

平成 22 年 6 月 28 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760175

研究課題名（和文） 物理的意味を持つリーマン距離に基づく生体運動の理解

研究課題名（英文） Formulation of human movements by Riemannian distance interpreted in a dynamical sense

研究代表者

関本 昌紘（SEKIMOTO MASAHIRO）

立命館大学・総合理工学研究機構・研究員

研究者番号：40454516

研究成果の概要（和文）：

多関節系の運動をリーマン距離の観点から力学的・数学的に特徴づけ、これを利用し、多関節運動の慣性誘発効果（慣性、コリオリ、遠心力のみによる運動効果）の度合いを計測する「慣性誘発度メジャー」を構築した。このメジャーにより人間の運動を解析したところ、運動途中で慣性誘発運動に近い傾向を示し、この結果は人間が慣性誘発効果を利用するように自身の身体（多関節系）を協応させて動かしているとの示唆をもたらした。さらに、この力学解析を踏まえ、慣性誘発効果を利用した多関節ロボットの運動制御法を設計した。

研究成果の概要（英文）：

A measure called inertia-induced measure was developed by analyzing dynamical and mathematical characteristics of multi-joint movements from the viewpoint of Riemannian distance. The measure provides evaluation of the amount of inertia-induced movement (free motion by inertia, Coriolis, and centrifugal forces) of a multi-joint system. By applying the measure to actual human movements, it was shown that the smooth movements tend to be closer to the inertia-induced movements than the clumsy movements. From this observation, it was suggested that humans coordinate various regions of their body so as to use their own inertia-induced properties efficiently in smooth movements. Based on the results, a motion control method for a multi-joint robot using the inertia-induced effect was designed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：ロボティクス

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：慣性，運動計測，解析力学，多関節運動，リーマン距離，ロボティクス，運動制御，リーチング

1. 研究開始当初の背景

人間は普段、数十もの関節を協調して操り、運動をおこなっている。我々が普段何気なくおこなっている手先を目標位置まで持って

いく簡単なリーチング動作でさえ、腕の各部位は運動中に質量の存在に由来して生じる慣性力、遠心力、コリオリ力（便宜上、これらの力の総称を慣性誘発力、その効果を慣性

誘発効果と呼ぶ)により複雑な相互作用を伴う。そして、その運動を表す運動方程式は非線形の微分方程式で表される。その上、普段おこなう多くの作業では、作業を記述する変数に対して関節自由度数が多くなる。このとき、目的の作業を実現する運動戦略は無数に存在し、逆問題が不良設定となる。この「自由度問題」は1940年代に運動生理学者ニコライ・ベルンシュタインによって指摘され、関節群を協応して動かすことの重要性も示されたものの、人間が普段どのような運動制御戦略をとっているのかという問題に対し、全貌の解明には至っていない。特に、生体の運動制御において、慣性誘発力がどのように取り扱われているのか、その力学的な観点からの知見は不足している。質点の慣性効果はよく知られているのに対し、多関節運動の慣性誘発効果は十分に知られておらず、それを扱うための数学ツールも十分に整っていない状況にある。

2. 研究の目的

多関節運動の慣性誘発効果をリーマン距離の観点から力学的・数学的に特徴づけ、生体の運動制御における慣性誘発効果の利用について定量的に解析する手法を確立することを本研究の目的とした。

さらに、応用課題として、得られた解析結果を参考に、慣性誘発効果を利用したロボットの運動制御法を構築することを目指した。昨今、高負荷に耐えられるように設計された産業用ロボットアームとは別に、ヒューマノイドロボットや軽量型アシストロボットのよう、人間に近いところで作業するロボットが注目されている。このようなロボットには、安全性の観点からバックドライバビリティの高い(低ギア比関節構造を持つ)ことが望まれる。しかし、このようなロボットを人間と同等のスピードで動かすと、ロボットのリンク相互間に作用する質量由来の影響が無視できなくなる。このような状況下でもロボットを巧みに操作するには、多関節運動の性質を見極め、その上で運動制御を考える必要がある。このように、「多関節運動をどのように捉えるか」が人間の運動制御機構の解明とロボットの運動制御開発における共通課題であり、その中にある力学的性質・原理の解明を目標とした。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するために、以下の事項の考究に努めた。

(1) リーマン幾何学の導入による多関節運動の力学的解釈

多関節系の運動方程式をリーマン幾何学の観点から考察すると、その中に共通点が見

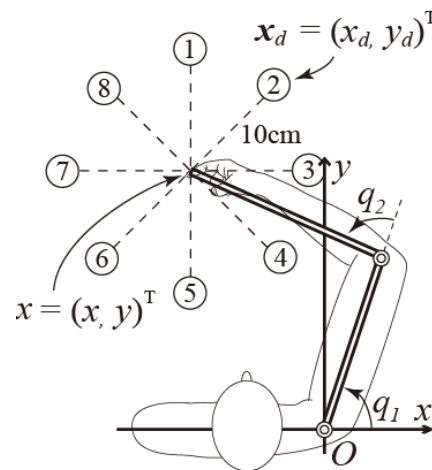


図1 リーチング実験

つかる。これを手がかりに、リーマン幾何学の知見に力学的意味づけをした。

(2) 「慣性誘発度メジャー」の開発

(1)より、リーマン距離が多関節系の慣性誘発運動に対応することを示せる。この特徴を利用し、多関節運動の慣性誘発効果の度合いを計測するメジャーを構築した。また、平面多関節運動のダイナミクスを考慮した数値シミュレーションにより、提案メジャーの有効性を確認した。

(3) 慣性誘発度メジャーによる生体運動の力学解析

人間のリーチング動作に慣性誘発度メジャーを適用し、運動中の慣性誘発効果を計測した。リーチング実験装置 Kinarm (BKIN Technologies, Canada)を用い、図1に示すように、水平平面内のリーチング動作を観測した。被験者には予め、右手人差し指で被験者の正面にあるスクリーン上にランダムに現れる8個のターゲットの一つに速く正確に到達するように指示した。ターゲットは初期手先位置から10[cm]離れた円上に配置し、その大きさは直径1.0[cm]の円とした。ランダムに現れる8個のターゲットへのリーチングを1試行として、全部で20試行おこなった。運動中の肩と肘の角度と角速度は、装置に備え付けられているエンコーダから計測した。得られた関節角度、角速度情報を用いて、慣性誘発度メジャーによる運動計測を以下の手順に従っておこなった。まず、得られた160回分の実験データから一つを取り出し、その運動データを運動時間に応じて30分割する。次に、分割したそれぞれの区間で、運動の長さに対応するリーマン距離を算出する。最後に、それぞれの区間で、得られた2つの値から慣性誘発度を後述の式より求める。こうして、1試行分の慣性誘発度メジャーのプロファイルを得る。このルーチンを全試行データ

に施し、慣性誘発度メジャーのプロファイルを得た。得られた結果から、人間のリーチング動作における慣性誘発効果の利用に関して考察した。

また、大腿義足使用者の日常生活動作 (ADL) の向上を目指した歩行解析への慣性誘発度メジャーの応用利用も試みた。義足使用者は、装具の使用に熟達してくると、ある程度の重みのある義足を好むようになるといわれるが、その微妙な調整には義肢装具士の長年の勘や使用者の使用感に頼るところが多い。大腿義足歩行の遊脚期運動に慣性誘発度メジャーを適用し、メジャーの値と使用者の主観評価の結果の相関を調べた。

(4) 慣性誘発効果を利用した多関節ロボットの運動制御法の構築

生体運動における慣性誘発効果利用の特徴を踏まえ、運動中に慣性誘発効果を利用した多関節ロボットアームの運動制御法を構築し、ダイナミクスを考慮した数値シミュレーションによりその効果を確認した。

4. 研究成果

リーマン幾何学の観点から多関節運動を調べ、リーマン距離が多関節系の慣性誘発運動に対応することを示した (雑誌論文[1], 学会発表[12])。図1に示すような n 個の回転関節 $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)^T$ と関節を結ぶリンクが連なる構造を持つ多関節系では、その取り得る姿勢全体の集合 M はリーマン多様体とみなせる。そこで、この多様体上のある点 p における二つの接ベクトルを $u, v \in T_p M$ とすれば、リーマン計量は

$$g_p(u, v) = \sum_{i, j=1}^n g_{ij}(p) u^i v^j \quad (1)$$

と表せる。ここに、 (g_{ij}) は $n \times n$ の正定対称行列である。いま、この (g_{ij}) に多関節系の慣性行列 $H(\mathbf{q})$ を選ぶ。すると、多様体上の2点 $(c(a) = p, c(b) = p')$ を結ぶ曲線の長さは、

$$\begin{aligned} L(c) &= \int_a^b \|\dot{c}(t)\| dt = \int_a^b \sqrt{g_{c(t)}(\dot{c}(t), \dot{c}(t))} dt \\ &= \int_a^b \sqrt{\dot{\mathbf{q}}(t)^T H(\mathbf{q}(t)) \dot{\mathbf{q}}(t)} dt \end{aligned} \quad (2)$$

により測れ、 $L(c)$ の下限で定義されるリーマン距離も

$$d(p, p') = \inf L(c(t)) \quad (3)$$

により決まる。また、測地線 $c(t)$ は、多様体 M の座標近傍 (U, ϕ) における局所座標 $\phi(c(t)) = (q_1(t), \dots, q_n(t))$ を用いて、二階の微分方程式

$$\ddot{q}_k(t) + \sum_{i, j=1}^n \Gamma_{ij}^k(c(t)) \dot{q}_i(t) \dot{q}_j(t) = 0 \quad (4)$$

より求められる (測地線の方程式)。リーマン計量に多関節系の慣性行列を選ぶとき、(4)式は

$$\ddot{\mathbf{q}}(t) + H(\mathbf{q}(t))^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}(\mathbf{q}(t)) + S(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \right\} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{0} \quad (5)$$

と書き表せる。これを多関節系の運動方程式

$$H(\mathbf{q}(t)) \ddot{\mathbf{q}}(t) + \left\{ \frac{1}{2} \dot{H}(\mathbf{q}(t)) + S(\mathbf{q}(t), \dot{\mathbf{q}}(t)) \right\} \dot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{u}(t) \quad (6)$$

と比較すると、測地線の方程式は、力学的には、制御入力 $\mathbf{u}(t)$ をゼロにして $p (= \mathbf{q}(a))$ から $p' (= \mathbf{q}(b))$ へ慣性誘発力のみによって動く運動を見ていることになる。それゆえ、リーマン距離は、ある姿勢 $p (= \mathbf{q}(a))$ から別の姿勢 $p' (= \mathbf{q}(b))$ への運動全体の中で(2)式による長さを最小にするもので、多関節系の慣性誘発運動に対応する。

さらに、多関節系のある部分が環境と接しながら運動する場合、すなわち、拘束条件付き運動下でも、拘束条件を満足する姿勢の部分集合を考えればその集合がリーマン部分多様体となり、拘束のない場合と同様に扱えることを示した。平面4自由度剛体リンクアームの場合、リンクに枝分かれのある場合 (人間の全身モデル)、多関節剛体リンク系が3次元空間において手先拘束を受けながら動く場合の慣性誘発運動について数値シミュレーションを行い、それらが力学的に自然で滑らかな運動となることを確認した (雑誌論文[1], 学会発表[9])。

前述のリーマン距離の力学的特徴を踏まえ、多関節運動の慣性誘発効果の度合いを計測する「慣性誘発度メジャー」を構築した (学会発表[7], [10])。運動方程式が(6)式で表される多関節系の二姿勢間 ($p (= \mathbf{q}(a))$ と $p' (= \mathbf{q}(b))$) の運動において、対象の運動が慣性誘発運動 (5)式より得られる測地線) に近いとき、その運動を(2)式により測った長さは、対応するリーマン距離に近くなる。逆に、運動が慣性誘発運動から遠いほど、(2)式の長さはリーマン距離より長くなる。二姿勢間 (p と p') の運動全体について、リーマン距離は距離の公理系を満たすため、どの運動の長さもリーマン距離と同じか、それよりは長くなる。それゆえ、(2)式の長さ (3)式のリーマン距離から、多関節系の慣性誘発運動の度合いを見積もれる。しかし、実際の多関節系 (ロボットや人間) の運動方程式は、(6)式とは異なり、粘弾性特性、クーロン摩擦、重力などの影響を含む。そのような場合

の運動方程式は,

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \left\{ \frac{1}{2}\dot{H}(\mathbf{q}) + S(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \right\} \dot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + K\Delta\mathbf{q} + \mathbf{f}_c + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} \quad (7)$$

となる. ここに, $C\dot{\mathbf{q}}$ は関節粘性, $K\Delta\mathbf{q}$ は関節弾性, \mathbf{f}_c はクーロン摩擦, $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ は重力の影響を表す. このような場合でも, 慣性誘発運動の度合いは見積もれる. いま, (7)式の運動において, 制御は行わず($\mathbf{u}(t) = \mathbf{0}$), 運動の開始時だけ外力(人の手など)によって多関節系が動かされた際のある時間区間 $t \in [a, b]$ の運動に着目する. 関節角度, 関節角速度, 慣性行列のパラメタは取得できるものとすれば, この運動の長さは(2)式より求まる. また, 対応するリーマン距離は, 両端の時刻での姿勢($\mathbf{q}(a)$, $\mathbf{q}(b)$), (2)式, (5)式から求まる. すなわち, リーマン距離は, (5)式の測地線の方程式を二つの境界条件($\mathbf{q}(a)$, $\mathbf{q}(b)$)のもとで解き, 得られた測地線を(2)式に用いれば得られる. この長さとリーマン距離を比較することで, 対象の運動の慣性誘発度を見積もれる. しかし, こうして見積もられた運動は, 慣性誘発運動からほど遠いと判断される. その理由は, 慣性誘発力以外の力が多関節系に作用しているからである. そこで次に, 慣性誘発力以外の力を相殺するように設計された制御入力トルク

$$\mathbf{u}(t) = C\dot{\mathbf{q}} + K\Delta\mathbf{q} + \mathbf{f}_c + \mathbf{g}(\mathbf{q}) \quad (8)$$

が適用されたときの運動を考える. 先ほどと同様の手順により, 特定の時間区間の運動の長さに対応するリーマン距離が求められる. このときの運動は慣性誘発運動となり, 見積もられた運動の長さは, 理論上, リーマン距離と一致する. これは, 質点系の運動において, 質点への外力がゼロの場合と外力の和がゼロの場合の運動が同等に扱える理由と同じである. それゆえ, (7)式のように慣性誘発力以外の力が作用するときでも, その力に抗する力が制御入力 \mathbf{u} として加われば慣性誘発運動を作り出せる. これまでの議論を踏まえ, 多関節運動のある時間区間 $t \in [a, b]$ に関して, その両端時刻での姿勢を $\mathbf{q}(a)$, $\mathbf{q}(b)$ として, 慣性誘発度メジャーを

$$R = L - d(\mathbf{q}(a), \mathbf{q}(b)) \quad (8)$$

で定義する. ここに, L は(2)式の長さ, $d(\mathbf{q}(a), \mathbf{q}(b))$ は二姿勢間($\mathbf{q}(a)$, $\mathbf{q}(b)$)のリーマン距離である. このメジャーでは, 対象の運動が慣性誘発運動であれば $R = 0$ を示す. 一方, 慣性誘発運動から遠くなるほど R は大きな正の値をとる. 時間区間 $t \in [a, b]$ は任意に設定できるため, 一つの動作における運動中の慣性誘発度に関心があ

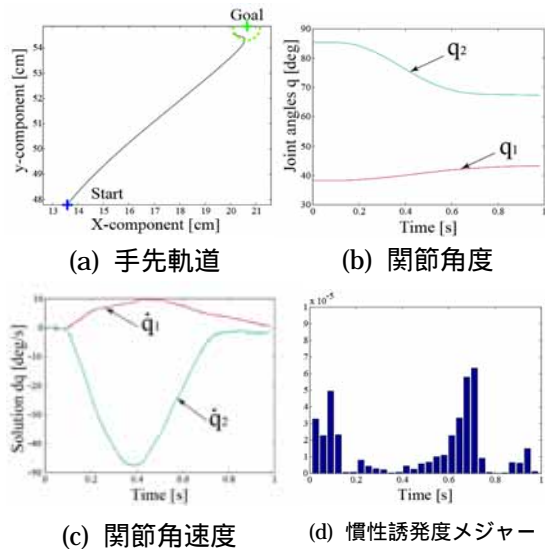


図2 ぎこちないリーチング運動

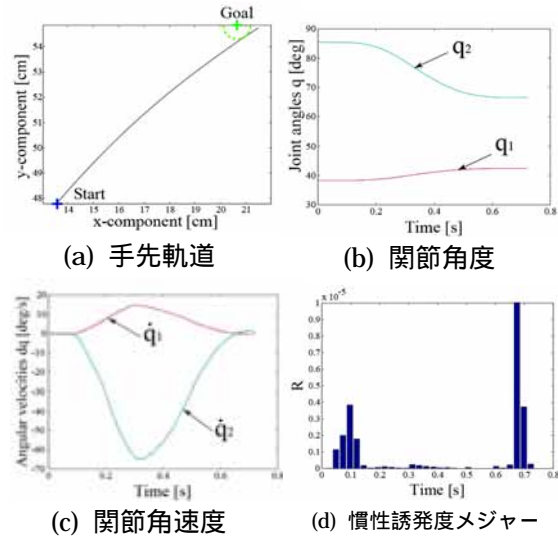


図3 滑らかなリーチング運動

るときは比較的小さな時間区間を, また, 運動全体の慣性誘発度に関心があるときは運動の開始時と終了時を区間に選ばよ.

図2, 3は, 人間上肢のリーチング動作に慣性誘発度メジャーを適用した際の結果の一部である. 図2はターゲット(図1参照)へのリーチングに対する13試行目, 図3は18試行目の結果で, 特徴的な結果を選んで示している. それぞれの図は, 手先軌道, 関節角度, 関節角速度, 慣性誘発度メジャーのプロファイルを示している. 図2では運動がターゲット近傍でぎこちなくなっているのに対して, 図3では最終的にターゲットへ到達していないものの, スムーズな運動となっている. 本研究での関心は, リーチングそのもののパフォーマンスよりは, リーチングにおける慣性誘発度の観測にある. そのため, タスクの失敗は問題としなかった. 慣性誘発度

メジャーのプロファイル(図2(d), 3(d))では, 運動の初期と終盤で値が大きくなる傾向がみられた. 前述のように, R は対象の運動が慣性誘発運動に近いときに小さく, 遠いときに大きくなる. R が大きくなる運動初期と終盤では被験者は自身の腕を積極的に動かしており, これらのタイミングで慣性誘発運動から遠くなるという慣性誘発度メジャーの計測結果は妥当といえる. 特に, ぎこちない運動では, 被験者は運動終盤でターゲットへ到達しようと手先軌道の修正を試みており, 慣性誘発度メジャーはこの振る舞いを図2(d)で大きな山として示している. 一方, 運動中盤において R は比較的小さくなっており, 特に, この傾向は滑らかなリーチングにおいて顕著に現れた. この計測結果から, 素早いリーチング時の運動中盤では慣性誘発効果を効果的に利用しており, 人間は自身の慣性誘発特性を考慮した運動戦略を取っているものと示唆される(学会発表[4], [7]).

また, 慣性誘発度メジャーは, 大腿義足使用者の日常生活動作(ADL)の向上を目指した歩行解析への応用も試みられた. 大腿義足歩行の遊脚期運動に慣性誘発度メジャーを適用したところ, 慣性誘発運動に近い運動と使用者の主観評価の結果に有意な相関が見られ, これまで経験に頼ってきた運動評価を慣性誘発度メジャーによって定量的に評価可能なことを示した(学会発表[5], [8]).

こうした生体運動における慣性誘発効果利用の特徴を踏まえ, 慣性誘発効果を利用したロボットアームの運動制御法を構築した. 初期姿勢と目標姿勢を境界条件に(4)式を解くことでその姿勢間の慣性誘発運動を導出し, 運動開始直後はその運動軌道にのるように制御をおこなう一方, 慣性誘発運動軌道に到達後は制御をおこなわずにその運動を利用し, 目標姿勢近傍に近づいたときに再度目標姿勢で静止するように制御をおこなう. このような制御法の効果について, 平面多関節アームを想定したダイナミクススペースの数値シミュレーションをおこなったところ, 慣性誘発効果の支配的なシステムでは運動途中に制御入力が無くても, 関節間で協応が取れ, 効果的な運動が実現可能なことを確認した(学会発表[2]).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

[1] S. Arimoto, M. Yoshida, M. Sekimoto, and K. Tahara, "A Riemannian-geometry approach for control of robotic systems under constraints," *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol.2, No.2, pp.107-116,

2009. (査読有)

[学会発表](計11件)

[1] 関本昌紘, "多関節ロボットの運動制御における慣性の積極利用", ロボティクスフォーラム 2010, 大阪産業創造館, Mar. 14, 2010.

[2] 関本昌紘, 有本卓, 川村貞夫, "リーマン距離に基づく慣性誘発効果を利用した多関節ロボットの制御", 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.212-215 (1D3-4), 芝浦工業大学, 東京, Dec. 24-26, 2009.

[3] 芝裕貴, 和田隆広, 竹内豊計, 関本昌紘, "大腿義足歩行における慣性誘発度の評価", 2009年度計測自動制御学会四国支部学術講演会予稿集, 221, 高知工科大学, 高知, Nov. 7, 2009.

[4] 関本昌紘, 有本卓, B. I. Prilutsky, 伊坂忠夫, 川村貞夫, "慣性誘発度メジャー: リーマン距離からの多関節リーチングの観測", 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3L1-03, 横浜国立大学, 神奈川, Sept. 15-17, 2009.

[5] 和田隆広, 竹内豊計, 関本昌紘, 芝裕貴, 有本卓, "リーマン距離に基づく大腿義足歩行の評価", 第27回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1C2-01, 横浜国立大学, 神奈川, Sept. 15-17, 2009.

[6] M. Sekimoto, S. Arimoto, and S. Kawamura, "Task-space iterative learning for redundant robots: Simultaneous acquisitions of desired motion and force trajectories under constraints," *Preprints of the 9th Int. IFAC Symposium on Robot Control*, pp.613-618, Gifu, Japan, Sept. 9-12, 2009.

[7] M. Sekimoto, S. Arimoto, B. I. Prilutsky, T. Isaka, and S. Kawamura, "Observation of human multi-joint arm movement from the viewpoint of a Riemannian distance," *Proc. of the ICROS-SICE Int. Joint Conf.* 2009, pp.2664-2669, Fukuoka, Japan, Aug. 18-21, 2009.

[8] T. Wada, T. Takeuchi, M. Sekimoto, Y. Shiba, and S. Arimoto, "Evaluation of gait with trans-femoral prosthesis based on Riemannian distance," *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, pp.1021-1026, Changchun, China, Aug. 9-12, 2009.

[9] S. Arimoto, M. Yoshida, M. Sekimoto, and K. Tahara, "A Riemannian-geometry approach for dynamics and control of object manipulation under constraints," *Proc. of the 2009 IEEE Int. Conf. on*

Robotics and Automation, pp.1683-1690, Kobe, Japan, May 12-17, 2009.

[10] 関本昌紘, 有本卓, 川村貞夫, "リーマン距離に基づく慣性運動メジャー", 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.1199-1200 (3H3-5), 長良川国際会議場, Dec. 5-7, 2008.

[11] 関本昌紘, "多関節運動の力学的解析 - リーマン距離に基づく生体運動の理解 -", (社)計測自動制御学会四国支部講演会, 香川大学工学部, Nov. 20, 2008.

[12] M. Sekimoto, S. Arimoto, S. Kawamura, and J.-H. Bae, "Skilled-motion plannings of multi-body systems based upon Riemannian distance," Proc. of the 2008 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1233-1238, Pasadena, California, May 19-23, 2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

関本 昌紘 (SEKIMOTO MASAHIRO)

立命館大学・総合理工学研究機構・研究員
研究者番号: 40454516

謝辞

本研究の遂行にあたり, 以下の方々には有益な議論, 実験協力を頂いた。

有本 卓 (ARIMOTO SUGURU)

立命館大学・総合理工学研究機構・客員教授
研究者番号: 00029399

Boris I. Prilutsky

ジョージア工科大学・理学部・准教授
研究者番号:

和田 隆広 (WADA TAKAHIRO)

香川大学・工学部・准教授
研究者番号: 30322564