal systems for traversability and robustness in locomotion based on a constructive approach

研究代表者

青井 伸也 (Aoi, Shinya)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60432366

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：脳・身体・環境の相互作用から生み出される歩行の高度踏破性及び頑健性を実現するための筋骨格・神経機構の解明を目指し、ヒト・サル・ラットを対象に、計測データから運動機能を明らかにする解析的研究と、神経筋骨格モデルやロボットを用いて機能的役割を明らかにする構成論的研究を行った。その結果、ヒト運動解析では、位相応答曲線を同定して位相調整機構を明らかにし、サル運動解析では、4足・2足歩行での一次・補足運動野の寄与、ラット運動解析では、障害物跨ぎ歩行での小脳皮質の寄与を明らかにした。構成論的研究では、ラット神経筋骨格モデルや2脚ロボットを用いて、高度踏破性・頑健性に寄与する神経制御系の役割を検証した。

研究成果の概要(英文)：To clarify the roles of neuromusculoskeletal systems for traversability and robustness in locomotion, we conducted the following two approaches; 1. Analysis of measured data for humans, monkeys, and rats to investigate their motor functions and 2. Constructive approach using neuromusculoskeletal models and robots to evaluate the functional roles of neuromusculoskeletal systems. From the analysis of humans, we elucidated the phase modulation mechanism by identifying the phase response curve during walking. From the analysis of monkeys, we found the roles of the primary and supplementary motor areas during quadrupedal and bipedal locomotion. From the analysis of rats, we clarified the roles of the cerebellar cortex during stepping over an obstacle during walking. For the constructive approach, we evaluated the contribution of neural control system to traversability and robustness in locomotion using a neuromusculoskeletal model of rats and a biped robot.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：歩行 踏破性・頑健性 筋骨格・神経機構 ヒト サル ラット ロボット シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

日本では人口の高齢化に伴い、パーキンソン病や小脳失調など脳疾患による運動機能障害が増加している。これは現代社会が抱える重要な問題であり、緊急に解決すべき課題の一つである。そのような背景の下、近年のロボティクスやバイオメカニクス、システム工学研究などの発展を受けて、介護やリハビリなどにおける生活支援ロボットの社会的必要性が高まっている。ただしその実現には工学的技術発展だけでなく、筋骨格・脳神経系における制御系の作動原理を理解することも極めて重要であり、生物学的研究との連携は必須である。確かに従来から脳情報処理の機能解明は進んでいるが、実験条件や手法の制約により、動的な環境や身体に関連した脳機能の解明が不十分であるばかりでなく、研究成果も脳情報処理の現象論的記述に留まっている。従来から脳単体を対象とする神経生理学的手法に基づく分析的方法論には限界があり、脳の働きを身体や環境との動的な相互作用を通して捉えるシステム論的な方法論が必要である。そのためには、解析的手法から現象を明らかにする生物学的研究と、構成論的にその機能的役割を明らかにする工学的研究を緊密に連携させた新しい研究パラダイムを構築することが必要とされていた。

### 2. 研究の目的

現代社会においてバリアフリーが推進されているとはいえ、階段や段差など歩行中に乗り越えないといけない障害物は至る所に存在する。特に高齢者や歩行失調患者にとってこれは重要な問題であり、転倒防止のリハビリ支援など、これも緊急に解決すべき社会的課題の一つである。そもそも歩行とは、転倒を回避するよう前庭・体性感覚に基づき姿勢を調整する姿勢制御と移動運動を作り出す肢運動制御の巧みなバランスから生成されるものであり、どちらが疎かになっても実現できない。特に跨ぎ越すなどして障害物を回避する際には、障害物の高さや幅などを認識し、どこで跨ぎ越すか、その際どのように肢を動かすかなど時間的・空間的に統合された高度な制御が必要であり、姿勢と肢運動制御の統合は更に重要になる。この統合的制御機能から歩行の高度踏破性及び頑健性が実現されるはずであり、この機能破綻から歩行障害が生じると考えられる。

このような高度踏破性及び頑健性は、外的環境の様々な変化に対する歩行の適応的な遂行の結果として実現されるはずである。そこで本課題では、歩行における高度な踏破性及び頑健性、またそこに内在するであろうシステムとしての安定性・補償性に着目し、それを実現するための筋骨格・神経系の構成論的解明を目指した。具体的には、これまでに構築してきた生物学と工学の有機的な協力体制を更に発展させ、ヒト・サル・ラット3

種類の異なる生物を対象として、特に姿勢制御と肢運動制御の協調という視点から、1. 各生物の歩行中の計測データに基づき解析的に運動機能を明らかにする解析的手法と、2. 環境を通して運動を生成する神経筋骨格系の数理モデルに基づく動力学シミュレーションやロボットを構築して、実際に動かすことでその機能的役割を明らかにし検証する構成論的手法を緊密に連携することで、課題の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 解析的手法

外乱歩行や障害物回避歩行などを対象にして、各生物の歩行中のキネマティクス、筋電図、床反力、ニューロン活動などの計測データに基づいて解析的に筋骨格・神経系に内在する制御機構を明らかにし、工学研究における数理モデルやシミュレーションの構築と緊密に連携した。

#### (2) 構成論的手法

生物学的研究から明らかにされる知見に基づいて、環境を通して運動を生成する神経筋骨格系の数理モデルを構築し、動力学シミュレーションを用いて歩行運動をコンピュータ上で再現することで、筋骨格・神経系に内在する歩行制御に寄与する機能的役割を調べた。

更に、明らかにされる歩行制御機構を実現するために、工学的に歩行制御系を作成し、ロボットを用いて歩行運動を現実世界で具現化することで、その機能的役割を検証した。

### 4. 研究成果

#### (1) ヒトの運動解析

ヒトの運動解析では、外乱を負荷できるトレッドミルを用いて、ランダムな速度外乱が頻繁に入る環境下での計測を行った。計測データから等位相面や位相応答曲線の同定を行い、外乱後の復帰過程を記述することで、接地・離地時の位相調整機構を調べた(図1)。その結果、ベルトの加速と減速による外乱が、共に遊脚期間を短縮して支持脚期間を延長させるという同一の運動変化を生じさせることが明らかになった。

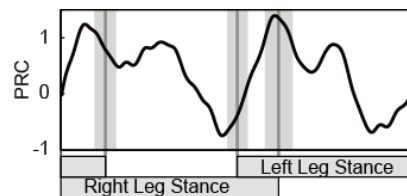


図1. 同定した位相応答曲線

更に、ベルトが左右に分かれ、それぞれ独立に制御することの出来る左右分離型トレッドミルを用いて、環境の変化に対する適応的運動調整機構を調べた。特に左右ベルトの速度差に応じた脚間位相差やデューティ比の変化について調べ、後述する2脚ロボットの実験結果と比較した。

## (2) サルの運動解析

サルの運動解析では、無拘束の状態でのトレッドミル上を4足と2足で交互に歩行する際の大脳皮質の一次運動野・補足運動野から単一神経細胞活動と体幹・四肢の筋活動を記録した。その結果、一次運動野は、肢運動の礎となる脊髄神経回路網の律動的活動をオンラインで一步毎に修飾し、移動に伴う重心の脚間授受を円滑に行うことに寄与することが示唆された。また、補足運動野は、体幹姿勢と肢のステップングとの協調的制御に寄与し、前頭葉性歩行障害の病態を説明し得る神経基盤の一つであることが示唆された。

## (3) ラットの運動解析

ラットの運動解析では、障害物跨ぎ越し歩行での小脳皮質の関与を調べるため、中間部・外側半球部、そしてプルキンエ細胞の活動とその可塑性に寄与する下オリーブ核を破壊した。その結果、中間部では破壊側に跨ぎ越す前・後肢の膝・足関節に過屈曲が見られ、下オリーブ核では爪先軌道に複数の変曲点が生じ、軌道が著しく障害されることが判明した。また、小脳外側半球部は平面歩行時の前肢及び後肢の制御にはほとんど寄与せず、障害物を最初に跨ぎ越す前肢において、肘関節の運動に関わる筋活動のタイミング制御と爪先の軌道生成に関与することが示唆された。

## (4) 構成論的研究

構成論的研究では、ラットの後肢筋骨格モデルに、筋活動の協調構造を示す筋シナジーや感覚情報による運動指令の調整を示す位相リセットや肢間協調制御など生理学的知見に基づく神経制御モデルを導入し、障害物跨ぎ越し歩行のシミュレーションを行った。その結果、肢間協調制御がより高い障害物の回避、位相リセットが跨ぎ越し後の安定化に寄与することを明らかにした(図2)。更に、左右分離型トレッドミル上での適応メカニズムを明らかにするため、このラットの後肢神経筋骨格モデルを用いて左右分離型トレッドミル歩行のシミュレーションを行った。その結果、左右のベルト速度が異なる特殊な環境でも、位相リセットにより適応的に歩行を継続することができ、左右の位相差やデュー

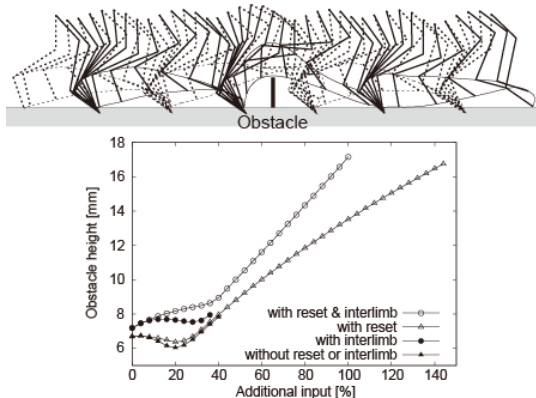


図2. ラット後肢モデルの障害物回避と位相リセット・肢間協調制御の寄与

ューティー比などがベルトの速度差に応じて適応的に変化し、ヒトや4足動物で見られる適応と同様の現象が起こることを確認した。

更に、これまで明らかにされた知見に基づいて2脚ロボットの制御系を設計し、頑健で適応的な歩行を実現した。特に、運動学シナジーに基づく運動計画によって4足から2足歩行へ歩容を連続的に遷移させることを可能にし、運動調整に寄与する位相リセットを用いて安定でロバストな歩容遷移が実現できることを明らかにした(図3)。更に、左右分離型トレッドミル上での歩行実験を行い、位相リセットを用いることでヒトと同様の適応機能が生じることを確認した(図4)。

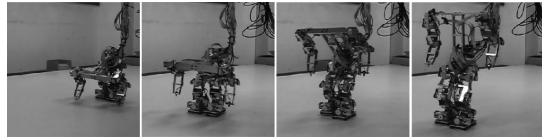


図3. 2脚ロボットの4足から2足への歩容遷移

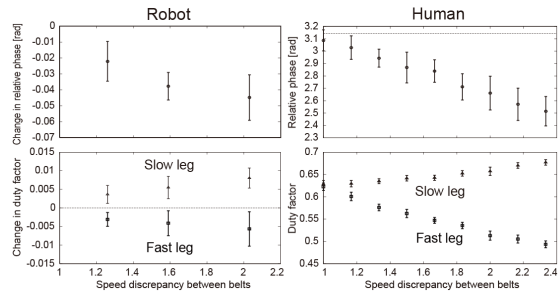


図4. 左右分離型トレッドミル歩行における脚間位相差とデューティー比の変化(ヒトとロボットの比較)

## 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33件)

S. Aoi, "Simple legged robots that reveal biomechanical and neuromechanical functions in locomotion dynamics", J. Robot. Mechatron., 査読有, 26(1):98-99, 2014 <http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=ROBOT002600010013.xml>

L. Firmin, P. Field, M. Maier, A. Kraskov, P. Kirkwood, K. Nakajima, R. Lemon, and M. Glickstein, "Axon diameters and conduction velocities in the macaque pyramidal tract", J. Neurophysiol., 査読有, in press

中隼克己, "ニホンザルの二足歩行と一次運動野:重力との戦いの足跡", バイオメカニズム学会誌, 査読無, in press

S. Aoki, Y. Sato, and D. Yanagihara, "Effect of inactivation of the intermediate cerebellum on overground locomotion in the rat: a comparative study of the anterior and posterior lobes", Neurosci. Lett., 査読有, in press

DOI:10.1016/j.neulet.2014.05.027

S. Fujiki, S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Hysteresis in the metachronal-tripod gait transition of insects: A modeling study", *Phys. Rev. E*, 査読有, 88(1):012717, 2013  
DOI:10.1103/PhysRevE.88.012717  
船戸徹郎, 青井伸也, 富田望, 土屋和雄, "運動学シナジーに基づくヒトの歩行制御構造の構成論的理解", *日本ロボット学会誌*, 査読有, 31(8):739-746, 2013  
DOI:10.7210/jrsj.31.739  
S. Fujiki, S. Aoi, T. Yamashita, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Adaptive splitbelt treadmill walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", *Auton. Robot.*, 査読有, 35(1):15-26, 2013  
DOI:10.1007/s10514-013-9331-6  
S. Aoi, T. Kondo, N. Hayashi, D. Yanagihara, S. Aoki, H. Yamaura, N. Ogihara, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Contributions of phase resetting and interlimb coordination to the adaptive control of hindlimb obstacle avoidance during locomotion in rats: a simulation study", *Biol. Cybern.*, 査読有, 107(2):201-216, 2013  
DOI:10.1007/s00422-013-0546-6  
S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, N. Tomita, T. Funato, T. Yamashita, K. Senda, K. Tsuchiya, "A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion", *J. R. Soc. Interface*, 査読有, 10(81):20120908, 2013  
DOI:10.1098/rsif.2012.0908  
S. Aoi, Y. Egi, and K. Tsuchiya, "Instability-based mechanism for body undulations in centipede locomotion", *Phys. Rev. E*, 査読有, 87(1):012717, 2013  
DOI:10.1103/PhysRevE.87.012717  
S. Aoki, Y. Sato, and D. Yanagihara, "Lesion in the lateral cerebellum specifically produces overshooting of the toe trajectory in leading forelimb during obstacle avoidance in the rat", *J. Neurophysiol.*, 査読有, 110(7):1511-1524, 2013  
DOI:10.1152/jn.01048  
H. Yamaura, H. Hirai, and D. Yanagihara, "Postural dysfunction in a transgenic mouse model of spinocerebellar ataxia type 3", *Neuroscience*, 査読有, 243:126-135, 2013  
DOI:10.1016/j.neuroscience.2013.03.044

T. Hosoido, F. Mori, K. Kiyoto, T. Takagi, Y. Sano, M. Goto, K. Nakajima, and N. Wada, "Qualitative comparison between rats and humans in quadrupedal and bipedal locomotion", *J. Behav. Brain Sci.*, 査読有, 3:137-149, 2013  
DOI:10.4236/jbbs.2013.31013  
T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, T. Imai, T. Aoyagi, and K. Tsuchiya, "Estimating the phase response curve of human walking using WSTA method", *Proc. SICE Annu. Conf.* 2013, 査読有, pp. 1298-1299, 2013  
DOI:なし  
S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Neuromusculoskeletal model of human running based on muscle synergy", *Proc. 5th Int. Symp. Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions*, 査読有, pp. 6-9, 2013  
DOI:なし  
T. Funato, K. Hashizume, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Experimental validation of nonlinear PID control model for human sway during standing", *Proc. 5th Int. Symp. Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions*, 査読有, pp. 10-13, 2013  
DOI:なし  
T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "The contribution of kinematic synergy on feedback control of human walking", *Proc. the 6th Int. Symp. Adaptive Motion of Animals and Machines*, 査読有, pp. 35-36, 2013  
DOI:なし  
S. Aoi, Y. Egi, R. Sugimoto, T. Yamashita, S. Fujiki, and K. Tsuchiya, "Functional roles of phase resetting in the gait transition of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion", *IEEE Trans. Robot.*, 査読有, 28(6):1244-1259, 2012  
DOI:10.1109/TRO.2012.2205489  
S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, and K. Tsuchiya, "Sensory regulation of stance-to-swing transition in generation of adaptive human walking: a simulation study", *Robot. Auton. Syst.*, 査読有, 60(5):685-691, 2012  
DOI:10.1016/j.robot.2011.12.005  
S. Aoki, Y. Sato, and D. Yanagihara, "Characteristics of leading forelimb movements for obstacle avoidance during locomotion in rats", *Neurosci. Res.*, 査読有, 74:129-137, 2012  
DOI:10.1016/j.neures.2012.07.007  
21 E. Takeuchi, Y. Sato, E. Miura, H. Yamaura, M. Yuzaki, and D. Yanagihara, "Characteristics of gait ataxia in 2

- glutamate receptor mutant mice, ho15J", 査読有, PLoS One, 7:e47553, 2012  
DOI:10.1371/journal.pone.0047553
- 22 S. Fujiki, S. Aoi, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Improving adaptive walking of a biped robot on a splitbelt treadmill by controlling the interlimb coordination", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomim., 査読有, pp. 396-401, 2012  
DOI:10.1109/ROBIO.2012.6490999
- 23 S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Cusp catastrophe embedded in gait transition of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomim., 査読有, pp. 384-389, 2012  
DOI:10.1109/ROBIO.2012.6490997
- 24 T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "A system model that focuses on kinematic synergy for understanding human control structure", Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Biomim., 査読有, pp. 378-383, 2012  
DOI:10.1109/ROBIO.2012.6490996
- 25 S. Aoi, N. Hayashi, T. Kondo, D. Yanagihara, S. Aoki, H. Yamaura, N. Ogihara, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Hindlimb obstacle avoidance during rat locomotion based on a neuromusculoskeletal model", Proc. the 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomech., 査読有, pp. 1046-1051, 2012  
DOI:10.1109/BioRob.2012.6290884
- 26 S. Fujiki, S. Aoi, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Emergence of hysteresis in gait transition of a hexapod robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", Proc. the 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomech., 査読有, pp. 1638-1643, 2012  
DOI:10.1109/BioRob.2012.6290733
- 27 T. Funato, Y. Yamamoto, S. Aoi, N. Tomita, and K. Tsuchiya, "Analysis of rhythm adjustment mechanism of human locomotion against horizontal perturbation", Proc. the 4th IEEE RAS/EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomech., 査読有, pp. 1359-1364, 2012  
DOI:10.1109/BioRob.2012.6290935
- 28 S. Aoi, T. Yamashita, and K. Tsuchiya, "Hysteresis in the gait transition of a quadruped investigated using simple body mechanical and oscillator network models", Phys. Rev. E, 査読有, 83(6):061909, 2011  
DOI:10.1103/PhysRevE.83.061909
- 29 N. Ogihara, S. Aoi, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya, and M. Nakatsukasa, "Forward dynamic simulation of bipedal walking in the Japanese macaque: Investigation of causal relationships among limb kinematics, speed, and energetics of bipedal locomotion in a non-human primate", Am. J. Phys. Anthropol., 査読有, 145(4):568-580, 2011  
DOI:10.1002/ajpa.21537
- 30 T. Hosoido, M. Goto, Y. Sano, F. Mori, K. Nakajima, F. Morita, N. Wada, "Hoffman reflex in a rat bipedal walking model", Neurosci. Lett., 査読有, 505:263-267, 2011  
DOI:10.1016/j.neulet.2011.10.035
- 31 S. Aoi, S. Fujiki, T. Yamashita, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Generation of adaptive splitbelt treadmill walking by a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 査読有, pp. 2274-2279, 2011  
DOI:10.1109/IROS.2011.6094583
- 32 S. Aoi, S. Fujiki, D. Katayama, T. Yamashita, T. Kohda, K. Senda, and K. Tsuchiya, "Experimental verification of hysteresis in gait transition of a quadruped robot driven by nonlinear oscillators with phase resetting", Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., 査読有, pp. 2280-2285, 2011  
DOI:10.1109/IROS.2011.6094480
- 33 T. Funato, S. Aoi, N. Tomita, K. Tsuchiya, "Human gait control suggested by the evaluation of the fluctuation of synergy", Proc. IEEE/SICE Int. Symp. Syst. Integr., 査読有, pp. 267-272, 2011  
DOI:10.1109/SII.2011.6147458

〔学会発表〕(計 14 件)

S. Aoi, "Locomotion dynamics and control in humans and animals", RIMS Conference / The 6th CREST-SBM International Conference, 2014/3/10, Kyoto University, Japan (招待講演)  
土屋和雄, "システムバイオメカニクス", 同志社大学先端バイオメカニクス研究センター 2013 年度研究成果発表会, 2013/3/7, 同志社大学 京田辺キャンパス (招待講演)  
青井伸也, "生物の適応的歩行制御機構の構成論的理解", H25 年度第 5 回ブレインウェア研究会, 2013/12/24, 東北大学電気通信研究所 (招待講演)  
青井伸也, "生物の歩行適応機能の構成論的理解", 第 5 回 Beyond Robotics, 2013/12/7, 大阪大学 吹田キャンパス

(招待講演)

中 隋 克 己, "Contribution of primary motor cortex to the control of locomotion in Japanese monkeys", Professor Roger Lemon 退官記念シンポジウム, 2013/12/5-6, ロンドン・神経学研究所(招待講演)

D. Yanagihara, "Role of the cerebellum in adaptive control of posture and locomotion", Luncheon Seminar in 2nd Joint World Congress of ISPG and Gait & Mental Function, 2013/6/26, Akita, Japan (招待講演)

柳原大, "姿勢・歩行制御における小脳の役割: 種々の小脳変性モデル動物での小脳失調から、ヒトにおける認知・予測等の高次脳機能への寄与", 大山リハビリテーション病院第8回脳生理講演会, 2013/3/17, 鳥取県西伯郡(招待講演)

柳原大, "歩行および姿勢の適応制御における小脳の役割", 新潟リハビリテーション大学スキルアップセミナー, 2013/3/10, 新潟県村上市(招待講演)

青井伸也, "ヒト歩行運動に内在する低次元構造とシステムモデル", 第18回創発システム・シンポジウム, 2012/9/2, 同志社びわこリトリートセンター(招待講演)

青井伸也, "生物に学ぶ適応的自律移動メカニズム", 日本航空宇宙学会 関西支部 第437回航空懇談会, 2012/7/13, 京都大学(招待講演)

青井伸也, "システム工学から見た歩行CPGの機能とモデル化", 第6回 Motor Control 研究会, 2012/6/22, 岡崎市・岡崎コンファレンスセンター(招待講演)

柳原大, "小脳機能: 姿勢と歩行の制御と学習における役割", 青雲会病院リハビリテーション部研修会, 2012/6/10, 鹿児島県始良市(招待講演)

中 隋 克 己, "霊長類の歩行運動における大脳の役割", 身体性情報学研究会シンポジウム, 2012/3/17, 大阪(招待講演)

中 隋 克 己, "トレッドミル歩行に関連したサル一次運動野の神経細胞活動", 京都大学霊長類研究所共同利用研究会, 2012/3/10, 犬山(招待講演)

[図書](計7件)

S. Aoi, "Low-dimensional structures embedded in human locomotion: Data analysis and modeling", Self-organization: Theories and Methods, W.J. Zhang (Ed.), pp. 155-170, Nova Science Publishers, 2013

S. Aoi, "Gait transition control of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion based on central pattern generator, phase resetting, and kinematic synergy", Engineering

Creative Design in Robotics and Mechatronics, M.K. Habib and J.P. Davim (Eds.), pp. 11-24, IGI Global, 2013

S. Aoi, "Biologically inspired CPG-based locomotion control system of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", Interdisciplinary Mechatronics: Engineering Science and Research Development, M.K. Habib and J.P. Davim (Eds.), pp. 37-68, Wiley-ISTE, 2013

森大志, 中 隋 克 己, "歩行・走行と大脳皮質", ヒトの動きの神経科学シリーズ・歩行と走行の脳・神経科学 - その基礎から臨床まで - (大築立志, 鈴木三央, 柳原大 編), pp. 83-99, 市村出版, 2013

青井伸也, "歩行制御のシステム論的理解", ヒトの動きの神経科学シリーズ・歩行と走行の脳・神経科学 - その基礎から臨床まで - (大築立志, 鈴木三央, 柳原大 編), pp. 100-112, 市村出版, 2013

S. Aoi, "Adaptive walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", Advances in Robotics - Modeling, Control and Applications, C. Ciufudean and L. Garcia (Eds.), pp. 1-18, iConcept Press, 2013

柳原大, ヒトの動きの神経科学シリーズ・歩行と走行の脳・神経科学 - その基礎から臨床まで - (大築立志, 鈴木三央, 柳原大 編), 市村出版, 2013

S. Aoi, "Adaptive walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", Advances in Robotics - Modeling, Control and Applications, C. Ciufudean and L. Garcia (Eds.), pp. 1-18, iConcept Press, 2013

柳原大, ヒトの動きの神経科学シリーズ・歩行と走行の脳・神経科学 - その基礎から臨床まで - (大築立志, 鈴木三央, 柳原大 編), 市村出版, 2013

S. Aoi, "Adaptive walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting", Advances in Robotics - Modeling, Control and Applications, C. Ciufudean and L. Garcia (Eds.), pp. 1-18, iConcept Press, 2013

柳原大, ヒトの動きの神経科学シリーズ・歩行と走行の脳・神経科学 - その基礎から臨床まで - (大築立志, 鈴木三央, 柳原大 編), 市村出版, 2013

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青井 伸也 (Aoi Shinya)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号: 60432366

### (2) 研究分担者

中 隋 克 己 (Nakajima Katsumi)  
近畿大学・医学部・講師  
研究者番号: 60270485

柳原 大 (Yanagihara Dai)  
東京大学・大学院総合文化研究科・准教授  
研究者番号: 90252725

土屋 和雄 (Tsuchiya Kazuo)  
京都大学・工学研究科・名誉教授  
研究者番号: 70227429

船戸 徹郎 (Funato Tetsuro)  
電気通信大学・情報理工学研究科・助教  
研究者番号: 40512869

### (3) 連携研究者

富田 望 (Tomita Nozomi)  
京都大学・理学研究科・特定研究員  
研究者番号: 00375156