様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 6 月 9 日現在

研究種目：若手研究(A)
研究期間：2006～2008
課題番号：18680023
研究課題名（和文）力学的観点に立ったロボットの身体と知能の相互発達と運動の創発

研究課題名（英文）Motion emergence and mutual progression of robot body and intelligence from dynamical point of view

研究代表者
岡田 昌史（OKADA MASAFUMI）
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：60323523

研究成果の概要：
本研究は，(1) ロボットの自律制御のためのコントローラ設計手法，および，(2) 制御では実現しにくい特性をロボットの身体(機構)によって補完する方法を提案するものである．これらの方法では非線形性，力学系がキーワードであり，(1)ではアトラクタを有する非線形力学系の設計によってロボットを所望の運動へと引き込ませる方法を提案している．(2)では機構の特異性を利用することで，ロボットのアクチュエータ低減化，非線形な柔らかさを実現する機構を開発するものである．

交付額

（金額単位:円）

	直接経費	間接経費	合　計
2006 年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2007 年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2008 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
年度			
年度			
総　計	23,200,000	6,960,000	30,160,000

研究分野：総合領域
科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス
キーワード：運動創発，知的制御，アトラクタ設計，運動遷移，身体設計，特異性，機構総合，非線形剛性

1．研究開始当初の背景

作業の実行を目的として精密な位置制御が要求される産業用ロボットは，作業のための目標運動パターンと，これにロボットを追従させるための安定化コントローラによって制御され，有効な結果を得てきた．しかし，ロボットが固定されていない環境に入り，自律的な運動が要求されるとき，先に固定された目標運動パターンは環境への適用を大きく阻害するため，これを用いない制御系の構成法が必要であろう．また，制御系を構成するにあたり，ロボットは先に存在し，コントローラ設計に焦点が当てられるのが一般である．しかし，数学的に見ればロボットもコントローラも力学系であり，これら両方に設計の自由度がある．そのため，制御系の構成を容易化するようにロボットの身体の設計を行うことも必要であろう．

2．研究の目的

本研究では，以下の２つの項目に焦点を当てた内容を実施し，ロボットの制御系構成のための方法論を展開する．

(1) アトラクタを有する非線形力学系の設計法とコントローラ設計への応用

① エネルギー距離に基づくアトラクタ設計

アトラクタを設計する場合に空間内の点の距離を定義する必要がある．特に，状態空間での

アトラクタ設計では運動に則した距離の定義である必要がある．そこで，本研究では，運動中のエネルギーに注目し，これを規範とした距離を定義することで，アトラクタの設計を容易にする．

②引き込み現象として表現されたロボットのコミュニケーション

我々の日常会話の中で，異なる状況において同一のものが異なる意味を持つことがある．これは会話をしている人がある興味へと引き込まれ同一の概念を持つことで成り立つものの考えられる．つまり，コミュニケーションには引き込みが大きな効果をもたらしているであろう．本研究では，アトラクタ設計法を応用し，二つのロボットが同一のアトラクタに引き込まれることで実現されるロボットのコミュニケーションを同調制御として設計する方法を提案する．

③ コントローラの運動・身体要素への分離と新たなコントローラの結合設計

コントローラを設計するためには多くの計算量を必要とする．一方，アトラクタを生成するコントローラは安定化すべきロボットの身体の情報と，生成すべく運動の情報を含んでいる．そこで，多くのコントローラからこれらの共通要素を抽出することで身体要素，運動要素を分離し，さらに新たなコントローラをこれらの組み合わせで実現する方法を提案する．

(2) ロボットの身体進化のための機構設計

① 機構的優位性を持つヒューマノイドロボットの身体設計

制御の観点からロボットは軽量であることが望ましく，アクチュエータ数は小さいことが望ましい．本研究では，機構の特異性を利用することで，多機能を有する機構を開発し，これを用いたヒューマノイドロボットを設計・試作する．

② 非線形剛性を持つ機構の開発

ロボットに受動的な柔らかさを導入することは，安全性，環境への柔軟性という点から必要なことである．しかし，単なる柔らかさは振動特性と作業実行のための姿勢制御を阻害する．そこで，本研究では非線形な剛性を実現し，目的に合わせて剛性の設計を可能にする機構の開発を行う．

3. 研究の方法

(1)-① これまでにロボットの動きを所望の動きに引っ込ませるための方法を提案してきた．これは，ロボットの運動方程式を

$$\dot{x} = f(x) + g(x,u) \tag{1}$$

とし，コントローラを

$$u = h(x) \tag{2}$$

としたとき，式(1)，(2)の連立微分方程式の解 x がある軌道

$$\Xi = \begin{bmatrix} \xi_1 & \xi_2 & \cdots & \xi_N \end{bmatrix} \tag{3}$$

へと引き込まれるようにコントローラを設計する手法である．これは以下の評価関数

$$J = \sum_{i=1}^{N} \left\| \xi_i - x_i \right\|^2 \tag{4}$$

を最小化するよう，(x,u)の組を求め，関数近似によって $h(x)$を x のべき乗多項式として

$$u = \Theta\phi(x) \tag{5}$$

として求めるものである．ここで，x はロボットの状態変数であるため，式(4)の評価関数は単位を同じとしない変数の 2 次形式で表されている．そこで，これに適当な重み行列を設定し，式(4)を

$$J = \sum_{i=1}^{N} \left\| W(\xi_i - x_i) \right\|^2 \tag{6}$$

とする．W の選び方として，$\|Wx\|^2$ が系の力学的エネルギーになるように設定することで，式(6)が状態空間内で意味のある距離を評価するものとなる．具体的に，式(1)を線形系としたとき，

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{7}$$

で表され，W は

$$W = S^{1/2}U^T \tag{8}$$

$$A^T A = USU^T \tag{9}$$

によって得られる．ただし，式(9)は A^TA の特異値分解を表す．

(1)-② 2 体のロボット

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1, u_1) \tag{10}$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_2) + g_2(x_2, u_2) \tag{11}$$

がそれぞれコントローラ

$$u_1 = \Theta_1\phi(x_1) \tag{12}$$

$$u_2 = \Theta_2\phi(x_2) \tag{13}$$

によってアトラクタを形成するよう制御されている場合を考える．このとき，式(12), (13)を

$$u_1 = \Theta_1\phi(x_1) + \lambda_1\psi(x_1 - x_2) \tag{14}$$

$$u_2 = \Theta_2\phi(x_2) + \lambda_2\psi(x_2 - x_1) \tag{15}$$

とする．ただし，λ_i は相手への同調度合いを表すパラメータである．これにより，2 体のロボットが同調し合い，引き込みとして表されたコミュニケーションを実現する．この方法を図 1 に表される 2 体のタップダンスロボットを用いて検証する．

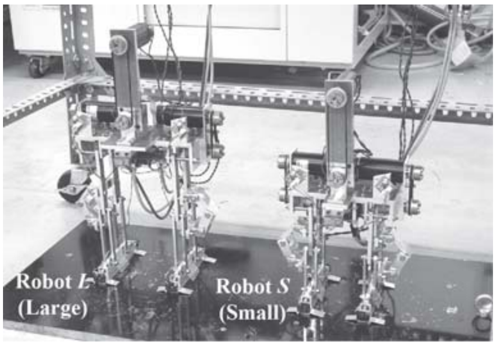

図 1 タップダンスロボット

(1)-③ 式(1)をある x 周りで線形化・離散化し，

$$x[k+1] = Ax[k] + Bu[k] + C \tag{16}$$

を得る．このとき，ロボットの運動は状態空間において図 2 のように表される．

$$\delta_k = x[k+1] - x[k] \tag{17}$$

はロボットの運動のみを表し，身体の情報を含んでいない．そこで，これを入力の張る空間(span B)へ射影したベクトル δ_k/B を

$$\delta_k / B = B\Lambda\phi(x) \tag{18}$$

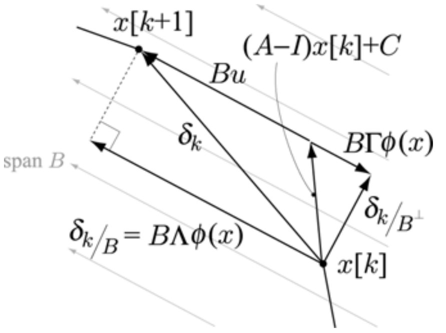

図 2 状態空間内でのロボットの運動

で表されるとする．一方，$(A-I)x[k]+C$ はロボットの身体の情報のみで構成されており，運動の情報を含んでいない．そこで，これを入力空間に射影したベクトルを

$$\{(A-I)x[k]+C\}/B=-B\Gamma\phi(x) \qquad (19)$$

とする．この結果から，コントローラは

$$u=\Theta\phi(x)=(\Lambda+\Gamma)\phi(x) \qquad (20)$$

で表され，しかもΛは運動の要素，Γは身体の要素としてΘが分離されている．そこで，複数のコントローラから共通要素としてΛ，Γを求め，これらから構成されるコントローラによってロボットの運動を生成する．

(2)−① 機構的優位性を持つヒューマノイドロボットとして，二重球面股関節，足首ロール軸フリー関節を有するヒューマノイドロボットを設計・試作する．また，フィードフォワード制御のみによる運動制御により，このロボットが倒立振子モデルとの高い合致性を有することを示す．

(2)−② 大きな非線形性を持つ剛性の実現のために，線形ばねと機構の非線形性を利用した剛性機構を設計・試作し，その非線形剛性の解析を数学的に行う．また，機構の総合方法を利用し，衝撃を吸収する脚機構を開発する．

4. 研究の成果

(1)−① 線形の倒立振子を想定したシミュレーシ

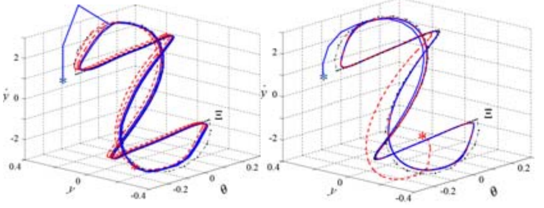

図 3 倒立振子のアトラクタ設計

ョンにより，従来法では図 3 の左図にあるように，生成されるアトラクタが幅を持っていたのに対し，提案する手法では右図のように生成される運動がシャープなラインとなることが示された．これは新たな方法が力学系に実現しやすい引き込みをもたらし，制御系の設計を容易にしていることを示している．

(1)−② 式(12)，(13)のコントローラを用いた場合，ロボットの運動は図 4 上図のように同調しない運動を得た．これに対し，式(14)，(15)のコントローラを用いた場合には下図のように同調する結果を得た．この結果から以下の結論が導かれる．

・この結果はロボットのコミュニケーションが引

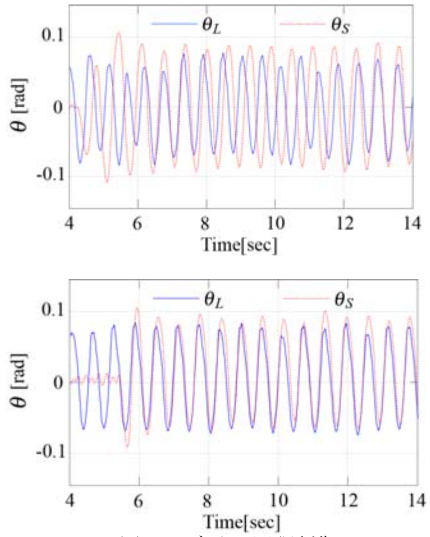

図 4 ロボットの同調制御

き込みとして実現されたことを示している．

・コミュニケーションを行った場合には，それぞれが相手の運動に合わせた運動を実現するため，2 つの間の周期運動として同調運動が実現される．

・λが零の場合は，独自の運動を続ける(コミュニケーションをしていない)ものであり，大きな値の場合には，相手への追従を主とする運動が実現される．

(1)−③ 図 5 はタップダンスロボットを想定したシミュレーション結果である．本来の運動が青線で

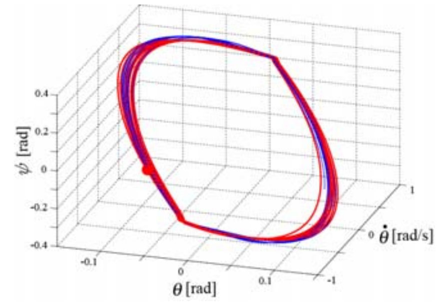

図 5 タップダンスロボットの運動生成

示されるのに対し，Λ，Γの結合で得られた運動が赤線で示される．この結果から，二つの場合において同様の結果が得られ，本手法の有効性が示される．さらに，(a)周波数の類似する運動からΛ，Γを抽出した場合，(b)周波数の全く異なる運動からΛ，Γを抽出した場合について，

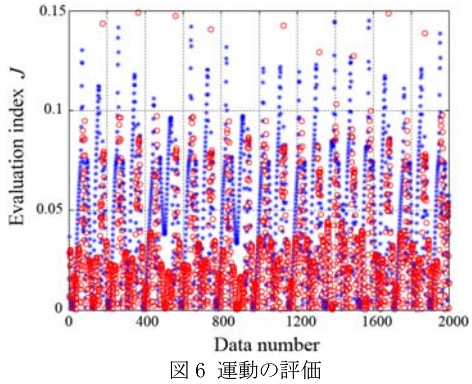

図 6 運動の評価

$$J = \left\| x[k+1] - x[k] - B\Lambda\phi(x[k]) \right\| \quad (21)$$

を評価関数として運動の類似性を調べた．この結果を図６に示す．横軸は運動中のデータの番号である．(a)の場合が赤の○で，(b)の場合が青の＊で表される．この結果から，類似する運動を同一と見なした場合，その共通となる運動要素は適切なベクトルを表し，式(21)の評価関数が小さくなる．一方，異なる運動から得られる共通要素は適切なベクトルを表しておらず，評価関数が大きくなることが分かる．これにより，異なる身体を持つロボット間の運動の類似性を評価する指標が得られていると判断される．

(2)-① 図７に表されるヒューマノイドロボットを設計・試作した．このロボットの特徴を述べる．

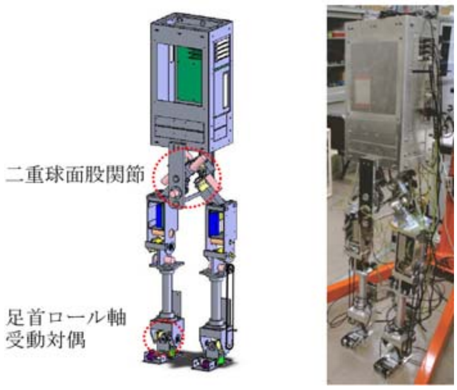

図７ 機構的優位性を持ヒューマノイドロボット

(i) 二重球面股関節

従来の股関節は図８左にあるような自由度配置を持つ．そのため，安定化制御のために上半身を使用するためには脚部の連動した動きを要求する．一方，二重球面股関節は左右の股関節の回転中心を一点で交わらせたもので，右にある自由度配置を持ち，上半身の回転３自由度を持つ．これは脚部と上半身の動きの連動をなくし，腰関節の役割も果たしている．これにより，腰関節のアクチュエータの低減化が達成されている．

(ii) 足首ロール軸受動対偶

足首ロール軸は大きなトルクを発生しても，足裏が地面から離れる現象を引き起こしてしまうため，発生可能なトルクは大きくない．そこで，本研究では足首ロール軸を図 9 にあるように受動対偶とし，アクチュエータを取り去った．これによりアクチュエータ数の低減化が達成されるばかりでなく，ZMP を規範とした倒立振子モデルとの

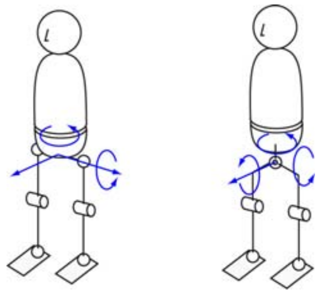

図８ 二重球面股関節

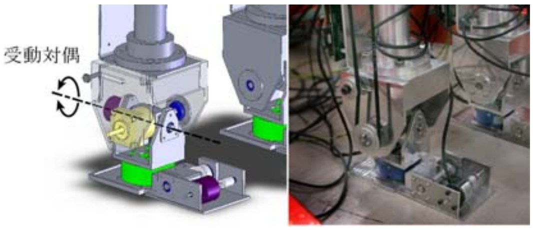

図９ 足首ロール軸受動対偶

一致性を高めることができた．実際，フィードフォワード制御のみにより足踏み動作を可能として

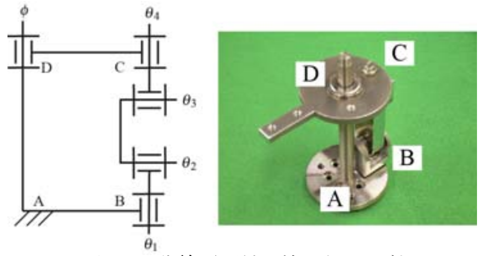

図 10 非線形剛性を持つねじりばね

おり，これはモデルと実際の一致性を示している．

(iii) ヒューマノイドロボットのための情報通信ネットワーク

ホスト PC とモータドライバ，エンコーダ検出カウンタ間の通信として，メモリ共有型ネットワーク(CuNet)を採用し，これを搭載したモータドライバを開発した．これにより，パケットのロスに対してロバストな構成になり，制御系の電気的安定性を達成した．

(2)-② 図 10 に表されるねじりばね機構を開発した．この機構は零剛性から極高剛性へと変化するもので，機構の特異性を利用することで，硬いもので柔らかさを実現するものである．この閉リンク系の拘束条件は A→B→ C→D→A というループを考えることで

$$F(\Theta) = 0 \quad (22)$$

で与えられる．これは位置と姿勢の拘束条件であり，6 つの方程式からなる．これをあるΘ_0周りでテイラー展開すると，

$$F(\Theta_0 + \Delta\Theta) = F(\Theta_0) + J(\Theta_0)\Delta\Theta \quad (23)$$

が得られる．ただし，$J \in R^{6\times5}$ は拘束条件のヤコビ行列である．いま，

$$J(\Theta_0)\Delta\Theta = 0 \quad (24)$$

が満たされるときを考えよう．このとき，このリンク系は他のリンクのひずみを生じることなく$\Delta\Theta$の回転を可能とするため，零剛性が達成される．また，この条件を満たす零でない$\Delta\Theta$が存在するための条件は

$$\mathrm{rank}\, J(\Theta_0) < 5 \quad (25)$$

を満たすことであり，これは機構の特異性から発生する．この機構において，

$$\Theta_0 = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 & \phi \end{bmatrix} = 0 \quad (26)$$

のとき，

$$\mathrm{rank}\, J(\Theta_0) = 3 < 5 \quad (27)$$

であり，このとき J の補空間の正規直交基底は

$$\Delta\Theta_1 = \begin{bmatrix} -0.71 & 0 & 0 & 0.71 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\Delta\Theta_2 = \begin{bmatrix} 0.33 & -0.41 & 0.41 & 0.33 & 0.66 \end{bmatrix} \quad (29)$$

で得られる. 特に, $\Delta\Theta_2$ はϕの要素(第 5 要素)が

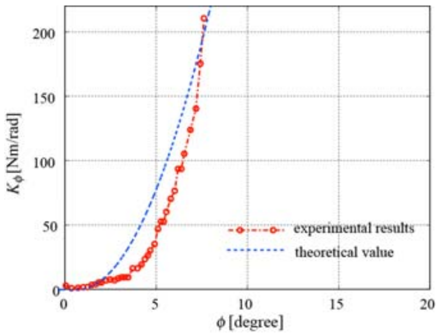

図 11 機構の非線形剛性

零ではないため, ねじり剛性零で回転することを表している. この機構の剛性を計測した結果とその理論値を図 11 に示す. この結果から, この機構は大きな非線形性を持つ剛性を有しており, さらに, 零剛性から極高剛性まで変化する様子が分かる. さらに, この機構を用いた, 図 12 にある四脚ロボットを試作し, 歩行動作において胴体

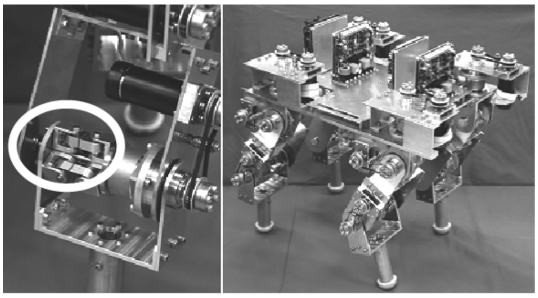

図 12 非線形剛性機構を持つ四脚ロボット

の上下運動が小さくなることを示した.

この機構の剛性は大きな非線形性を有するが, その特性は機構によって決定されており, 設計自由度が小さい, そこで, 図 13 にあるような脚機

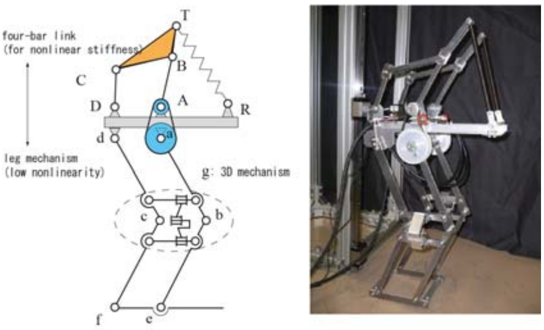

図 13 非線形剛性を持つ脚機構

構を設計した. この機構では, 床反力が TR 間の線形ばねによって生み出される機構であり, 胴体にある 4 節閉リンク機構によってその特性が設計可能である. 姿勢と静力学に基づく機構の総合法によってリンクの長さを最適化し, 図 14 にあるように着地における衝撃を吸収することを示し

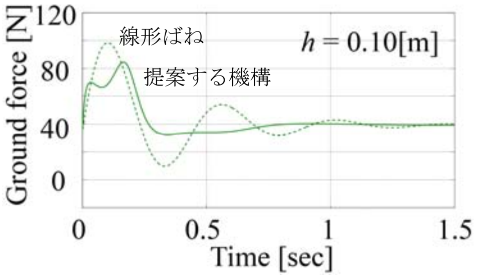

図 14 着地における衝撃吸収

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 4 件)

① 岡田昌史, 紀晋太郎, 菅谷侑司, 構造的特異性を利用した零/極高剛性を実現するトルク伝達機構とそのロボット関節への応用, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.4, pp.442-448, 2009 (査読有)

② 岡田昌史, 力学的情報処理による運動の表現と設計, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.5, pp.678-683, 2007 (査読有)

③ 岡田昌史, 村上健治, 軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御によるコミュニケーション原理の表現, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4, pp.545-553, 2007 (査読有)

④ Masafumi OKADA, Attractor Design of Dynamics based on Energy Distance in State-Space for Linear System, International Journal of Simulation Systems, Science and Technology – Special Issue on Mechatronics Technology –, Vol.7, No.8, pp.47-54, November, 2006 (査読有)

〔学会発表〕(計 20 件)

①清水洋介, 芥川浩之, 岡田昌史, 機構的優位性によるヒューマノイドロボットのモデル化と運動制御の容易化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A1-E08 (CD-ROM), 2009 年 5 月 26 日, 博多市(査読なし)

②渡辺将旭, 岡田昌史, 運動の力学的意味を考慮したコントローラの身体・運動要素への分解とこれを用いた運動評価, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2A1-B11(CD-ROM), 2009 年 5 月 25 日, 博多市 (査読なし)

③武石純, 岡田昌史, 閉リンク系を用いた非線形剛性のための機構総合と衝撃吸収への応用, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 1P1-D15 (CD-ROM), 2009 年 5 月 25 日, 博多市 (査読なし)

④Masaaki WATANABE and Masafumi OKADA, Controller Decomposition and Combination Design of Body / Motion Elements based on Orbit Attractor, Proc. of the IEEE International

Conference on Robotics and Automation (ICRA'09), pp.1364-1369, May, 14th, 2009, Kobe, JAPAN(査読有)
⑤Masafumi OKADA and Jun TAKEISHI, Design of Nonlinearity of Passive Stiffness using Closed Kinematic Chain for Impact Absorption, Proc. of JSME International Conference on Motion and Power Transmissions(MPT2009), pp.567-572, May, 13th, 2009, Matsushima, JAPAN (アブストラクト査読有)
⑥渡辺将旭, 岡田昌史, 軌道アトラクタに基づくコントローラの身体・運動要素への分解と組み合わせによる設計, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 3F1-07(CD-ROM), 2008 年 9 月 9 日, 神戸市 (査読なし)
⑦清水洋介, 森田堅次郎, 岡田昌史, ヒューマノイドロボット設計における重量軽減化を目的としたアクチュエータ数の低減化, 第 14 回 日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷り集, 2008 年 7 月 12 日, 東京 (査読なし)
⑧ Masafumi OKADA and Shintaro KINO, Nonlinear Passive Stiffness using Mechanical Singularity and Its application for Four-legged Robot, Proc. of the 17th CISM - IFToMM Symposium (Romansy17), pp.551-558, July, 9th, 2008, Tokyo, JAPAN (査読有)
⑨清水洋介, 森田堅次郎, 岡田昌史, 機構的優位性を持つヒューマノイドの身体進化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2008), 2A1-D03(CD-ROM), 2008年6月 7 日, 長野市 (査読なし)
⑩渡辺将旭, 岡田昌史, 場の重ね合わせと状態空間写像に基づくロボットの運動創発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2008), 2P2-I21(CD-ROM), 2008 年 6 月 7 日, 長野市 (査読なし)
⑪菅谷侑司, 岡田昌史, 非線形ばね機構を用いた四脚ロボットの運動制御 — 構造的特異性による硬さと柔らかさの両立 —, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(Robomec2008), 1A1-E23(CD-ROM), 2008年6月 6 日, 長野市 (査読なし)
⑫ Masafumi OKADA and Shintaro KINO, Torque Transmission Mechanism with Nonlinear Passive Stiffness using Mechanical Singularity, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'08), pp.1735-1740, May, 22nd, 2008, Pasadena, USA (査読有)
⑬渡辺将旭, 岡田昌史, 軌道アトラクタに基づく身体・運動記号の設計とその物理的意味表現, 第 25 回 日本ロボット学会学術講演会, 1D14(CD-ROM), 2007 年 9 月 14 日, 津田沼市 (査読なし)
⑭岡田昌史, 紀 晋太郎, 構造的特異性による機構の零剛性とこれを利用したトルク伝達のための非線形剛性特性機構, 第 13 回 日本 IFToMM 会議シンポジウム前刷り集, pp.59-64, 2007 年 7 月 12 日, 東京 (査読なし)
⑮岡田昌史, 紀 晋太郎, 構造的特異性を利用した受動可変剛性を持つトルク伝達機構, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07, 1A2-H03, 2007 年 5 月 11 日, 秋田市 (査読なし)
⑯Masafumi OKADA and Kenji MURAKAMI, Robot Communication Principal by Motion Synchronization using Orbit Attractor, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07), pp.2564-2569, 12th, April, 2007, Roma, ITALY (査読有)
⑰Masafumi OKADA and Kenji MURAKAMI, Robot Motion Emergence by Orbit Attractor Design for Tapping Dance Robot Control - Experimental Evaluation with Drastic Change of Dynamics Property -, Proc. of The 10th International Conference on Mechatronics Technology (ICMT2006), Nov., 21st, 2006, Mexico City, Mexico (査読有)
⑱岡田昌史, 軌道アトラクタによるロボットの運動記号と身体記号の設計, 第 24 回日本ロボット学会学術講演会, 1D31, 2006 年 9 月 15 日, 岡山市 (査読なし)
⑲村上健治, 岡田昌史, 岩附信行, 軌道アトラクタ設計によるロボットの運動創発とタップダンスロボットの制御 - 力学特性の大きな変化を伴う運動への適用 -, 第12回日本IFToMM会議シンポジウム, 2006年6月30日, 東京 (査読なし)
⑳村上健治, 岡田昌史, 岩附信行, 軌道アトラクタを用いたロボットの同調運動制御とコミュニケーションの表現, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'06, 2A1-E32, 2006 年 5 月 27 日, 東京 (査読なし)

〔産業財産権〕
○出願状況(計 1 件)
①岡田昌史, 紀 晋太郎, 零剛性から極高剛性を実現する高強度可変剛性機構, 特願 2007-040961, 2007 年 4 月 9 日, 国内

〔その他〕
①文部科学大臣表彰若手科学者賞, 岡田 昌史, 情報と機構の非線形性が現象として実在化する巧な運動の研究, 2008

6. 研究組織

(1) 研究代表者
岡田 昌史(OKADA MASAFUMI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号:60323523

(2) 研究分担者:なし
(3) 連携研究者:なし