

平成23年 5月 23日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19300200

研究課題名（和文）：リズムの相互同調を用いた歩行安定化システムの
高齢者転倒予防への有効性評価研究課題名（英文）：Walking Support System using Mutual Entrainment
and its Effectiveness for Gait Stabilization

研究代表者

三宅 美博（MIYAKE YOSHIHIRO）

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：20219752

研究成果の概要（和文）：

二人で並んで歩くときに自然と歩行リズムが同調することは誰にも経験があるだろう。しかし、このようなインターパーソナルな相互同調のメカニズムは十分には明らかにされておらず、臨床応用としてもほとんど進んでいない。そこで、われわれは非線形振動子を用いて構成される歩行リズムの生成モデル（仮想的歩行ロボット）と人間の歩行リズムの間で、足接地のタイミングを音刺激として交換する相互同調システムを構成してきた。本研究は、このシステムをパーキンソン病の歩行障害に適用し、歩行リズムの安定化と転倒予防への有効性を評価したものである。その結果、歩行周期の連続的減少として定義される加速歩行の緩和、および歩行周期ゆらぎの動的安定化を確認した。これらの結果は相互引き込みに基づくインターパーソナルなリズム同調の歩行安定化への有効性を示している。

研究成果の概要（英文）：

Considerable research attention has been devoted to interpersonal synchrony and to locomotor control. However their intersection, the interpersonal synchronization of stepping rhythms, remains relatively unexplored, despite being a common phenomenon that has considerable rehabilitation potential. Therefore, from the perspective of mutual entrainment of gait rhythms, we have constructed an interpersonal synchrony emulation system between a human subject and a virtual biped robot that generates pacing signals using nonlinear oscillators. This system synchronizes the gait cycles of a human and the robot in a cross-feedback manner, by presenting auditory stimuli that indicate the timing of the partner's foot contacting the ground. Here, we evaluated the effectiveness of this system in gait stabilization of Parkinson's disease patients, who display disturbances in rhythm formation of gait. The results showed that the gait festination as stride time reduction stabilized and the fluctuation of stride time showed high self-similarity. These results show the effectiveness of mutual entrainment in dynamically stabilizing gait disturbances.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学，リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：歩行リズム，相互引き込み，動的安定性，転倒予防，パーキンソン病，Walk-Mate

1. 研究開始当初の背景

誰にもあると思われるが、人と並んで歩くとき思わず足並みが揃ってしまう経験は身近なものであろう (Fig.1 左). これは身体の運動リズムが個体間で自発的に同調する現象であり、それが相手との一体感や歩行の安定性を生成することも直感的に理解される. 研究代表者らが提案する歩行介助システムは、このようなリズムの相互同調現象 (相互引き込み) に着目し、それを人間と機械のあいだで実現したものである. 具体的には、Fig.1 右のように、計算機中の仮想ロボット (“Walk-Mate”) と人間が、足音 (歩行リズム) を相互に交換して協調歩行する.

研究代表者らは本研究の開始当初において、予備的ではあるが、すでに本システムを様々な歩行障害に適用していた. Fig.2 は片麻痺患者と Walk-Mate の協調歩行の一例である. ここでは人間とロボットの歩行リズムが相互同調することで、歩行周期の不安定なゆらぎが減衰し安定化されていることが確認される. この結果は本介助システムの歩行安定化への有効性を強く示唆するものであり、このような背景から本研究においてその有効性が体系的に調査されたのである.

2. 目的と方針

本研究では、上記の歩行介助システムを高年齢者 (特にパーキンソン病患者の歩行障害) に適用し、Walk-Mate との協調歩行による歩行運動の動的安定化と転倒予防への有効性を評価することを目標とした. そのためには歩行運動の動的安定性の評価手法を開発すること、および、高齢者における歩行安定化への有効性を実際に評価することの2つのステップが必要であった. これらによって申請者が提案してきたリズムの相互同調に基づく歩行安定化システムの転倒予防への効果が明らかにされるのである.

具体的には、パーキンソン病の高年齢者の歩行障害として特徴的に観察される加速歩行および歩行周期ゆらぎの動的特性に着目した. 加速歩行とはいったん歩き始めると徐々に加速し最終的には転倒にいたる歩行障害である. また、このような患者の歩行周期ゆらぎは不規則性が高く自己相似性の指標であるスケール指数が小さくなることも知られている. これらの特徴に注目して、本研究では評価手法の開発と歩行介助システムの評価を行うのである.

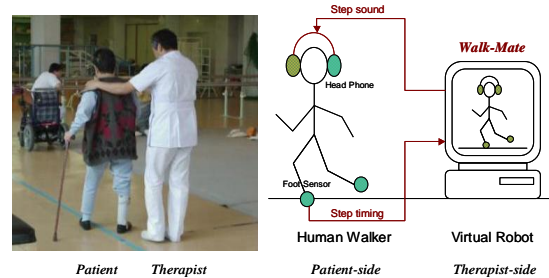


Fig.1 歩行リズムの相互同調と歩行介助

人間の脚接地タイミングをセンサで検出し仮想ロボット Walk-Mate に伝える. 仮想ロボットの脚接地タイミングも人間側に音刺激としてフィードバックする. これによって歩行リズムの相互同調が実現される.

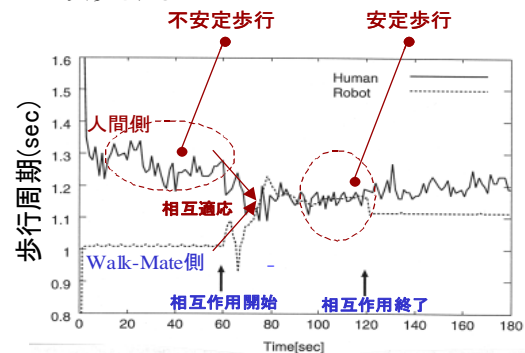


Fig.2 片麻痺患者における歩行安定化

相互作用前には人間側の歩行周期が大きく揺らいでおり歩行が不安定であるが、相互作用後には両者のリズムが相互同調し、歩行リズムの揺らぎが減衰し運動が動的に安定化した.

これらは高齢者が転倒を恐れず安心して社会参加できるための支援環境づくりであり、活力あふれるバリアフリー社会の実現に大きく寄与するものであろう.

3. 研究方法と成果 1

(加速歩行の安定化による転倒予防)

患者はFig.3のように歩行介助システムを装着し、提示されるリズム音を聞きながら廊下を歩行するように指示された. 廊下は水平で直線状であり、歩行距離は80mに固定された. パーキンソン病の患者は、21名 (男性8名、女性13名、52-92歳) に協力依頼した. 症状の程度を表す Hoehn and Yahr stage は2~4であった. このステージは、パーキンソン病の姿勢反射障害があるが、単独いずれも自立歩行が可能なレベルである. タスクとし

では、1回80mの歩行の中で単独歩行、同調歩行（リズム音を聞きながら歩行する条件）、単独歩行の順番で条件を切り替えた。

加速歩行とは、歩行中に歩行周期と歩幅が時間とともに減少する現象である。本項目では、歩行周期に注目し、その時間発展を最小2乗法を用いて線形近似し、この直線の傾き α より歩行周期減少の勾配を評価した。 α は1秒あたりの歩行周期の減少に対応するが、この値は歩行の不安定さの指標になる。

Fig. 4 に歩行周期と位相差の時間変化の一例を示す。最初の40秒間は単独歩行になっている。ここでは加速歩行の特徴が顕著に現われており、徐々に歩行周期が短くなる右下がりのトレンドが観察される。しかし、リズム音が聞こえる同調リズム歩行の開始後は、歩行周期の減少が緩和し歩行リズムが動的に安定化した。このとき位相差も目標位相差0.2radの近傍で推移しており、患者と歩行モデル間で歩行リズムが安定に同調していることが確認できる。そこで、歩行周期の減少速度 α を回帰直線の勾配として比較したところ、この患者の場合は、単独歩行($\alpha=-0.0021$)から同調リズム歩行($\alpha=-0.0004$)へ81.0%の顕著な緩和が観察された。さらに、同調リズム歩行の終了後も歩行周期の減少速度が緩和された歩行状態($\alpha=-0.0016$)が持続するアフターエフェクトも観察された。

全患者21名（男性8名、女性13名、平均75.3歳、Hoehn and Yahr stage 2~4）に対する歩行周期の減少速度 α の統計処理の結果をFig. 5に示す。予備的な実験により、健常者10名（男性7名、女性3名、平均25.6歳）の同条件における歩行周期変化の勾配($\alpha=0.00002\pm 0.00049$)を算出し、それに基づいて $\alpha < -0.001$ を加速歩行と定義した。21名中19名の患者に加速歩行が観察され、健常者との間に有意差（two-tailed t-test, $t(27)=6.68$, $p < 0.001$ ）が確認されたため、この19名の患者を歩行介助獅子テムの適用対象とした。このとき単独歩行と同調リズム歩行における α の平均値の差を対応のあるt検定で評価したところ、両条件間に有意な差が観察された（two-tailed t-test, $t(18)=5.39$, $p < 0.001$ ）。しかも同調歩行における α は健常者の α との間に有意差が観察されなかった（two-tailed t-test, $t(27)=1.639$, $p=0.113$ ）。このことから同調リズム歩行時には加速歩行が顕著に緩和されており、歩行周期の減少速度が全患者（ $N=19$ ）の平均で74.3%小さくなることが確認された。この結果はパーキンソン病の加速歩行の動的安定化への歩行リズムの相互同調の有効性を明確に示すものである。

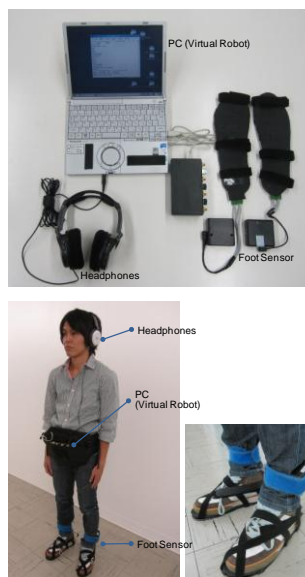


Fig.3 Walk-Mate および装着の様子

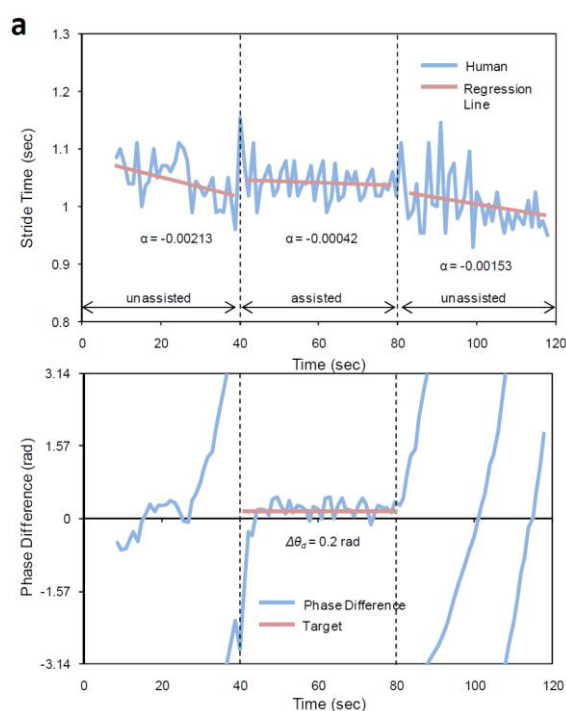


Fig.4 歩行周期と位相差の時間変化の一例

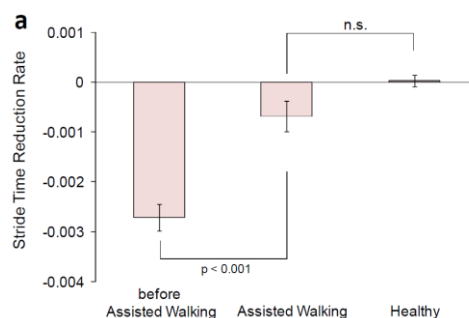


Fig.5 歩行周期減少速度 α の条件間比較

4. 研究方法と成果2 (歩行周期ゆらぎの安定化による転倒予防)

患者は、呈示されるリズム音の刺激を聞きながら、1周200mの水平な廊下を歩行するよう指示された。Walk-Mate (リズムの相互引き込み)、RAS (一定周期のリズム音刺激) の2種類のリズム音刺激とリズム音刺激を呈示しない Silent Control の計3実験条件を設定した。各々の条件は3つの独立した試行から構成されている。初めにリズム音刺激なしの歩行 (以下、単独歩行と記載) を計測し、次にリズム音刺激での歩行 (以下、リズム歩行と記載) を、最後に再び単独歩行を計測した。患者はパーキンソン病患者18名 (男性7名、女性11名、年齢68.57.5歳、Hoehn and Yahr stage 1~3) と若年健常者12名 (男性11名、女性1名、年齢25.03.2歳) であった。

本項目では、Walk-Mate、RASの2種類のリズム音刺激による歩行安定化への影響を歩行リズムの周期ゆらぎのスケール指数 γ を分析することで比較し、Walk-Mateの有効性を検証していく。周期ゆらぎの分析には、Fig.6のように、Pengらによって提案されたDFA (Detrended Fluctuation Analysis) を用いた。スケーリング指数 γ は0.5に近いほど時系列データがランダムなホワイトノイズであることを意味し、1.0に近いほど自己相似特性を持つことを意味している。自己相似性が高いほど動的な安定性も高いものと考えられる。先行研究では若年健常者の歩行周期のスケール指数 γ は1.0に近い値を示し、パーキンソン病患者の場合は症状が重いほど0.5に近い値を示すことが報告されている。

Fig.7に、パーキンソン病患者18名と若年健常者12名からなる健常群の歩行周期のスケール指数の平均値および標準偏差の結果を示す。beforeはリズム歩行前の単独歩行時、rhythm walkはリズム歩行時、afterはリズム歩行後の単独歩行時の結果を示している。まず、全条件のパーキンソン病患者18名のスケール指数に対して二元配置分散分析を行ったところ、交互作用が確認されたため ($p < .05$)、継時変化毎の条件 (Walk-Mate vs RAS vs Silent Control)、ならびに条件毎の継時変化 (before vs rhythm walk vs after) における単純主効果を検証していく。

リズム歩行時の条件間では、Walk-Mate条件が歩行周期のスケール指数 γ が最も1.0に近い値を示した ($\gamma = 1.00 \pm 0.18$, mean \pm s. d.). リズム歩行時の条件の単純主効果 (Walk-Mate vs RAS vs Silent Control) を検定したところ、単純主効果が確認された ($p < .01$). そこで下位検定を行ったところ、

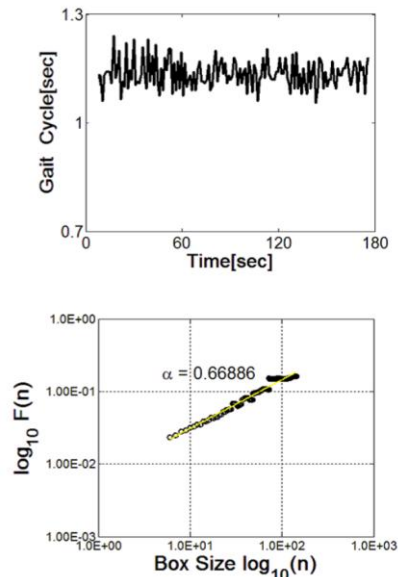


Fig.6 DFAによる歩行周期ゆらぎの分析

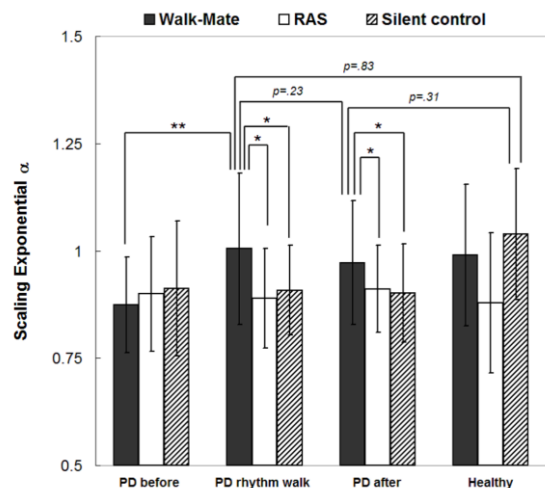


Fig.7 スケーリング指数 γ の条件間比較

Walk-Mate条件が他の2条件と比べてスケール指数 γ が有意に大きいことが確認された ($p < .05$). さらに、パーキンソン病患者のリズム歩行時のスケール指数の値が若年健常者が示す値と差があるか調べるため、健常群の Silent control 条件との比較を Dunnett 法を用いて検定した。その結果、Walk-Mate条件とのあいだのみで有意な差は見られなかった ($p = .83$). 以上の結果は、RAS条件より Walk-Mate条件の方がパーキンソン病患者の周期ゆらぎを改善し、それが若年健常者と同等の水準を示したことを意味する。

リズム歩行後の単独歩行時の条件間では、リズム歩行時と同様に Walk-Mate条件でスケール指数 γ が最も1.0に近い値を示した ($\gamma = 0.97 \pm 0.14$, mean \pm s. d.). 条件の

単純主効果 (Walk-Mate vs RAS vs Silent Control) を検定したところ, 単純主効果が確認され ($p < .05$), 下位検定では Walk-Mate 条件と他の 2 条件とのあいだに有意な差が確認された ($p < .05$). また, 健常群の Silent Control 条件との比較では, リズム歩行時と同様に Walk-Mate 条件とのあいだのみで有意な差は見られなかった ($p = .31$). 以上の結果は, Walk-Mate 条件におけるリズム歩行後の単独歩行における周期ゆらぎ特性が若年健常者と同等の水準に改善することを示している.

条件毎のスケーリング指数の継時変化では, Walk-Mate 条件において, リズム歩行時にスケーリング指数の値が上昇し, リズム歩行後の単独歩行時もリズム歩行時と近い値を示した. それに対し, RAS 条件では全体を通して大きな変化は見られなかった. 各条件毎での継時変化の単純主効果 (before vs rhythm walk vs after) を検定したところ, Walk-Mate 条件のみで単純主効果が確認された ($p < .01$). 下位検定において, リズム歩行前の単独歩行時と比べてリズム歩行時のスケーリング指数が有意に大きいことが示され ($p < .01$), リズム歩行時とリズム歩行後の単独歩行時とのあいだで有意な差は確認されなかった ($p = .23$). このことは本歩行介助システムを適用することで歩行周期ゆらぎの自己相似性が増加し, その改善効果が持続することを意味している.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

1) 西 辰徳, 鈴木一輝, 和田義明, 三宅美博, "腰軌道の運動学的分析に基づく片麻痺歩行評価システム," 計測自動制御学会論文集 (in press) 査読有

2) 武藤 剛, 金井 哲也, 佐久田博司, 三宅美博, "リズム音刺激を用いた歩行訓練における歩容の変化メカニズムの解析," 計測自動制御学会論文集, vol. 46, no. 5, pp. 281-288 (2010) 査読有

3) Miyake, Y., "Interpersonal synchronization of body motion and the Walk-Mate walking support robot," IEEE Transactions on Robotics, vol. 25, no. 3, pp. 638-644 (2009) 査読有

4) Miyake, Y., "Human-robot interaction and subjective time: As an example of co-creation system," Report of the Event Series of the Center for Advanced Studies

and Research in Information and Communication Technologies & Society at the University of Salzburg (ICT&S Center), Salzburg, Austria, pp.1-4 (2009) 査読無

5) Miyake, Y., "Complementarity between explicitness and implicitness in human communication," Proc. of 8th Sino-German Advanced Workshop in Cognitive Neuroscience and Psychology, Munich, Germany, pp.34-36 (2009) 査読無

6) Miyake, Y., "Human-robot interaction and subjective time "Walk-Mate" walking assist robot as a co-creation system," Proc. of 18th IEEE Int. Symp. on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN 2009), Toyama, Japan, Plenary Talk III, pp. 32-33 (2009) 査読無

7) 三宅美博, "「間 (ま)」と共創コミュニケーション," 舞踊学, vol.32, pp.67-74 (2009) 解説論文

8) 三宅美博, "共創とコミュニケーション," 人工知能学会誌, vol. 23, no. 5, pp. 659-664 (2008) 解説論文

[学会発表] (計 12 件)

1) 鈴木一輝, 織茂智之, 西 辰徳, 三宅美博, "リズムの相互同調に基づく歩行介助システムWalk-Mateによるパーキンソン病患者の歩行安定化に向けた試み," 第25回生体・生理工学シンポジウム論文集 (BPES2010), pp. 113-114, 2010年9月24日, 岡山

2) 三宅美博, 織茂智之, 和田義明, 松村さつき, 西辰徳, 鈴木一輝, "歩行リズムの相互同調を活用するパーキンソン病患者の加速歩行の安定化," 第51回日本神経学会総会抄録集, pp. 290, 2010年5月21日, 東京

3) 三宅美博, "歩行リズムの相互同調を活用するパーキンソン病患者の加速歩行の安定化," 国際高等研・研究プロジェクト「認知と運動における主体性の数理脳科学」報告書, pp. 77-91, 2010年3月1日, 奈良

4) 西辰徳, 鈴木一輝, 和田義明, 三宅美博, "腰軌道の運動学的分析に基づく片麻痺歩行評価システム," 第22回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 57-62, 2010年1月30日, 名古屋

5) 西辰徳, 和田義明, 三宅美博, "腰軌道

解析による片麻痺歩行の定量化と有効性評価,” 第10回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2009), pp. 247-250, 2009年12月24日, 東京

6) 三宅美博, 柴真理子, 和田義明, 長谷川幹, “歩行データベース作成および歩行パターン分析に関する研究,” 理工学振興会-オムロンヘルスケア: フィールドワーク共同調査開発成果報告書2009, pp. 1-52, 2009年10月20日, 東京

7) 三宅美博, 織茂智之, 松村さつき, 西辰徳, 石澤一紀, 青木清志, “歩行リズムの相互同調に基づくパーキンソン病患者の加速歩行の安定化,” 第3回パーキンソン病・運動障害疾患コンgres (MDSJ) プログラム・抄録集, pp. P1-F5, 2009年10月8日, 東京

8) 西辰徳, 松村さつき, 和田義明, 三宅美博, “腰軌道解析による片麻痺歩行の定量化とパターン分類の試み,” ヒューマンインタフェースシンポジウム2009講演会予稿集, p p. 647-652, 2009年9月3日, 東京

9) 石澤一紀, 和田義明, 三宅美博, “共創的歩行介助システムWalk-Mateの片麻痺歩行への適用,” 第21回自律分散システム・シンポジウム資料, pp. 117-122, 2009年1月22日, 鳥取

10) 石澤一紀, 青木清志, 和田義明, 三宅美博, “共創型歩行介助システムWalk-Mateの片麻痺歩行への適用,” 第9回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2008), pp. 1033-1034, 2008年12月6日, 岐阜

11) 青木清志, 石澤一紀, 和田義明, 織茂智之, 三宅美博, “パーキンソン病における共創型介助システムWalk-Mate の有効性評価,” 第9回SICEシステムインテグレーション部門講演会講演論文集 (SI2008), pp1031-1032, 2008年12月6日, 岐阜 (SI2008優秀講演賞)

12) 石澤一紀, 青木清志, 和田義明, 三宅美博, “共創型歩行介助システムWalk-Mateの片麻痺歩行への適用,” 第23回生体・生理工学シンポジウム論文集 (BPES2008), pp. 133-136, 2008年9月28日, 名古屋

[図書] (計3件)

1) 三宅美博, 自己組織化ハンドブック (分担: “共創型歩行介助ロボット,”

pp. 849-853), エヌ・ティイー・エス社, 東京 (2009)

2) 三宅美博, エージェントベース社会システム科学宣言 (分担: “「間(ま)」の共有と共創コミュニケーション,” pp. 53-64), (21世紀 COE プログラム・エージェントベース社会システム科学の創出プロジェクト編), 勁草書房, 東京 (2009)

3) 三宅美博, 身体性・コミュニケーション・こころ (分担: “共創システムと複雑系,” pp. 217-233), 複雑系叢書 Vol. 2 (早稲田大学複雑系高等学術研究所編), 共立出版, 東京 (2007)

[その他]
ホームページ等
<http://www.myk.dis.titech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅 美博 (Miyake Yoshihiro)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 20219752

(2) 研究分担者

武藤 剛 (Mutoh Takeshi)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号: 50433701