

Arnold方程式結合系の同期を利用したロボットの行動制御

Behavior Control of Robot Using Synchronization in the Coupled Arnold Equations

関口暁宣*, 中村仁彦**

Akinori Sekiguchi*, Yoshihiko Nakamura**

*弘前大学, **東京大学

*Hirosaki University, **University of Tokyo

キーワード : ロボットの知能 (robot intelligence), 非線形力学 (nonlinear dynamics), Arnold方程式 (the Arnold equation), 同期 (synchronization)

連絡先 : 〒036-8152 弘前市文京町3 弘前大学 理工学部 知能機械システム工学科

関口暁宣, Tel.: (0172)39-3693, E-mail: sekiguch@cc.hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

近年ロボットのハードウェアは飛躍的に進歩し、HONDAのP3やASIMOに代表されるような完成度の高いヒューマノイドロボットも登場するようになった。それに伴い、機械の知能を全身で実現する技術の開発が望まれている。人間が活動する複雑な環境を認識し、状況に応じて適切な行動選択、運動の変形を行ないながら作業を行なうというようなロボットの知能を実現するためには、認知科学、神経科学、発達心理学、複雑系などさまざまな分野における学際的アプローチから得られた知見にヒントを得ながら、脳の高次機能をロボットを用いシンセティックに研究していく必要があると考えられる。

本研究では、このようなロボットの知能の問題について、力学に着目したアプローチをとる。Freemanらのウサギの匂い情報処理に関する報告¹⁾では、嗅球の集合電位が条件によって定常状態、周期状態、カオス状態になることが示されている。このような非線形力学現象は生体の脳・神経系において数多く見られ²⁾³⁾、周期軌道からカオス軌道への遷移、周期軌道への引き込みやカオス同期といった力学現象が、学習や記憶、連想、意識な

どの機能と結び付いているのではないかと考えられる。このような観点から、カオスを生じる人工ニューラルネットワーク⁴⁾⁵⁾や、それを用いた情報処理²⁾⁶⁾⁷⁾などに関して研究が行なわれている。

本研究ではそのような脳の情報処理に関する非線形力学系モデルに着目し、非線形力学系のカオスや、カオスから非カオスへの遷移、さらには周期軌道への引き込みといった非線形力学現象を用いてロボットにおける脳型情報処理を実現することを目指す。そのための基礎として、力学現象による計算・情報処理の可能性を探ることを目的とし、力学現象の結果として現れる周期軌道やカオス軌道を基にしたロボットの情報処理力学系を設計することを試みる。具体的な非線形力学系としてArnold方程式を用い、複数のArnold方程式の結合系において生じる周期軌道への引き込みや同期を利用したロボットの行動制御について考察を行なう。

2. 力学系の同期, 引き込みを用いた行動制御

2つの力学系が相互に結合された系では、2つ

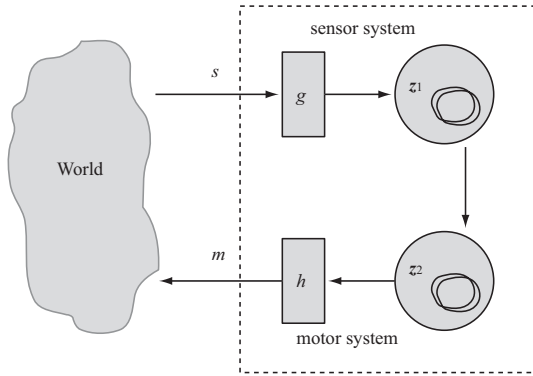


Fig. 1 Behavior control using dynamical synchronization

の力学系の運動が同期したり、運動が周期軌道に引き込まれたりするような現象が生じることがある。ここでは、そのような力学系の同期や引き込みを用いたロボットの行動生成、行動制御を試みる。2つの力学系をロボットのセンサ系、モータ系にあてはめて考えると、2つの力学系の相互結合は、センサ信号がセンサ系に入力され、情報処理が行なわれてモータ系からモータに出力され、環境との相互作用を行なうという、Fig.1のような環境をも含めた力学系の相互結合として考えることができる。このような環境を含めた全体のループの中で、センサ系やモータ系にあたる力学系が同期や引き込みを生じることによって行動制御や行動の駆動を行なうことを考える。

ここでは、具体的に用いる力学系として Arnold 方程式を採用し、上述したような情報処理、行動制御を Arnold 方程式を用いて行なうことを試みる。Arnold 方程式を用いる理由として、我々の Chaotic Mobile Robot⁹⁾の研究でこの力学系を用いたことがありその構造がある程度わかっている、また Arnold 方程式は構造の単純さと挙動の多様性をあわせ持っており、3次元の連続系の非線形力学系であり挙動の解析が容易で比較的扱いやすい一方で、パラメータの値と初期条件によって周期運動やカオス的運動のような多様な挙動を示す、等の点が挙げられる。

3. Arnold 方程式

本研究では、次式で表される Arnold 方程式に着目する。

$$\begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_3 \sin z_3 + A_2 \cos z_2 \\ A_1 \sin z_1 + A_3 \cos z_3 \\ A_2 \sin z_2 + A_1 \cos z_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

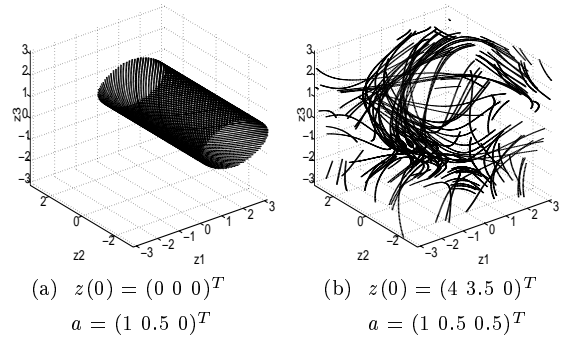


Fig. 2 Arnold flow

A_1, A_2, A_3 は定数である。Arnold 方程式とは、非圧縮性完全流体の運動を表す Euler 方程式の、3次元トーラス上の定常解であり、保存系である。ここで、3次元トーラスとは周期境界条件が満たされた空間であり、Arnold 方程式においては周期 2π のトーラス空間である。

Arnold 方程式の運動は、係数の一つ、例えば A_2 について、 $A_2 = 0, 0 < |A_2| \ll 1$ の場合は周期運動 (Fig.2(a))、 $|A_2|$ が大きい場合にはカオス的な運動 (Fig.2(b)) となり⁸⁾、パラメータ A_1, A_2, A_3 を設定することによって、周期軌道、カオス軌道、運動速度等を変化させることができる。

4. Arnold flow 相互結合系の同期を用いた行動制御

Arnold 方程式の係数を $a = (A_1 \ A_2 \ A_3)^T$ と表し、Arnold 方程式を $f(z)$ と表す。Arnold 方程式は保存系であり、 a を定数とした場合には境界条件によって挙動が全て決定されてしまい、挙動を変化させたり、引き込みを生じさせたりすることができない。そのため Arnold 方程式に入出力構造を持たせて結合系を設計し、Fig.1 のような情報処理に関して考察を行なった。まず2つの Arnold 方程式の相互結合系における軌道の同期、引き込みを考え、その相互結合系の同期、引き込みを応用したロボットの情報処理力学系の例を提案する。以下でまず Arnold flow の相互結合系の同期、引き込みの例を示す。

4.1 Arnold flow 相互結合系

2つの Arnold 方程式の相互結合系を考える。

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= f(z_1) + u(z_2) \\ \dot{z}_2 &= f(z_2) + u(z_1) \end{aligned} \quad (2)$$

z_i ($i = 1, 2$)はArnold方程式の状態変数であり $z_i = (z_{i1} z_{i2} z_{i3})$ である． $f(z_i)$ はArnold方程式を表す． z_1 から z_2 への入力 $u(z_1)$ ， z_2 から z_1 への入力 $u(z_2)$ によって相互に結合している．この系において同期が生じるような $u(z)$ を設計することを試みる．

$u(z_i)$ を次のように設計する．

$$u(z) = Kv(z) \quad (3)$$

ここで $v(z)$ は

$$v(z) = (\sin z_1 \cos z_1 \sin z_2 \cos z_2 \sin z_3 \cos z_3)^T \quad (4)$$

とし， K は 3×6 行列である．この K を次のように選ぶ．

$$K = kHE \quad (5)$$

$$E = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$H = VU^T \quad (7)$$

$$P = USV^T \quad (P \text{の特異値分解}) \quad (8)$$

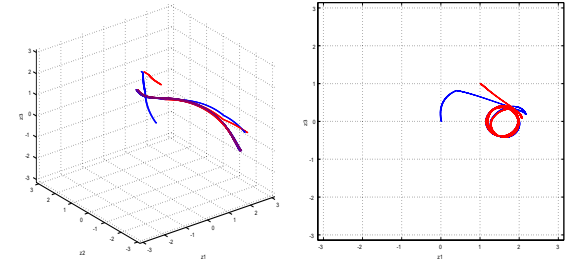
$$P = \begin{pmatrix} 0 & -\sin z_2 & \cos z_3 \\ \cos z_1 & 0 & -\sin z_3 \\ -\sin z_1 & \cos z_2 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

ここで k は正の定数である．このとき $u(z)$ は次式となる．

$$u(z) = kH(z)Ev(z) \quad (10)$$

この系の挙動の例をFig.3, 4に示す．パラメータ，初期値は図中に示した．図の(a)は z_1, z_2 の軌道であり，上段左は3次元空間の軌道，右はその z_1 - z_3 平面への射影，下段は z_1, z_2, z_3 それぞれの時系列を示す．(b)には z_1 と z_2 の差の時系列を示す．結合がない場合にはそれぞれカオス的な運動を示すのに対し，相互結合によって2つの系の運動が周期的な軌道に引き込まれ同期することがわかる．このとき同期する軌道はパラメータ等によって決まった軌道に引き込まれる．Fig.3とFig.4では k の値が異なるが， k の大きさによって引き込まれる軌道のパターンが異なっている．またあるパラメータに対して，初期値によって別の場所に引き込まれる．

この相互結合系の一方をセンサ系，もう一方をモータ系と考え，Fig.1のような環境をも含めた結合系に拡張してその同期等の現象を行動制御に利用する．

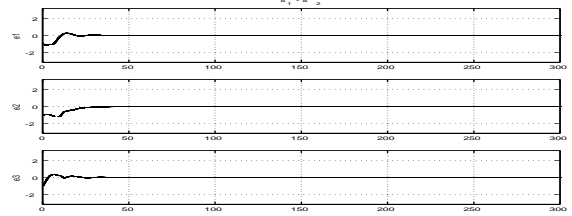


(a) Trajectories of z_1 and z_2

$$a = (0.25 \ -0.15 \ 0.25)^T$$

$$z_1(0) = (0 \ 0 \ 0)^T, z_2(0) = (1 \ 1 \ 1)^T$$

$$k = 0.06$$



(b) $z_1 - z_2$

Fig. 3 Behavior of the mutually connected Arnold flows (1)

4.2 相互結合系の同期を用いた行動制御

相互結合系の一方のArnold flowをセンサ系，もう一方をモータ系と考え，モータ系からセンサ系へと向かう結合を切断して環境へ開放しFig.1のような情報処理を行なうことを試みる．モータ系の出力は写像 h を介してロボットのモータを駆動し，実世界に作用する．一方，実世界から得られたセンサ信号は写像 g によってセンサ系のArnold flowへの入力となる．もし $g \circ (\text{World}) \circ h$ を恒等写像にすることができれば，この実世界に開放された結合系は解放前の結合系と全く同様の挙動を示すことになり，引き込みを生じるような非開放系を設計することで開放系の挙動を制御することができることになる．実際には(World)は伝達特性を持つため，合成写像 $g \circ (\text{World}) \circ h$ を完全に恒等写像とすることは実用的には容易ではなく，これが結合系の挙動を複雑にすると想像される．

具体的には，例えばロボットの周期運動パターンに対して，Arnold flowの周期パターンからロボットの運動パターンへの変換器 g とその逆変換 h をニューラルネットワーク等で獲得することによ

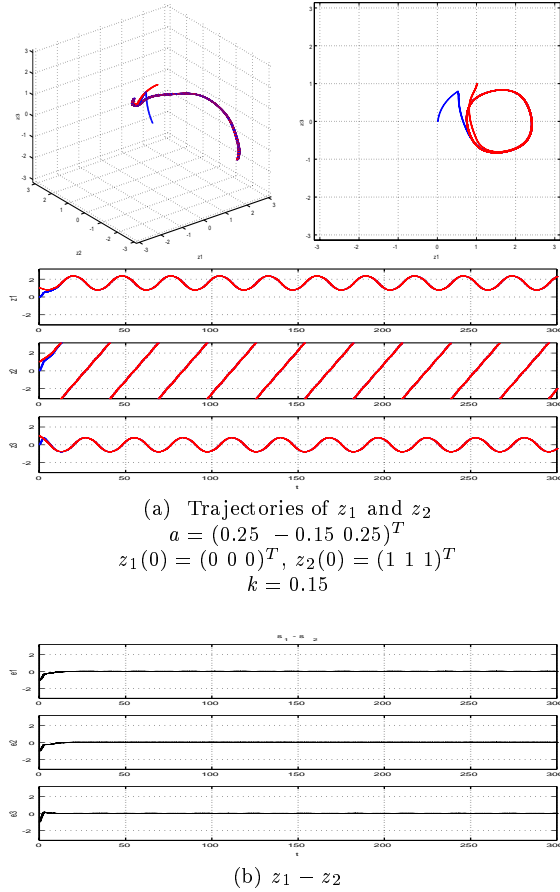


Fig. 4 Behavior of the mutually connected Arnold flows (2)

り，Arnold flow 相互結合系の引き込みを利用してロボットの周期運動が生成される．

神経振動子のモデル等を用いてその引き込み現象を歩行等に利用しようという研究が数多く行なわれているが¹¹⁾，そのような引き込みを生じる系を用いてどのようにロボットの情報処理系を構築するかという設計論がなかったように思われる．それに対し本研究で提案する手法は，そのような設計論として，力学系の同期，引き込みを用いてロボットの周期運動を制御する情報処理力学系を設計する際に，同期，引き込みを生じる力学系の引き込み軌道パターンとロボットの運動パターンを別々に与えることができるような枠組みとなっている．

4.3 複数の相互結合系間の相互作用

提案した手法を高自由度のロボットに応用するためには多数のセンサ系，モータ系の相互作用について考える必要がある．センサ信号とセンサ系を結ぶ写像，モータ系とモータを結ぶ写像の獲得は，高自由度の運動に対しては難しくなると考え

られるが，センサ系-モータ系の相互結合系が複数あり，それぞれが例えば腕や脚などの比較的小さな自由度の運動に対応しているとすると，それらを協調させることで高自由度の運動を実現できると考えられる．

ここでは前節で設計したセンサ系-モータ系の相互結合系が2組ある場合を考え，それらの相互作用により2組の力学系の運動を協調させることを試みる．センサ系1とモータ系1の相互結合系 ($s1-m1$)，センサ系2とモータ系2の相互結合系 ($s2-m2$)があるとし，センサ系，モータ系の Arnold 方程式の状態変数をそれぞれ z^{si} ， z^{mi} ($i = 1, 2$)とし Arnold 方程式を $f(z^i)$ と表す．ここではまず同じ値のパラメータの2組の相互結合系を考え，モータ系間の結合により相互作用を行なわせることを試みる．このとき系の運動を

$$\begin{aligned} \dot{z}^{si} &= f(z^{si}) + u(z^{mi}) \\ \dot{z}^{mi} &= f(z^{mi}) + u(z^{si}) + \xi^{mi} \end{aligned} \quad (11)$$

$$i = 1, 2$$

と表す． $u(z)$ は4.1節で設計したものであり，これによりセンサ系とモータ系の運動が同期し周期軌道に引き込まれて運動する． ξ^{mi} はモータ系間の結合を表す．

4.1節のセンサ系-モータ系相互結合によって同期した運動は1方向にほぼ一定速度で流れる運動となる．そこで Fig.3のように z_2 方向に流れる形で同期する系が2組あるとき，

$$\begin{aligned} \xi^{m1} &= (0 \ \varepsilon \sin((z_2^{m2} + \theta) - z_2^{m1}) \ 0)^T \\ \xi^{m2} &= (0 \ \varepsilon \sin(z_2^{m1} - (z_2^{m2} + \theta)) \ 0)^T \end{aligned} \quad (12)$$

のような $m1-m2$ 間の結合による相互作用を加える．この系の挙動の例を Fig.5に示す．パラメータの値は図中に示した．上段左の図は $s1$ と $m1$ (z^{s1}, z^{m1}) の軌道，上段右は $s2$ と $m2$ (z^{s2}, z^{m2}) の軌道であり，中段の図はその z_1-z_3 平面への射影である．下段は $m1$ と $m2$ の状態 z_1^{mi} ， z_2^{mi} ， z_3^{mi} ($i = 1, 2$) それぞれの時系列を示す．図からわかるように2組の系の運動を同期させることができる．2組の系に一定の位相差 θ を持たせることもできる．ただし Arnold flow の引き込み軌道の流れの方向にあわせて結合を決めてやる必要がある．

次に，周期が異なる相互結合系間の相互作用を考える．前述した複数の Arnold 方程式相互結合系間の同期の例では，同じパラメータで同じパターンに引き込まれる系同士では同期するが，例えば

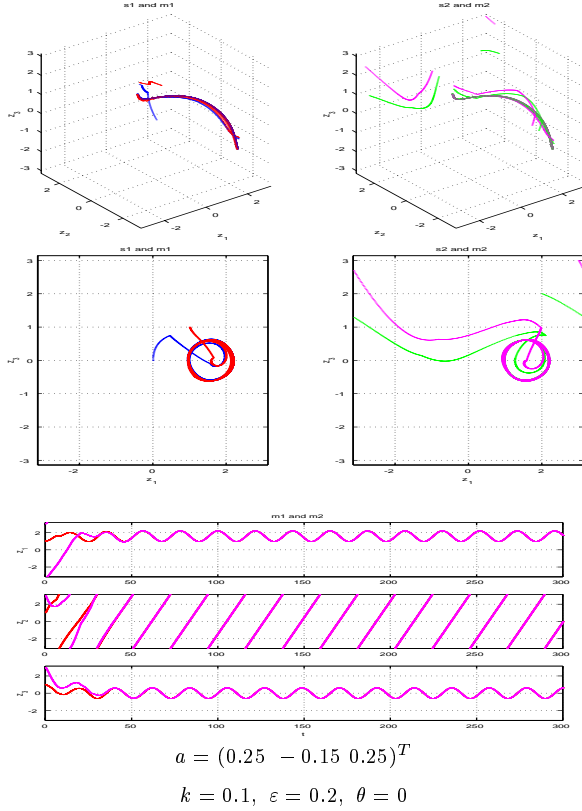


Fig. 5 Behavior of two pairs of the mutually connected Arnold flows

異なる k に対応する異なる引き込みパターンを持つ2組の系では周期が異なり、周期が近い場合には2組の運動が同期する(ただし後述のように引き込み軌道の形が変わり、位相差が生じる)が、周期が大きく異なる場合には同期することができない。複数の関節の運動にそれぞれ対応したセンサ系-モータ系結合があったとき、それぞれが周期の異なる運動として獲得されていたとすると、パラメータの変更によってそれらの運動を同期させ複数の関節の協調した運動を実現できると考えられる。

まず異なるパターン、周期を持つ2組の結合系間の、式(11)、(12)の相互作用による挙動を確認した(Fig.6)。図の(a)の上段左はs1とm1、上段右はs2とm2の軌道でありそれぞれ z_1-z_3 平面への射影である。下段はそれぞれs1とs2、m1とm2の状態の時系列を重ねて描いたものである。(b)には z^{s1} と z^{s2} の差、 z^{m1} と z^{m2} の差の時系列を示す。

この例のように2組の引き込み軌道の周期が近い場合には、引き込み軌道の形が変わり2組の系の運動の周期が等しくなり同期する。しかし(a)の下段の図や(b)からわかるように、2組の系の運動

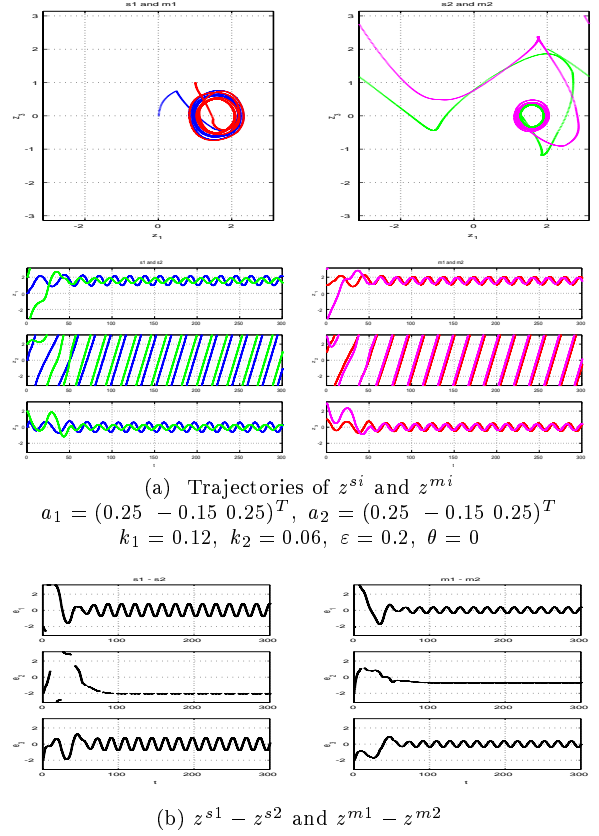


Fig. 6 Behavior of two pairs of the mutually connected Arnold flows, when the two pairs have different parameter values

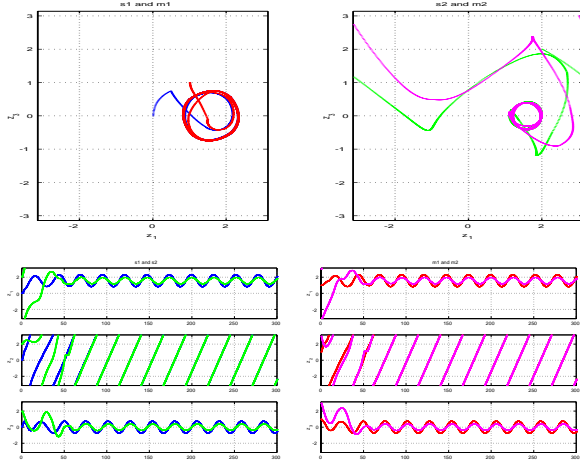
には位相差が生じる。また2組の引き込み軌道の周期が大きく異なる場合には、2組の系の運動は同期できない。

このような結果をもとに、以下のようにs2-m2系のパラメータの変更を導入することによりs2-m2系の周期をs1-m1系の周期に合わせることを試みた。s2-m2系のArnold flowのパラメータを a_2 、結合のパラメータを k_2 とし、

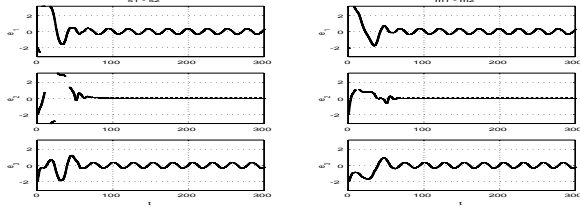
$$\dot{k}_2 = \frac{1}{\tau} \sin(z_2^{m1} - z_2^{m2}) \quad (13)$$

$$a_2 = \frac{k_2}{k_2(0)} a_2(0) \quad (14)$$

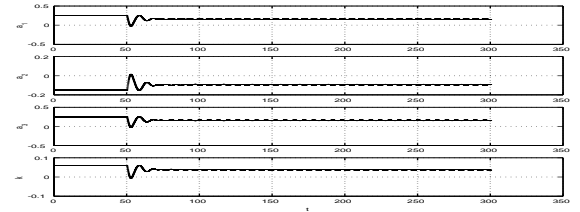
のようにm1、m2の状態を用いてパラメータを変更する。 $k_2(0)$ 、 $a_2(0)$ はそれぞれ k_2 、 a_2 の初期値であり、 τ は正の定数である。ただしどの方向の状態を用いるかは式(11)、(12)の相互作用と同様に、同期したときのArnold flowの流れの方向に合わせて決める必要がある。このパラメータの変更を導入した場合の挙動の例をFig.7に示す。この例ではs1-m1系、s2-m2系それぞれがある程度同期してからパラメータの変更を行なうとし、 $t \geq 50$ で式



(a) Trajectories of z^{s^i} and z^{m^i}
 $a_1 = (0.25 \ -0.15 \ 0.25)^T$, $a_2(0) = (0.25 \ -0.15 \ 0.25)^T$
 $k_1 = 0.12$, $k_2(0) = 0.06$, $\varepsilon = 0.2$, $\theta = 0$, $\tau = 15.0$



(b) $z^{s^1} - z^{s^2}$ and $z^{m^1} - z^{m^2}$



(c) a_2 and k_2

Fig. 7 Behavior of two pairs of the mutually connected Arnold flows, with varying parameter values

(13), (14)によるパラメータの変更を適用した. 図の(a)は z^{s^i}, z^{m^i} ($i = 1, 2$)の軌道, (b)は z^{s^1} と z^{s^2} の差と z^{m^1} と z^{m^2} の差, (c)はパラメータ k_2 と a_2 の変化である. 図からわかるようにパラメータの変化によって引き込み軌道の形は変わらずにs2-m2系の周期がs1-m1系の周期に近づき, 同期することがわかる.

このような方法を用いて, 複数のセンサ系-モータ系相互結合系間の相互作用によりロボットの複数の関節の運動を協調させるようなことができると考えられる. 次節で, 提案した手法を用いた行動生成の実験について述べる.

ここでは引き込み軌道の形が変わらないような簡単な相互作用を考えしたが, 引き込みパターン



Fig. 8 Robovie

が相互作用によって変わることをうまく利用できる可能性もあると考えられる. 複数の異なるパラメータの力学系が相互作用するような例も考え, 多数のセンサ系, モータ系間を相互作用させたネットワークでの引き込みパターンの変化を利用した行動の変化などの情報処理に関しても今後考察したい.

5. Robovieによる行動生成実験

前節で提案したArnold flow相互結合系を用いた行動生成の実験を行なう. 実験装置として, 車輪移動上半身人間型ロボットRobovie (株式会社ATR 知能映像通信研究所)¹²⁾を用いる. Robovieは人とコミュニケーションするための機能に重点を絞って開発されたロボットであり, 3自由度の首, 前方オフセット角をつけて取り付けられた各4自由度の両腕, 2輪独立駆動方式の移動機構を持つ. さらに, 両眼ステレオカメラ, 全方位視覚センサ, マイクフォン, 接触センサおよび超音波センサを搭載している. Robovieの外観をFig.8に示す.

4.1節の同期を生じるArnold flow相互結合系の一方のArnold flowをセンサ系, もう一方をモータ系と考え, モータ系からセンサ系へと向かう結合を切断して環境へ開放しFig.9のような情報処理を行なう. Arnold flowの周期パターンからロボットの軌道パターンへの変換器 g とその逆変換 h を獲得することにより, Arnold flow相互結合系の引き込みを利用してロボットの周期運動を生成する.

ここでは両腕と首の合計11自由度の運動を考え, Fig.9に示すように, モータ系のArnold flowの出力 z_2 が写像 h に入力され, h からの出力がモータへの指令値 θ_d となり, Robovieのコントローラによりモータが駆動される. Robovieの両腕と首

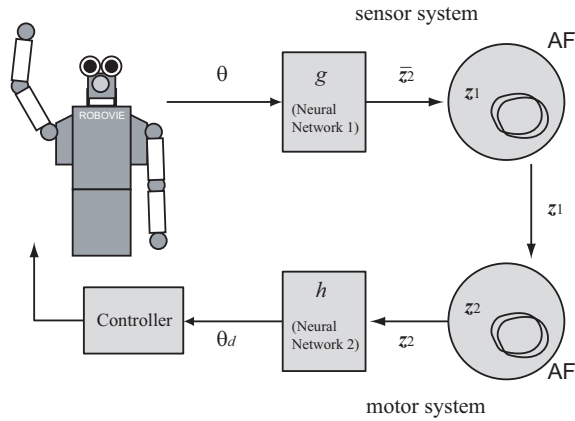


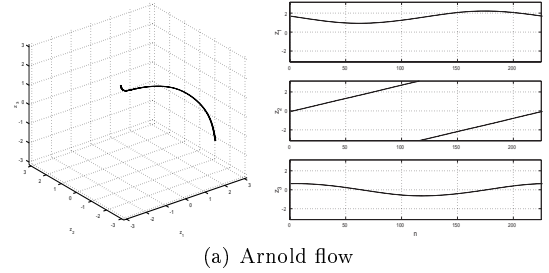
Fig. 9 Behavior control of Robovie using dynamical synchronization

の関節のコントローラは、目標位置 θ_d とその目標値に達するまでの時間 T を与えることでモータが駆動されるものとなっている。センサ入力としてモータに取り付けられたポテンシオメータから読み取られた値を用い、そのセンサ入力が写像 g を介してセンサ系 Arnold flow への入力となる。

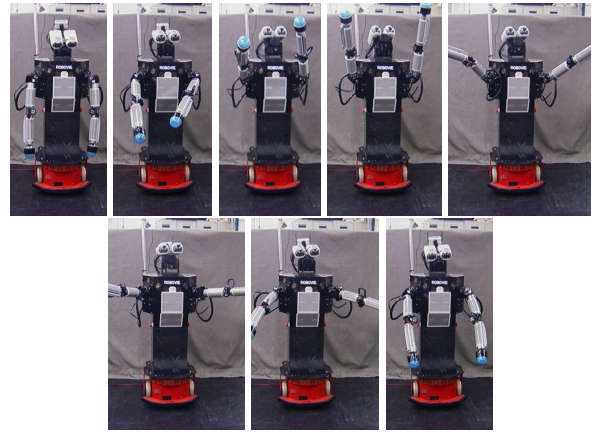
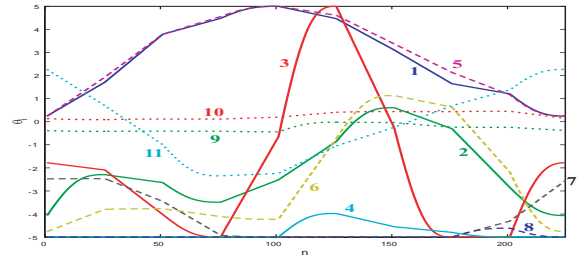
写像 g, h として、MacDorman によって提案されたパーティションネットワーク¹³⁾を用いた。これは入力空間を複数の部分空間に分割しそれぞれにニューラルネットワークを割り当てることにより、入出力の関数近似の精度と学習速度の向上を図るものである。各部分空間に割り当てられるネットワークはリカレントな結合を持たないフィードフォワードネットワークを用い、バックプロパゲーションにより学習を行なった。

Fig.10(パターン A), Fig.11(パターン B) に示す 2 組の Arnold flow の周期パターンとロボットの運動パターンを対応させる写像 g, h をパーティションネットワークを用いて設計した。図の (a) は Arnold flow のパターン、(b) のグラフはロボットの 11 個の関節の運動パターンの時系列であり、(b) の下段の図は Robovie の運動の様子を示したものである。(b) のグラフの縦軸の数値は関節のポテンシオメータから得られる値を $[-5, 5]$ の範囲にスケールしたものである。パターン A, パターン B の Arnold flow の周期パターンは、4.1 節の相互結合において Arnold flow と結合のパラメータを以下のようにした場合の引き込み軌道に対応する。

$$\begin{aligned} \text{パターン A: } & a = (0.25 \ -0.15 \ 0.25)^T, \quad k_a = 0.1038 \\ \text{パターン B: } & a = (0.25 \ -0.15 \ 0.25)^T, \quad k_b = 0.046 \end{aligned}$$



(a) Arnold flow

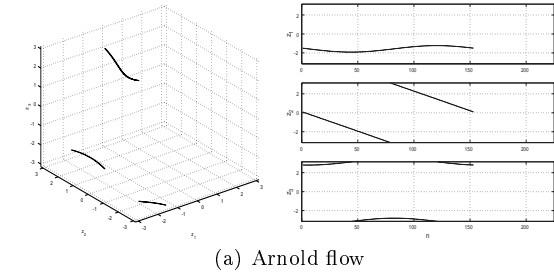


(b) Robovie

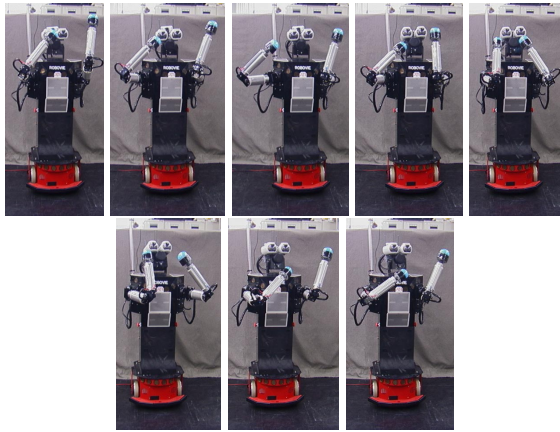
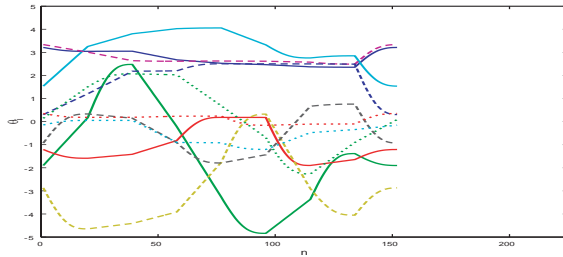
Fig. 10 Robovie: training data 1 (Pattern A)

Arnold flow のパターン A とパターン B ではパラメータ a は同じ値とし、結合のパラメータ k の異なる値 k_a, k_b に対応した引き込み軌道を用いた。ただし図からわかるように空間的に離れた 2 つの軌道を選んだ。

また、4.3 節で述べた複数の相互結合系間の相互作用を導入する。ここではセンサ系-モータ系の相互結合系が 2 組あるとし、系 1, 系 2 とする。系 1 が Robovie の右腕 4 自由度の運動、系 2 が左腕と首の 7 自由度の運動にそれぞれ対応しており、前述した方法で系 1 により Robovie の右腕の運動が、系 2 により左腕と首の運動が生成される。パターン A, パターン B の 2 組の Arnold flow の周期パターンと Robovie の運動パターンに対して、系 1 は Robovie の右腕 4 自由度のパターンと Arnold flow のパターンを対応させる写像 g_1, h_1 を、系 2 は Robovie の左



(a) Arnold flow



(b) Robovie

Fig. 11 Robovie: training data 2 (Pattern B)

腕・首の7自由度のパターンとArnold flowのパターンを対応させる写像 g_2, h_2 を、それぞれパーティションネットワークを用いて獲得した。ここで、Fig.10(b), Fig.11(b)のグラフで実線が系1の右腕の4関節、破線・点線が系2の左腕・首の7関節の運動である。

この系1と系2を用い、系1と系2の間に相互作用を適用して運動生成の実験を行なった。生成された運動の例を Fig.12, 13に示す。

この例はパラメータを $k_1 = k_b, k_2 = k_a$ とし、系1と系2の間に式(11), (12)のような相互作用を加え、さらに式(13), 式(14)のようなパラメータの動的な変更を加えた場合である。ここで相互作用は、流れの向きに合わせて式中の変数の符号を選び、パターンBとパターンAの間で位相をそろえようとするようなものとした。Fig.12(a)の上段

左は s_1 と m_1 (z^{s_1}, z^{m_1}) の軌道、上段右は s_2 と m_2 (z^{s_2}, z^{m_2}) の軌道でそれぞれ z_1-z_3 平面への射影、下段は m_1 と m_2 の状態の時系列を重ねたものであり、(b)は系2のパラメータ k_2 と a_2 の変化である。Fig.13はロボットの運動であり、グラフ中の実線は系1の右腕の4関節、破線・点線は系2の左腕・首の7関節の運動の時系列である。グラフの下段の図は時間がたって引き込まれたあとのロボットの運動の様子を示したものである。Fig.12(a)からわかるように系1の運動はパターンB、系2の運動はパターンAに近い運動に引き込まれた。式(11), (12)の相互作用に加えて $step = 260$ 付近からパラメータの動的な変更を適用することによって、Fig.12(b)のように系2のパラメータが変化することにより系2の運動速度が上がり、2つの系の運動が同期した。このように2つの系の運動の周期が異なる場合にも、2つの系間の相互作用とパラメータの動的な変更によって2つの系の運動を協調させることができた。

この実験により、同期・引き込みを生じる相互結合系を環境に開放した系を用い、力学系の同期・引き込みを利用してロボットの周期運動を制御することができ、また複数のセンサ系-モータ系相互結合系間の相互作用によりロボットの複数の関節の運動を協調させることができることが確認された。

6. おわりに

本研究では、Freemanらのウサギの嗅覚系の研究などで見られる、脳の情報処理に関する非線形力学系モデルに着目し、非線形力学系において生じるカオスや、カオスから非カオスへの遷移、さらには周期軌道への引き込みのような力学現象をロボットの情報処理のメカニズムとして利用するという問題について研究を行なった。自分自身の体や外部環境のダイナミクスと、記憶、論理、情動、意識などの情報とその処理のダイナミクスが融合して機能するシステムによって、多様に変化に適應できるロバスト性を持ちながらも、目的を持った論理的な行動が発現する構造を持っていることが、人間の知能の基礎を作っていると考えている。本研究では、このような仮説に基づいて、ロボットの知能を構成するという立場から、身体の力学系と情報処理の力学系を融合することが可能な枠組みの一つを構築した。

本研究で設計した情報処理力学系は基礎的な

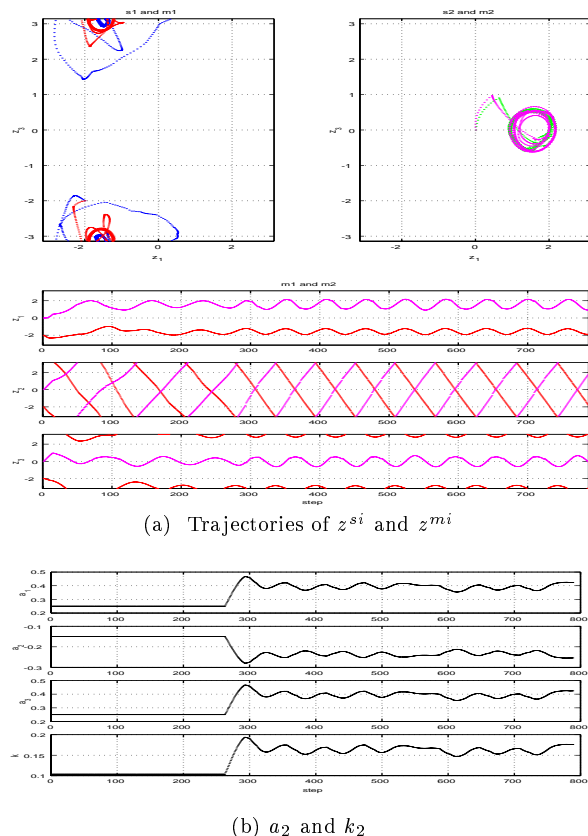


Fig. 12 Robovie: resultant trajectories (Arnold flows)

ものであり、ロボットの脳型情報処理の実現に向けては課題が多いが、複雑な環境に対する柔軟な認識や、多自由度の全身を使いこなした多様な行動生成と環境の変化に応じた柔軟な行動の変化などをロボットにおいて実現するための足がかりとなるものであると考えている。今後は、同期や引き込みを生じるような内部の力学系をロボットが環境と相互作用しながら発達、自己組織化させていく方法に関して研究を進める必要がある。

参考文献

- 1) W. J. Freeman and W. Schneider: Changes in Spatial Patterns of Rabbit Olfactory EEG with Conditioning to Odors, *Psychophysiology*, **19**, 44/56 (1982)
- 2) 合原: ニューラルシステムにおけるカオス, 東京電機大学出版局 (1993)
- 3) 津田: カオスの脳観, サイエンス社 (1990)
- 4) K. Aihara, T. Takabe and M. Toyoda: Chaotic Neural Networks, *Phys. Lett. A*, **144**-6/7, 333/340 (1990)

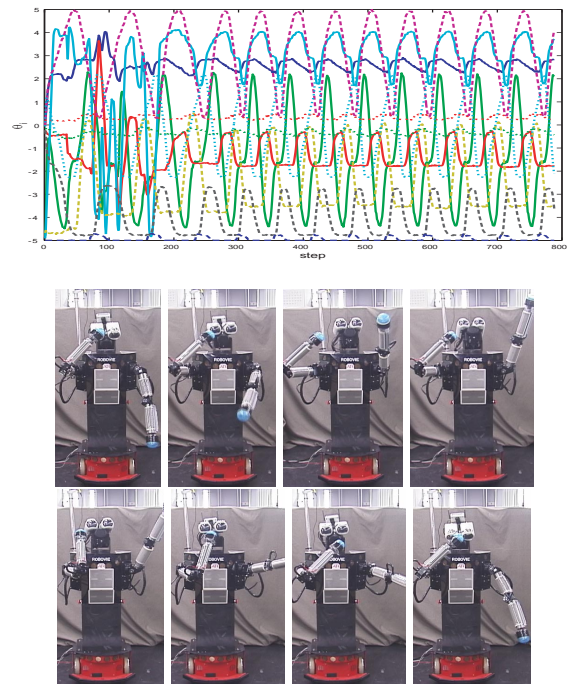


Fig. 13 Robovie: resultant trajectories (Robot)

- 5) Y. Yao and W. J. Freeman: Model of Biological Pattern Recognition with Spatially Chaotic Dynamics, *Neural Networks*, **3**, 153/170 (1990)
- 6) 小島, 伊藤: カオス力学系による自律的記憶形成, *計測自動制御学会論文集*, **35**-11, 1478/1485 (1999)
- 7) I. Tokuda, T. Nagashima, K. Aihara: Global Bifurcation Structure of Chaotic Neural Networks and its Application to Traveling Salesman Problems, *Neural Networks*, **10**-9, 1673/1690 (1997)
- 8) 岡本, 藤井: 岩波講座 応用数学 対象5 非線形力学, 岩波書店 (1995)
- 9) Y. Nakamura and A. Sekiguchi: The Chaotic Mobile Robot, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, **17**-6, 898/904 (2001)
- 10) A. Sekiguchi and Y. Nakamura: Behavior Control of Robot Using Orbits of Nonlinear Dynamics, *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1647/1652 (2001)
- 11) 宮腰, 多賀, 國吉, 長久保: 神経振動子を用いた三次元2足足踏みシミュレーション-ヒューマノイドの実世界内行動を目指して-, *日本ロボット学会誌*, **18**-1, 87/93 (2000)
- 12) 神田, 石黒, 小野, 今井, 中津: 日常活動型ロボット Robovieの開発, 第19回日本ロボット学会学術講演会, 1H24 (2001)
- 13) MacDorman, K. F.: Partition Nets: An Efficient On-line Learning Algorithm, *The Ninth International Conference on Advanced Robotics*, Tokyo (1999)