

研究内容

力学的情報処理のリアプノフ設計と運動パターン遷移制御(潮グループ)

(1) 実施の内容

ヒューマノイドロボットに多様な動作をさせるためには、プリミティブな動作の効率的な表現が重要である。基本姿勢間の遷移関係を表した図式表現としてステートネットが有名である [1]。ステートネットは様々な静止状態をセンサ空間上の点として表し、その間の遷移を有向枝として表したもので、新しい行動の追加や修正が容易である。しかしながら、歩行のような周期的な動作の表現は考慮されていない。

周期的行動はセンサ空間上の周期軌道となるので、その周期軌道の一つのノードとして表現することにより、ステートネットを周期軌道の表現にも適用できる。しかしながら、一般にセンサ空間の次元は高く、センサ空間上で周期軌道を生成するようなダイナミクスを構成するのは難しい。この問題に対して、岡田らは低次元化したデータに対してダイナミクスを構成する方法を提案した [2]。この方法では、低次元化された空間上の代表点に対してベクトル場を求める必要があり、計算量がかなり増える。一方、非線形システム理論において、所望の安定周期軌道をもつような力学系の設計方法が古くから研究されてきた。Green は、所望の周期軌道を特定する制約関数の導出方法とその制約関数からリアプノフ関数を構成することで、その周期軌道をもつ力学系の構成方法を示した [3]。

本研究では、Green の方法を応用することで、ヒューマノイドロボットの周期行動をシステムティックに力学系で表現できることを示す。特に、ハイブリッドシステムを利用することで滑らかでない行動も表現できることを明らかにする。さらに、ステートネットを拡張して、周期行動間の遷移も表現できるハイブリッドステートネットを提案する。

まず、 n 自由度のヒューマノイドロボットを考える。周期軌道は離散時間データ M によって与えられているとする。

$$M = \begin{bmatrix} \theta_1[t_1] & \theta_1[t_2] & \cdots & \theta_1[t_T] \\ \theta_2[t_1] & \theta_2[t_2] & \cdots & \theta_2[t_T] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \theta_n[t_1] & \theta_n[t_2] & \cdots & \theta_n[t_T] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

但し、 $\theta_i[t_j]$ は時刻 t_j での i 番目の関節角である。データ M は高次元なので、低次

元データに縮約する．ここでは，特異値分解を用いて低次元データを求める [2] ．

$$\begin{aligned}
 M &= USV^T, \\
 U &= \left[U_1 \mid U_2 \right], \\
 S &= \text{blockdiag}\{S_1 \ S_2\}, \\
 S_1 &= \text{diag}\{s_1 \ s_2 \ \dots \ s_m\}, \\
 S_2 &= \text{diag}\{s_{m+1} \ s_{m+2} \ \dots \ s_n\}, \\
 V &= \left[V_1 \mid V_2 \right],
 \end{aligned}$$

もし $s_m \gg s_{m+1}$ であるならば，データ M は m 次元データ V_1^T に低次元化できる．

$$M = U_1 S_1 V_1^T. \quad (2)$$

ベクトル V_1^T を低次元行動データ Y と書き， $\Psi = U_1 S_1$ を低次元データ空間から元のデータ空間への復元関数と呼ぶことにする．

以下の二つの場合を考える．

- (a) 低次元行動データ Y を滑らかな閉曲線で近似する．
- (b) 低次元行動データ Y を滑らかでない閉曲線で近似する．

(a) の場合をまず考える．ここでは，Green の方法 [3] を応用する． n 次元空間における閉曲線はフーリエ級数とチビシェフ多項式を用いて表現できる．

$$\begin{aligned}
 y(t) &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ \alpha_k \cos(k\omega t) + \beta_k \sin(k\omega t) \right\} \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ a_k T_k(\cos(\omega t)) + b_k \sin(\omega t) U_k(\cos(\omega t)) \right\} \\
 &= F_1(\cos(\omega t)) + \sin(\omega t) F_2(\cos(\omega t)),
 \end{aligned} \quad (3)$$

但し， $y(t), \alpha_k, \beta_k \in \mathbf{R}^n$ で， a_k と b_k は α_k と β_k とに依存しており， T_k と U_k は k 番目の第 1 種および第 2 種チビシェフ多項式であり， F_1 と F_2 は $[-1, 1]$ から \mathbf{R}^n への関数である．以下の微分方程式を構成する．

$$\begin{aligned}
 \dot{y} &= f(y) + g(y) \\
 &= \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ y \end{bmatrix} \\
 &\quad + \alpha \begin{bmatrix} x_1(1 - x_1^2 - x_2^2) \\ x_2(1 - x_1^2 - x_2^2) \\ F_1(x_2) + x_1 F_2(x_2) - y \end{bmatrix},
 \end{aligned} \quad (4)$$

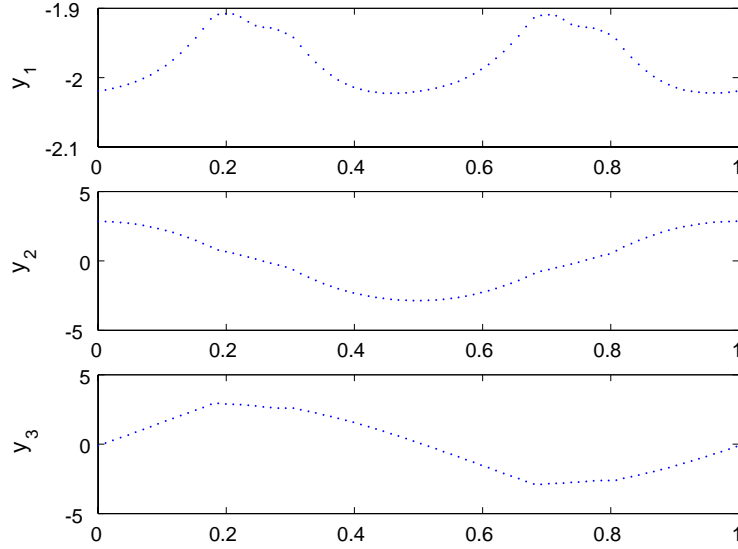


図 1: 低次元化された「歩行」行動の時系列

但し, $y = [x^T \ y^T]^T$, $x \in \mathbf{R}^2$, $y \in \mathbf{R}^n$ であり, $\alpha > 0$ は収束率を表す. このとき, 次の制約関数 $V: \mathbf{R}^{n+2} \rightarrow \mathbf{R}^{n+1}$ が存在する.

$$V(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} x_1^2 + x_2^2 - 1 \\ F_1(x_2) + x_1 F_2(x_2) - y \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式 (4) のすべての軌道は超曲面 $V(\mathbf{y}) = 0$ に収束する. すなわち, $t \rightarrow \infty$ のとき, $x_1(t) = \sin(\omega t)$, $x_2(t) = \cos(\omega t)$, $y(t) = F_1(x_2(t)) + x_1(t)F_2(x_2(t))$ に収束する.

上記の方法により, 指定された漸近安定な周期軌道に収束するような力学系を構成することができる. ここで, x は, 式 (3) で表される周期軌道に元の状態ベクトル y を収束させるために利用される拡大状態ベクトルである.

実用上, 式 (3) は次式で近似することができる.

$$y(t) = \sum_{k=0}^l \left\{ \alpha_k \cos(k\omega t) + \beta_k \sin(k\omega t) \right\}, \quad (6)$$

但し, l は, 式 (6) が Y の良い近似になるような十分に大きな整数である. 式 (6) の係数ベクトル Λ を

$$\Lambda = \left[\alpha_0 \ \alpha_1 \ \cdots \ \alpha_l \ \beta_1 \ \cdots \ \beta_l \right]^T$$

とおく. このとき, 最小二乗法を用いると,

$$\Lambda = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y^T \quad (7)$$

となる．但し，

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \cos(t_1) & \cdots & \cos(lt_1) & \sin(t_1) & \cdots & \sin(lt_1) \\ 1 & \cos(t_2) & \cdots & \cos(lt_2) & \sin(t_2) & \cdots & \sin(lt_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & \cos(t_T) & \cdots & \cos(lt_T) & \sin(t_T) & \cdots & \sin(lt_T) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

である．そして， Y の近似である関数 $y(t)$ は次のようになる．

$$y(t) = F_1(\cos(\omega t)) + \sin(\omega t)F_2(\cos(\omega t)). \quad (9)$$

関数 F_1 と F_2 を式 (4) に代入することにより，求める力学系が得られる．

図 1 は 3 次元に低次元化された「歩行」行動データ $Y_w \in \mathbb{R}^3$ の時系列を表し，図 2 は低次元化されたデータ空間上でのその閉曲線を表す．

図 3 に $l = 9$ としたときの設計された力学系の軌道を示す． l を十分大きくとれば，低次元化された行動データ Y の閉曲線に対応する漸近安定な周期軌道をもつ力学系を構成できることがわかる．

以下に滑らかな行動パターンを再現する力学系の構成方法をまとめておく．

Step1: n 次元空間において閉曲線となる周期行動のデータが与えられたとき，特異値分解によって $M = USV^T$ と変換する．

Step2: 適切に特異値 s_m を選択することにより， $M = \Psi Y$ と近似する．ここで， Y は元のデータの低次元化された行動データである．

Step3: 最小二乗法を用いて，低次元化された行動データ Y をフーリエ級数展開し， $y(t) = F_1(\cos(\omega t)) + \sin(\omega t)F_2(\cos(\omega t))$ となる関数 F_1 と F_2 を求める．

Step4: 式 (4) を用いて，周期行動パターンが漸近安定となるような力学系を構成する．

Step5: 低次元行動データ空間から元の空間への復元関数 Ψ を用いて n 次元空間でのセンサデータを再構成する．

次に，(b) の場合に対して，滑らかでない行動を生成するための方法を提案する．滑らかでないベクトル場を実現するために，切り替えシステム，すなわちハイブリッドシステム [4] を用いる．さらに，滑らかでない周期軌道の安定性を保証するために，区分的 2 次リアプノフ関数 [5] を利用する．

低次元化された行動データ Y を以下のようにいくつかの部分要素に分割する．

$$Y = \left[Y_1 \mid Y_2 \mid \cdots \mid Y_Q \right] = \begin{bmatrix} y_1[t_1] & \cdots & \cdots & \cdots & y_1[t_T] \\ y_2[t_1] & \cdots & \cdots & \cdots & y_2[t_T] \\ \vdots & & & & \vdots \\ y_m[t_1] & \cdots & \cdots & \cdots & y_m[t_T] \end{bmatrix}. \quad (10)$$

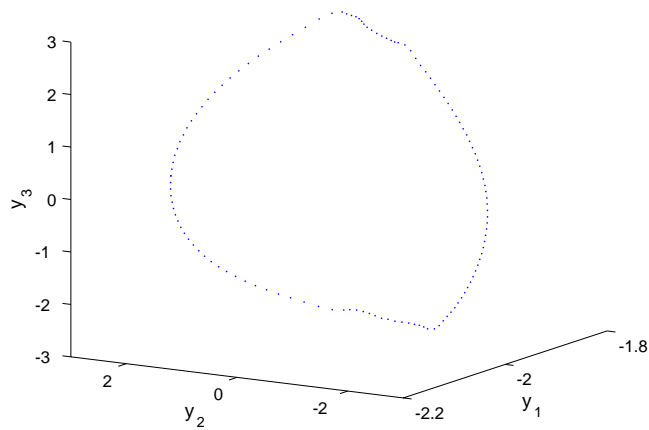


図 2: 低次元化されたデータ空間における「歩行」行動の閉曲線

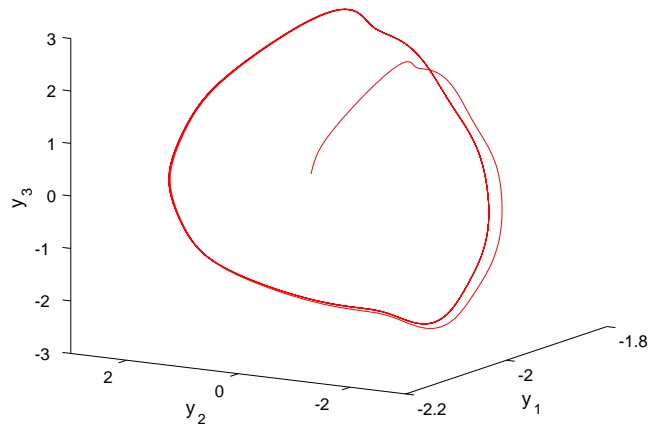


図 3: 低次元化された「歩行」行動を再現する力学系の軌道

境界が超平面で与えられるような多角形領域 $\mathcal{R}_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ に低次元化空間を分割し, 図 4 に示すように, 周期軌道を各領域 \mathcal{R}_q において楕円曲線で近似する. 各楕円曲線に対応する部分力学系を構成し, それらを切り替えることによって滑らかでない軌道を実現する. 図 5 に示すように, 各部分要素 $Y_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ は楕円柱と超平面によって近似できると仮定する.

このとき, 近似楕円曲線は $\mathcal{V}_q(y) = 0$ のように表現できる. 但し, $\mathcal{V}_q : \mathbf{R}^m \rightarrow \mathbf{R}^{m-1}$

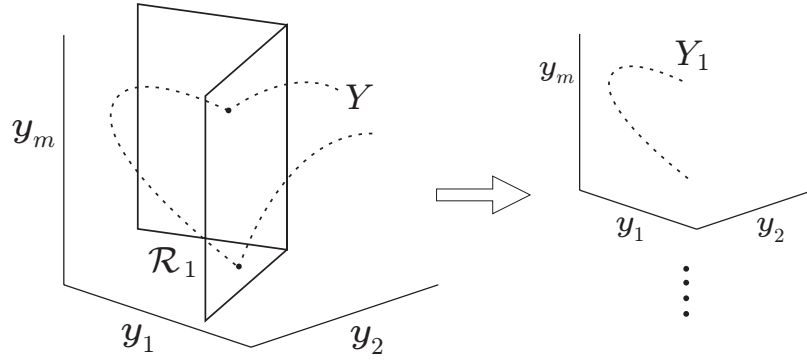


図 4: 滑らかでない閉曲線のいくつかの楕円曲線への分割

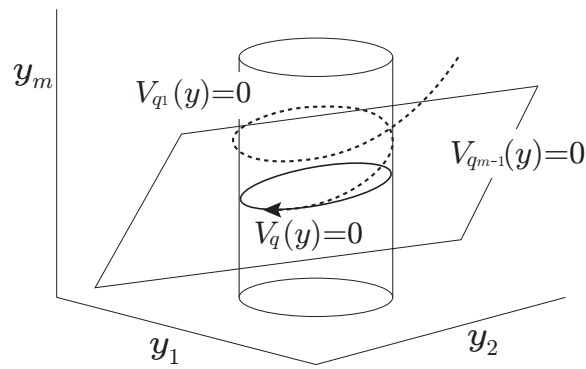


図 5: 楕円柱と超平面によって定義される楕円曲線

は次式のように書ける .

$$\mathcal{V}_q = \begin{bmatrix} \mathcal{V}_{q_1} \\ \mathcal{V}_{q_2} \\ \vdots \\ \mathcal{V}_{q_{m-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_q & p_q \\ p_q & \pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & 1 \end{bmatrix}^T \\ \zeta_{q_1} y_1 + \eta_{q_1} y_2 + \lambda_{q_1} - y_3 \\ \vdots \\ \zeta_{q_{m-2}} y_1 + \eta_{q_{m-2}} y_2 + \lambda_{q_{m-2}} - y_m \end{bmatrix}, \quad (11)$$

但し, $P_q \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は正定対称行列で, $\pi, p_q, \zeta_{q_i}, \eta_{q_i}$, 及び λ_{q_i} は実数パラメータである . ここで, このような周期軌道の安定性を保証するためには, 部分力学系を結合したときに制約関数 $\mathcal{V}_{q_1}(y)$ は, 図 6 に示すように, すべての領域の境界上で制約関数は連続になるように選択しなければならない . 領域 \mathcal{R}_q と \mathcal{R}_r との境界は

$$\tilde{c}_{q,r}^T \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = 0, \quad (12)$$

によって与えられる . 但し, $\tilde{c}_{q,r} = [c_{q,r}^T \ d_{q,r}]^T$, $c_{q,r} \in \mathbb{R}^2$, $d_{q,r} \in \mathbb{R}$ である . 制約関数 $\mathcal{V}_{q_1}(y)$ がすべての境界上で連続であるための必要十分条件は, ある $\tilde{t}_{q,r} \in \mathbb{R}^3$ に対

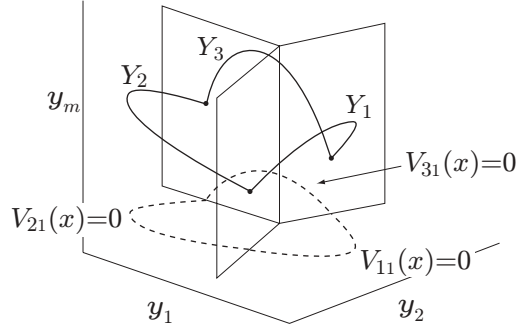


図 6: すべての領域の境界上での \mathcal{V}_{q_1} の連続性

して,

$$\tilde{P}_r = \tilde{P}_q + \tilde{t}_{q,r}^T \tilde{c}_{q,r} + \tilde{c}_{q,r}^T \tilde{t}_{q,r}, \quad (13)$$

が成り立つことである。但し, $\tilde{P}_q = \begin{bmatrix} P_q & p_q \\ p_q^T & \pi \end{bmatrix}$ である。もし領域がお互いに共通する内部を持たないような多角形であるならば各領域 \mathcal{R}_q に対して下記の行列が存在する [5] .

$$\tilde{F}_q = [F_q \ f_q],$$

但し, 任意の $y \in \mathcal{R}_q \cap \mathcal{R}_r$ ($q, r \in \{1, 2, \dots, Q\}$) に対して,

$$\tilde{F}_q \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{F}_r \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

である。この表現を使うことにより, 領域の境界上の各点で制約関数が連続である条件は以下のように書くことができる。

$$\tilde{P}_q = \tilde{F}_q^T T \tilde{F}_q, \quad (15)$$

但し, T は対称行列である。

条件 (13) または (15) のもとで近似された楕円曲線 $\mathcal{V}_q(y) = 0$ ($q = 1, 2, \dots, Q$) に対して, 滑らかでない安定な周期軌道をもつ切り替えシステムを以下のように構成することができる

$$\begin{aligned} \dot{y} &= f(y) + g(y) \\ &= \begin{bmatrix} A_q & a_q \\ \Xi_{q_1} & \xi_{q_1} \\ \vdots & \vdots \\ \Xi_{q_{m-2}} & \xi_{q_{m-2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} + \alpha_q \begin{bmatrix} \mathcal{V}_{q_1} \begin{bmatrix} B_q & b_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathcal{V}_{q_2} \\ \vdots \\ \mathcal{V}_{q_{m-1}} \end{bmatrix}, \text{ if } y \in \mathcal{R}_q, \quad (16) \end{aligned}$$

但し, $A_q, B_q \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$, $a_q, b_q \in \mathbf{R}^{2 \times 1}$, $\Xi_{q_i} \in \mathbf{R}^{1 \times 2}$, $\xi_{q_i} \in \mathbf{R}$ ($i = 1, 2, \dots, m-2$) である. また, A_q, a_q, B_q , 及び b_q は以下の条件を満たすように与えられる.

$$\begin{aligned}\tilde{A}_q \tilde{P}_q + \tilde{P}_q \tilde{A}_q &= 0, \\ \tilde{B}_q \tilde{P}_q + \tilde{P}_q \tilde{B}_q &< 0,\end{aligned}$$

但し, $\tilde{A}_q = \begin{bmatrix} A_q & a_q \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\tilde{B}_q = \begin{bmatrix} B_q & b_q \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ である. ここでは, これらの行列を以下のようにシンプルに形におく.

$$\tilde{A}_q = \tilde{G}_{A_q} \tilde{P}_q, \quad \tilde{G}_{A_q} = \begin{bmatrix} G_{A_q} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

但し, 行列 G_{A_q} は任意の歪対称行列である. 行列 \tilde{B}_q については以下のように選ぶ.

$$\tilde{B}_q = \tilde{G}_{B_q} \tilde{P}_q, \quad \tilde{G}_{B_q} = \begin{bmatrix} G_{B_q} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

但し, G_{B_q} は, $G_{B_q}^T + G_{B_q} < 0$ を満たす任意の行列である. さらに, Ξ_{q_i} と ξ_{q_i} は以下のように定める.

$$\begin{bmatrix} \Xi_{q_i} & \xi_{q_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{q_i} & \eta_{q_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_q & a_q \end{bmatrix} \quad (19)$$

図7に, 低次元化された「スクワット」のデータ $Y_s \in \mathbf{R}^3$ に対して設計された力学系の軌道を示す. 提案手法を適用する前に行動データ y をいくつかの部分要素に分割しなければならない. 図7においては「スクワット」のデータを2つ部分要素に分割した. 明らかに, 分割する部分要素の個数を増やせば, より精確な近似曲線を得ることができる. しかしながら, 制約条件(13)又は(15)を満たすようにすることが厳しくなる.

滑らかでない行動パターンを再現するための方法を以下にまとめておく.

Step1: n 次元空間において閉曲線となる周期行動のデータが与えられたとき, 特異値分解によって $M = USV^T$ と変換する.

Step2: 適切に特異値 s_m を選択することにより, $M = \Psi Y$ と近似する. ここで, Y は元のデータの低次元化された行動データである.

Step3: Y をいくつかの部分要素に分割する (このときの分解の仕方は設計者に任される.)

Step4: Y の部分要素に対応する各楕円曲線 Y_q は, 楕円柱 \mathcal{V}_{q_1} と超平面 \mathcal{V}_{q_i} ($i = 2, 3, \dots, n-1$) によって近似する. ここで, \mathcal{V}_{q_1} はすべての領域の境界で連続となるように決定する.

Step5: 式(16)を用いて, 周期行動パターンが漸近安定な周期軌道となるような力学系を求める.

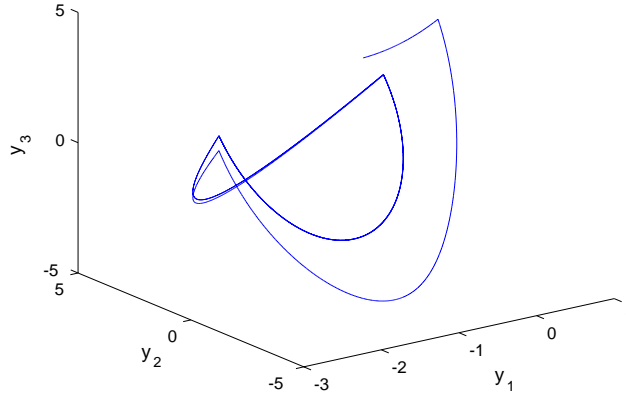


図 7: 低次元化された「スクワット」行動を再現する力学系の軌道

Step6: 低次元行動データ空間から元の空間への復元関数 Ψ を用いて n 次元空間でのセンサデータを再構成する．

最後に，ヒューマノイドロボットが周期行動を変えるときに過渡的な行動を生成するための方法について考察する．力学系 $\dot{y} = f(y) + g(y)$ において，関数 $g(x)$ を $-g(x)$ に置き換えるだけで安定な周期軌道は不安定になることが容易にわかる．換言すれば，式 (4) 又は (16) によって得られた関数対 (f, g) を用いて，以下の二つの力学系 Σ^+ と Σ^- を構成する．

$$\Sigma^+ : \dot{y} = f(y) + g(y), \quad (20)$$

$$\Sigma^- : \dot{y} = f(y) - g(y). \quad (21)$$

ここで，周期軌道は Σ^+ では安定になり Σ^- では不安定となる．式 (20) から式 (21) にダイナミクスを切替えることで安定な周期軌道を不安定化することができる．このときの遷移を構成するために様々な方法が考えられる．ここでは，「歩行」行動から「スクワット」行動への遷移を例に取り，簡単な遷移方法を例示することにする．遷移ダイナミクスを以下の式で記述する．

$$\dot{y} = w_{ws}(\tau)(f_w(y) - g_w(y)) + (1 - w_{ws}(\tau))(f_s(y) + g_s(y)), \quad (22)$$

但し，下付文字 w と s はそれぞれ「歩行」と「スクワット」に関する関数であることを意味する．遷移行動が開始したとき， τ を 0 にセットする．そして， w_{ws} は次式で記述される重み関数である．

$$w_{ws}(\tau) = \frac{1}{\exp(\varepsilon_{ws}\tau)}, \quad (23)$$

但し， ε_{ws} はベクトル場の変化率を表す．遷移が開始したとき，現在の行動から次の行動へと軌道が次第に移っていき，ある程度時間が経てば，力学系 Σ_w^- のベクトル

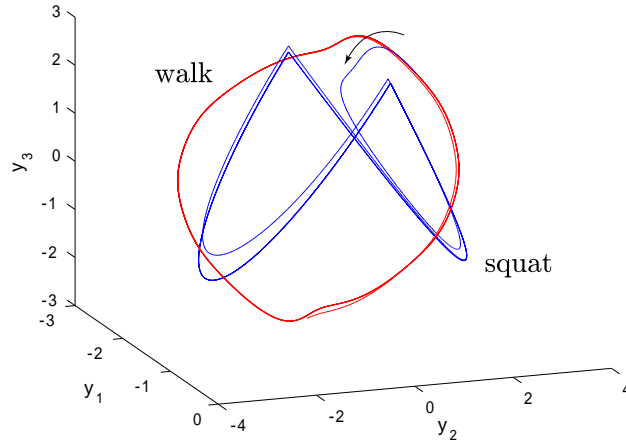


図 8: 「歩行」から「スクワット」への行動の遷移 ($\varepsilon_{ws} = 5$)

ル場は消え，力学系 Σ_s^+ のベクトル場が支配的となる．このようにベクトル場を変化させることで二つの行動間の遷移軌道を滑らかにすることが可能となる． $\varepsilon_{ws} = 5$ のときの「歩行」行動から「スクワット」行動への軌道の遷移を図 8 に示す．

ここでは，遷移ダイナミクスにおける復元関数 Ψ_{ws} は二つの復元関数 Ψ_w と Ψ_s との加法的結合で構成することにする．

$$\Psi_{ws} = w_{ws}(\tau)\Psi_w + (1 - w_{ws}(\tau))\Psi_s, \quad (24)$$

$\varepsilon_{ws} = 5$ のときの「歩行」行動から「スクワット」行動へのヒューマノイドロボット「HOAP - I」の変化の様子を図 9 に示す．

上で述べたような動作間の遷移に基づいて，いくつかの動作を連続して行わせるために，静止状態を含む様々な動作間の遷移を図式に表す方法としてハイブリッドステートネットを提案する．ハイブリッドステートネットは，静止状態間の遷移関係を示したステートネット [1] を周期行動に対しても適用できるように拡張したものである．ここでは，簡単のために，滑らかな動作間の遷移のみを扱うが，滑らかでない動作がある場合にも同様に表現できる．形式的にはハイブリッドステートネットは $(Q, X, D, R, L_i, \Phi, A, G, A_s)$ の 9 項で記述でき，その図的表現は図 10 のようになる．ハイブリッドステートネットの各項目を表 1 にまとめておく．

$Q = \{q_1, q_2, \dots\}$ は節点の集合で，各節点はヒューマノイドロボットの周期行動パターンの名称に対応している． $X = \{X_1, X_2, \dots\}$ は連続変数の集合であり， q_i の状態 $X_i = [x_i^T \ y^T]^T$ とする． $x_i = [x_{i1} \ x_{i2}]^T$ であり，節点 q_i の位相を表す変数である．また y は r 次元空間での座標を表す r 次元ベクトルであり， $y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_r]^T$ となる． D はベクトル場の組 (f_i, g_i) を要素としてもち，この組を用いてヒューマノイドロボットの軌道を生成する． $R = \{y_1^{res}, y_2^{res}, \dots\}$ は節点 q_i での r 次元ベクトル y の制約条件の集合であり，節点 q_i では $y \in y_i^{res}$ を常に満たすような行動しかとれない．ここで y_i^{res} は n 次元センサ空間の可動範囲から求めた r 次元空間上での y の存在できる領域である． $L_T = \{t_1, t_2, \dots\}$ は各節点のローカルな時間の集合であ

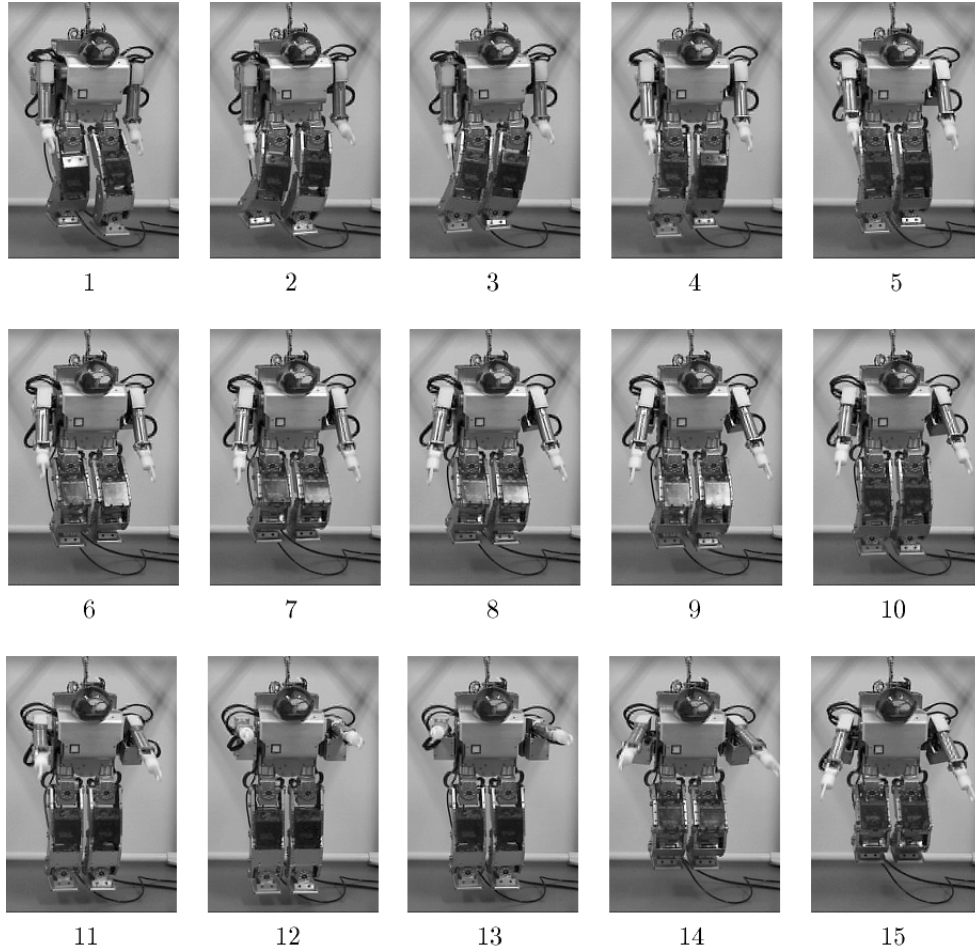


図9: 「歩行」行動から「スクワット」行動への遷移のHOAP-Iによる実験 ($\varepsilon_{ws} = 5$).

り, 節点 q_i の時間を t_i と表す. $A = \{a_{12}, a_{21}, \dots\}$ はアークを表す集合であり, 節点 q_i から q_j へのアークを a_{ij} とし, 各行動間の遷移を表す. 節点間の遷移にアーク毎に定めている遷移時間 ε_{ij} がかかる. $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{12}, \dots\}$ は r 次元ベクトル y から n 次元のセンサデータに復元する関数の集合である. ここで Φ_i は節点 q_i の復元関数, Φ_{ij} は有向枝 a_{ij} による遷移行動における復元関数である. x_{ij}^{gu} は節点 q_i から節点 q_j への遷移が可能な位相条件を表し, $x_i \in x_{ij}^{gu}$ のときは遷移命令の入力後すぐに遷移が行われるが, $x_i \notin x_{ij}^{gu}$ のときには, 遷移可能となるまで遷移を行わない. G を x_{ij}^{gu} の集合とおく. x_{ij}^{as} は節点 q_i から q_j に遷移するとき q_j の初期位相を定める関数で, x_{ij}^{as} の集合を A_s とおく.

ハイブリッド状態ネットを用いた節点 q_i から節点 q_j の遷移の手順を示す. 節点 q_i においてベクトル場の組 (f_i, g_i) を基に安定な周期軌道をもつ微分方程式 Σ^i を構成する.

$$\Sigma^i : \dot{X}_i = f_i(X_i) + g_i(X_i), \quad (25)$$

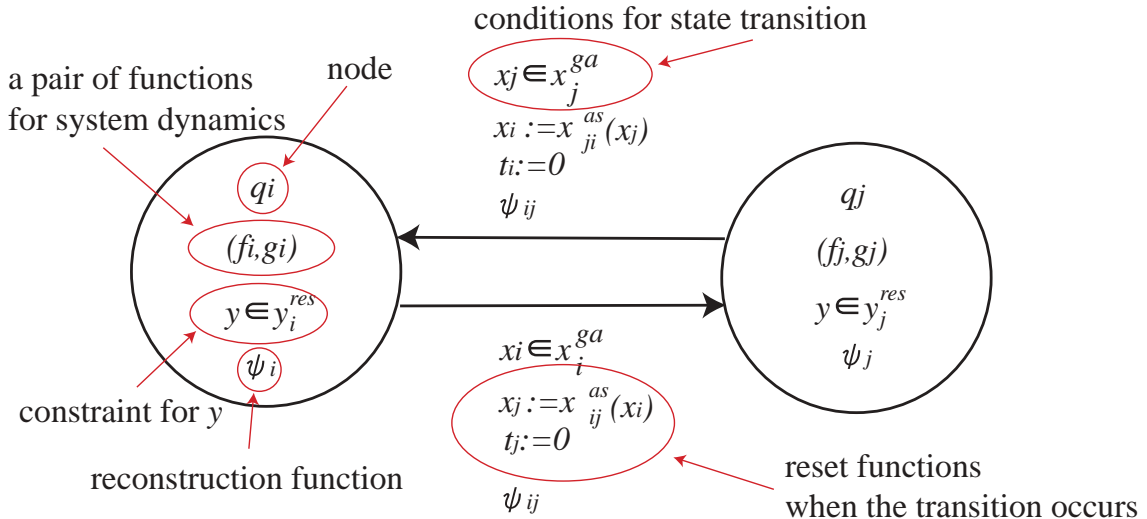


図 10: ハイブリッドステートネット

表 1: ハイブリッドステートネットの項目

Q	節点を表す集合
X	変数の集合
D	節点 q_i におけるベクトル場を構成する (f_i, g_i) の集合
R	各節点での y の制約条件の集合
L_T	各節点のローカルな時間の集合
Φ	各節点, 有向枝での復元関数の集合
A	節点間の有向枝の集合
G	各有向枝の遷移可能な位相条件の集合
A_s	遷移時に次の節点の位相を求める関数の集合

但し,

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y \end{bmatrix}. \quad (26)$$

ここで図 11 に示すように, 節点 q_i のローカルな時刻 $t_i = t_{i1}$ に遷移開始命令が与えられたとすると, 命令時の節点 q_i で $x_i(t_{i1}) \notin x_{ij}^{gu}$ であったため, $x_i(t_{i2}) \in x_{ij}^{gu}$ となる時刻 $t_i = t_{i2}$ のときに遷移が開始する. 遷移が開始すると, 新しい連続変数

$$X^i = \begin{bmatrix} x_i \\ y^i \end{bmatrix}, \quad X^j = \begin{bmatrix} x_j \\ y^j \end{bmatrix}. \quad (27)$$

を導入し, 節点 q_j のローカルな時刻を $t_j = 0$ に, $x_j(0) = x_{ij}^{as}$, $y^i(t_{i2}) = y^j(0) = y(t_{i2})$ に初期化する. また遷移中は節点 q_i のリミットサイクルから節点 q_j のリミットサイ

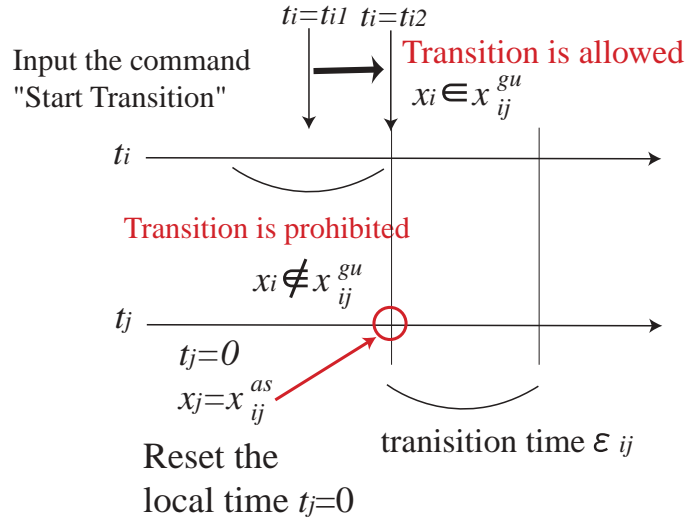


図 11: 状態遷移

クルに収束するため，次の二つの微分方程式で表される力学系を用いる．

$$\dot{\Sigma}^i : \dot{X}^i = f_i(X^i) - g_i(X^i), \quad (28)$$

$$\dot{\Sigma}^j : \dot{X}^j = f_j(X^j) + g_j(X^j), \quad (29)$$

ここで力学系 $\dot{\Sigma}^i$ は節点 q_i のリミットサイクルが不安定となる力学系であり， $\dot{\Sigma}^j$ は節点 q_j の周期軌道が安定となる力学系である．さらに重み関数 $w_{ij}(t_j)$ を用いることにより，節点 q_i から節点 q_j への遷移中の復元関数 Ψ_{ij} は，復元関数 Ψ_i, Ψ_j を組み合わせる次のように定める．

$$\Psi_{ij}(y^i(t_i), y^j(t_j)) = \omega_{ij}(t_j)\Psi_i(y^i(t_i)) + (1 - \omega_{ij}(t_j))\Psi_j(y^j(t_j)). \quad (30)$$

$t_j = \epsilon_{ij}$ になると遷移が終了し， $y(\epsilon_{ij}) = y^j(\epsilon_{ij})$ とおくことにより，節点 q_j の力学系 $\dot{\Sigma}^j$ において安定な周期軌道に対応する周期行動を行うようになる．ここで， w_{ij} は，遷移中にヒューマノイドロボットの ZMP が常に安定となるように定める．HOAP-I を用いた実験では，図 12 に示すような「静止状態」「歩行」「スクワット」「足踏み」からなるハイブリッド状態ネットを構成することができた．但し， q_o, q_w, q_s, q_l はそれぞれ「静止状態」「歩行」「スクワット」「足踏み」に対応する状態である．この図からわかるように「歩行」から「足踏み」は可能であるが「足踏み」から「歩行」には直接遷移できず，必ず「静止状態」に移ってから「歩行」に遷移することになる．ハイブリッド状態ネットを用いれば，各動作間の遷移可能性を明示することができ，また，遷移可能な遷移行動が見つければその間で新しい枝を挿入するだけでよく，行動の学習にも適している．

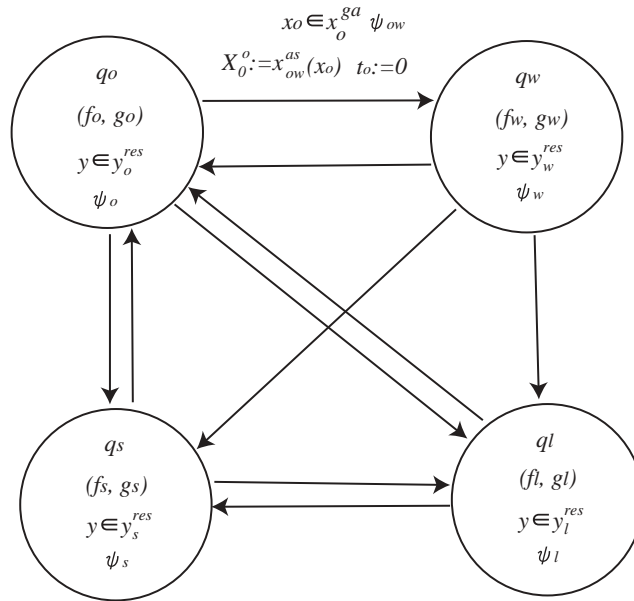


図 12: 静止状態，歩行，スクワット，足踏みからなるハイブリッド状態ネット

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本研究では，リアプノフ関数を用いて所望の周期軌道が存在する力学系を構成する方法を応用して，ヒューマノイドロボットの周期行動の力学的表現方法を提案した．試行錯誤的に得られたプリミティブな動作をセンサ空間上のデータ列とし表現し，特異値分解を利用してそのデータを低次元化した後で，力学系を構成した．実験では，いずれの周期行動も 3次元まで低次元化することができたので，本手法を効果的に利用することができた．さらに，プリミティブな行動間の遷移を表すために，状態ネットを拡張したハイブリッド状態ネットを提案した．

また，ヒューマノイドロボットのモーションプランニングのためのスーパーバイザ制御システムを提案した．図 13 に示すように，提案システムは 2つのレベルからなる階層構造をしている．下位層では，モジュラ状態ネットを用いてロボットの行動を制御しモニタリングする．モジュラ状態ネットとは，ロボットの腕，脚などといった各要素ごとの動作を表現する状態ネットであり，ロボット全身の動作は，その各パーツに対するモジュラ状態ネットの組合せによって表現される．上位層では，時間付ペトリネットを用いてユーザの要求に対する最適動作系列を生成する．全モジュラ状態を抽象モデル化した時間付きペトリネットを導入し，離散事象システム理論によって最適規範に基づくスーパーバイザ制御を行った．

さらに，強化学習を用いてスーパーバイザを構成するとき，収束を速くするための方法を提案した．

これらの研究成果を用いることで，ヒューマノイドロボットの多様な行動を容易に表現できるようになり，その結果，複雑な行動の生成が可能となった．

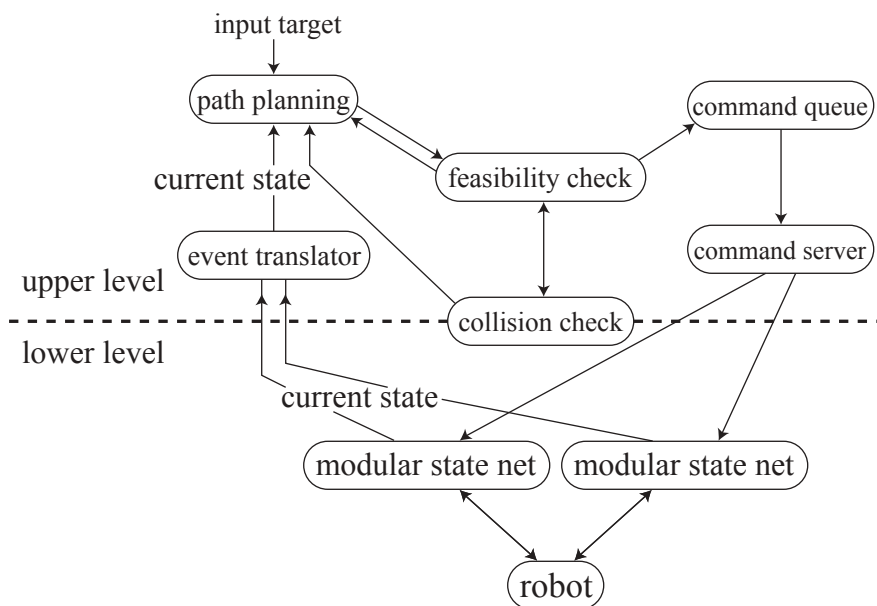


図 13: 2 階層からなる行動のプランニング機構

参考文献

- [1] F. Kanehiro, M. Inaba, H. Inoue, and S. Hirai : Developmental Realization of Whole-Body Humanoid Behaviors Based on State Net Architecture Containing Error Recovery Functions, Proc. of the First IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2000.
- [2] M. Okada, K. Tatani, and Y. Nakamura : Polynomial Design of the Nonlinear Dynamics for the Brain-Like Information Processing of Whole Body Motion, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1410–1415, 2002.
- [3] D. N. Green : Synthesis of Systems with Periodic Solutions Satisfying $V(x) = 0$, IEEE Transactions on Circuits and Systems, Vol. 31, No. 4, pp. 317–326, 1984.
- [4] R. L. Grossman, A. Nerode, A. P. Ravn, and H. Rischel (eds.) : Hybrid Systems, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 736, Springer Verlag, 1993.
- [5] M. Johansson, A. Rantzer : Computation of Piecewise Quadratic Lyapunov Functions for Hybrid Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, No. 4, pp. 555–559, 1998.