

四脚歩行の歩容遷移のための結合振動子における フィードバックシステムの設計

Design of feedback system in coupled oscillators for gait transition of quadruped walking

○安藤礼弥*, 村松鋭一*

○Hiroya Ando*, Eiichi Muramatsu*

*山形大学

*Yamagata University

キーワード： 結合振動子 (coupled oscillators), 歩容遷移 (gait transition), スチュアート・ランダウ方程式 (Stuart-Landau Equation), 1 次遅れ (time-lag of first order), センサーフィードバック (sensor feedback)

連絡先： 〒 992-8510 米沢市城南町 4-3-16 山形大学大学院理工学研究科機械システム工学専攻
村松鋭一, Tel.: (0238)26-3327, Fax.: (0238)26-3327, E-mail: muramatu@yz.yamagata-u.ac.jp

1. 研究の背景と目的

生物の歩容は結合振動子内の振動子間の同期現象によって生まれる。振動子の位相は生物の歩行脚の位置に対応し、歩行脚間の位置関係で歩容の種類が大別される。動物の歩容の生成と遷移のメカニズムは、歩行ロボットへの応用などの観点から興味深い研究対象となっており、ロボットの製作や計算機シミュレーションとともに数理的アプローチによるモデリングと制御系設計の研究が進んでいる^{1, 2, 3)}。歩行脚間の位置関係を振動子の位相に見立てて、その位相差を遷移させれば、歩容の遷移も可能である。

本稿では、Stuart-Landau 方程式をベースとした 4 脚結合振動子モデルにおける、歩容遷移をするための 2 種類の提案手法と、1 次遅れ系のフィルタのパラメータの設定について述べる。Stuart-Landau 方程式にもう 1 つ角速度の項を

追加し、この値を変化させることにより角速度が加減速し、位相差を変化させられるかを検討した。ここでの目標は、歩容の遷移に伴う位相差の変化量から、1 周期の間にどれだけのフィードバックを与えればよいか、その理想的なフィードバック量を求めることと、さらにフィードバック項に係る 1 次遅れフィルタのパラメータを如何にして設定するかということである。

2. 結合振動子

まず、一般的な Stuart-Landau 振動子は以下の通り⁸⁾。

$$\dot{z}(t) = (\mu + \omega i)z(t) - (1 + bi)|z(t)|^2 z(t) \quad (1)$$

ここで $\mu > 0$, ω , b は実数の定数, i は虚数単位である。複素平面上の任意の点を初期値 $z(0)$ としたとき、解 $z(t)$ の軌道は半径 $\sqrt{\mu}$, 角速度

$\omega - b\mu$ の円軌道にリミットサイクルとして収束する．例えば $\mu = 4$, $\omega = 2$, $b = 1$ のとき，複素平面上の速度ベクトル $z(t)$ は図 1 のようなベクトル場を形成し，図中の円がリミットサイクルとなる．

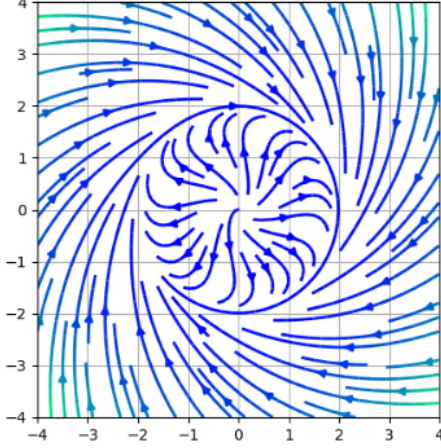


Fig. 1: 複素平面上のベクトル場とリミットサイクル

次に，上式にフィードバック項と結合項を組み合わせた結合振動子の式を以下に示す．フィードバック項として，各振動子の位相の微分方程式における固有振動数に脚の着地の影響による増分 $\omega_{Feedbacki}$ ($i = 1, \dots, 4$) を加える．また，位相の解析と制御系設計を簡潔にするため， $\mu_i = 1, b_i = 0$, ($i = 1, \dots, 4$) とする．

$$\begin{aligned} \dot{z}_1(t) = & \{1 + (\omega_1 + \omega_{Feedback1})i\}z_1(t) \\ & - |z_1(t)|^2 z_1(t) + k_{12}(z_2(t) - z_1(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_2(t) = & \{1 + (\omega_2 + \omega_{Feedback2})i\}z_2(t) \\ & - |z_2(t)|^2 z_2(t) + k_{12}(z_1(t) - z_2(t)) \\ & + k_{23}(z_3(t) - z_2(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_3(t) = & \{1 + (\omega_3 + \omega_{Feedback3})i\}z_3(t) \\ & - |z_3(t)|^2 z_3(t) + k_{23}(z_2(t) - z_3(t)) \\ & + k_{34}(z_4(t) - z_3(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_4(t) = & \{1 + (\omega_4 + \omega_{Feedback4})i\}z_4(t) \\ & - |z_4(t)|^2 z_4(t) + k_{34}(z_3(t) - z_4(t)) \end{aligned} \quad (5)$$

(2)～(5) 式における結合と 4 脚との対応は図 2 で表される．

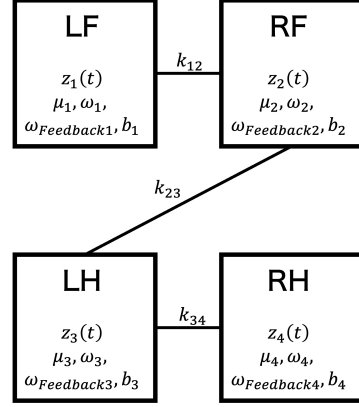


Fig. 2: 4 脚の結合

この結合振動子モデル (2) ～ (5) 式を位相縮約した式を次に示す．

$$\dot{\phi}_1(t) = \omega_1 + \omega_{Feedback1} + k_{12} \sin(\phi_2(t) - \phi_1(t)) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_2(t) = & \omega_2 + \omega_{Feedback2} + k_{12} \sin(\phi_1(t) - \phi_2(t)) \\ & + k_{23} \sin(\phi_3(t) - \phi_2(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_3(t) = & \omega_3 + \omega_{Feedback3} + k_{23} \sin(\phi_2(t) - \phi_3(t)) \\ & + k_{34} \sin(\phi_4(t) - \phi_3(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{\phi}_4(t) = \omega_4 + \omega_{Feedback4} + k_{34} \sin(\phi_3(t) - \phi_4(t)) \quad (9)$$

さらにこれらの (6) ～ (9) 式を位相差の微分方程式で表す．ここで，

$$\delta\dot{\phi}_{ij} = \dot{\phi}_i - \dot{\phi}_j \quad (10)$$

$$\delta\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j \quad (11)$$

$$\delta\omega_{ij} = \omega_i - \omega_j \quad (12)$$

と定義することにより，

$$\begin{aligned} \delta\dot{\phi}_{12}(t) = & \delta\omega_{12} + \omega_{Feedback1} - \omega_{Feedback2} \\ & - 2k_{12} \sin \delta\phi_{12}(t) + k_{23} \sin \delta\phi_{23}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta\dot{\phi}_{23}(t) = & \delta\omega_{23} + \omega_{Feedback2} - \omega_{Feedback3} \\ & - 2k_{23} \sin \delta\phi_{23}(t) + k_{12} \sin \delta\phi_{12}(t) \\ & + k_{34} \sin \delta\phi_{34}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta\dot{\phi}_{34}(t) = & \delta\omega_{34} + \omega_{Feedback3} - \omega_{Feedback4} \\ & - 2k_{34} \sin \delta\phi_{34}(t) + k_{23} \sin \delta\phi_{23}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

となる．

3. フィードバックシステム

3.1 歩容遷移の起点としてのセンサーフィードバック

歩容遷移とは，歩き方の変化であり，各脚の位相の位置関係が変化することである．本研究では，これを時間経過での各脚間の位相差の変化で表す．前章で示した結合振動子モデルはフィードバック項を持っており，これは仮想上の4脚ロボットの足の裏についたセンサーが着地時にパルス信号 $u_i(t) (i = 1, \dots, 4)$ を発して，この信号が4脚歩行動物の神経振動子に見立てた1次遅れ系のフィルタを経て，結合振動子モデルのフィードバック項 $\omega_{Feedbacki} (i = 1, \dots, 4)$ に代入されていくものとする．また，歩容の遷移は1周期の間で行うものとする．

3.2 1次遅れに対するパルス応答

1次遅れ系の伝達関数 $G_i(s)$ とパルス入力 $u_i(t)$ とフィードバック項 $\omega_{Feedbacki}$ の関係は以下の通り．

$$\mathcal{L}\{\omega_{Feedbacki}(t)\} = G_i(s)\mathcal{L}\{u_i(t)\} \quad (16)$$

1～4脚の1次遅れ系の伝達関数は

$$G_i(s) = \frac{K_i}{T_i s + 1} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (17)$$

である．次に図3に示すようなパルス入力 $u_i(t)$ を考える．

$$u_i(t) = \begin{cases} 1 & (0 \leq t < t^*) \\ 0 & (t \geq t^*) \end{cases} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (18)$$

このパルス入力は，脚が着地した瞬間に足の裏についているセンサーが反応して，パルス入力を出しているというイメージで設けており，これが1次遅れ系フィルタを通して結合振動子の位相を変化させる．

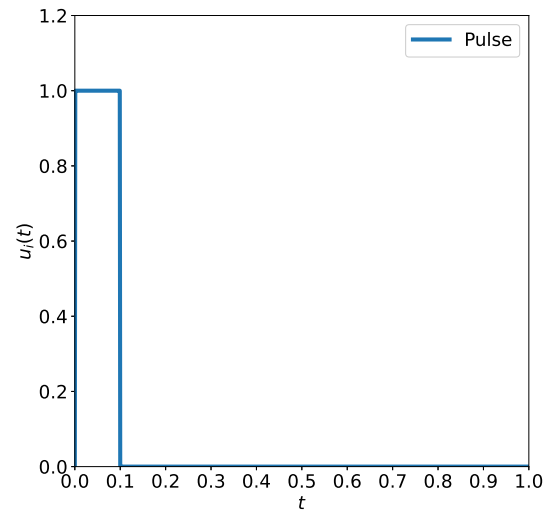


Fig. 3: パルス入力 ($t^* = 0.1$)

一次遅れ系フィルタを通ったときの応答を求めると，パルス入力のラプラス変換は

$$\mathcal{L}\{u_i(t)\} = \frac{1 - e^{-t^*s}}{s} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (19)$$

である．以上より，(16) 式の関係から

$$\mathcal{L}\{\omega_{Feedbacki}(t)\} = \frac{K_i(1 - e^{-t^*s})}{s(T_i s + 1)} \quad (20)$$

となり，これをラプラス逆変換することにより，

$$\omega_{Feedbacki}(t) = \begin{cases} K_i(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) & (0 \leq t < t^*) \\ K_i(1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) - K_i(1 - e^{-\frac{t-t^*}{T_i}}) & (t \geq t^*) \end{cases} \quad (21)$$

となる．この式のグラフは図4に示す．

ここで周期 T よりも小さく t^* よりも大きい定数 t_{fin} を定義する．これはフィードバックさせる時間の上限値である．

この t_{fin} を用いて

$$S_i := \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki}(t) dt \quad (22)$$

と定義する．これは1周期におけるフィードバック項がもたらすフィードバック量であり，後述す

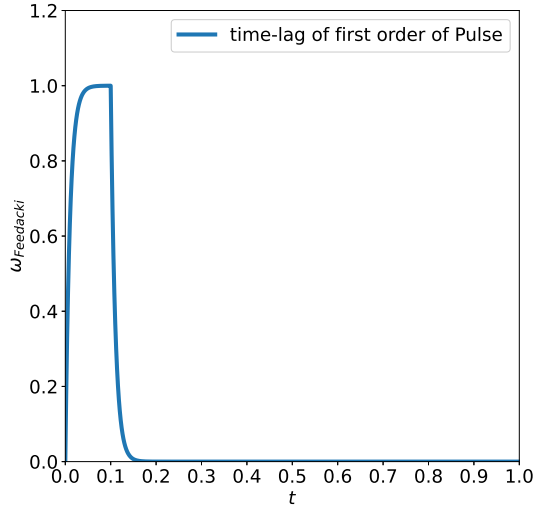


Fig. 4: パルスに対する応答
($t^* = 0.1, K_i = 1, T_i = 0.01$)

る提案手法において理想的なフィードバック量として導出する数値であり、これを元にフィードバックシステムのパラメータを決定する。また、 $t_{fin} < t < T$ のとき、

$$\omega_{Feedbacki}(t) := 0 \quad (t_{fin} < t < T) \quad (23)$$

とする。以上、本稿で述べる歩容遷移システムのブロック線図を図5に示す。

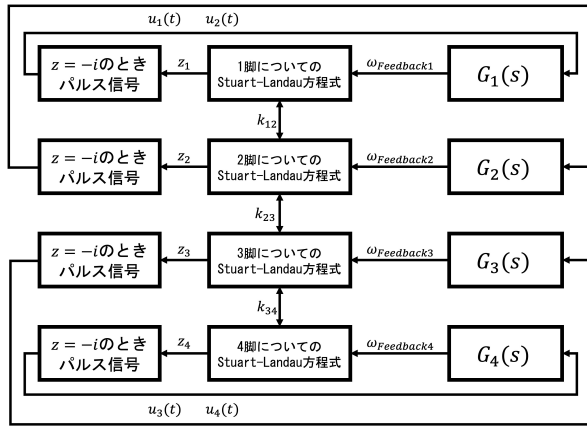


Fig. 5: ブロック線図

3.3 フィードバックシステムのパラメータ

(22) 式を解いてみると、

$$\begin{aligned} & \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki}(t) dt \\ &= \int_0^{t^*} K_i (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) dt \\ &+ \int_{t^*}^{t_{fin}} \left\{ K_i (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) - K_i (1 - e^{-\frac{t-t^*}{T_i}}) \right\} dt \\ &= K_i (t^* + T_i e^{-\frac{t_{fin}}{T_i}} - T_i e^{-\frac{t_{fin}-t^*}{T_i}}) \end{aligned} \quad (24)$$

となる。ここで、歩容生成に関わる神経振動子の電気信号に見立てて、 $t^* = 0.1, T_i = 0.01$ と定め、1次遅れのゲイン K_i については、後述する2種類の提案手法を用いて求められた S_i から決定する。以上のプロセスで1次遅れフィルタを設計する。

4. 提案手法1

4.1 フィードバック項のみで遷移するモデル

2章で示した結合振動子モデル (2) ~ (5) 式は、位相を変化させ得る要素がフィードバック項と結合項の2種類あり、まず簡略化のために結合項を除外して、フィードバック項のみで歩容の遷移が可能か検討した。これを提案手法1と呼ぶことにする。提案手法1ではまず初期値として遷移前の位相差を設定し、次に歩容遷移の目標値として遷移後の位相差を設定し、両者の差を比較して、フィードバック項が及ぼす変化量を求める。(6) ~ (9) 式から結合項を除外した式を以下に示す。

$$\dot{\phi}_i(t) = \omega_i + \omega_{Feedbacki} \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (25)$$

ここで1周期を T とすると、 $\omega_{Feedbacki}$ ($i = 1, \dots, 4$) の積分は

$$\begin{aligned} & \int_0^T \omega_{Feedbacki} dt \\ &= \text{フィードバック項が及ぼす} \end{aligned}$$

1周期における位相のずれの総量

と表せる。また、提案手法1のための理想的なフィードバック量 $S_{i(methot1)}$ を考えると、3章の(22)式より、

$$\begin{aligned} \int_0^T \omega_{Feedbacki} dt &= \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki} dt \\ &= S_{i(methot1)} \end{aligned} \quad (26)$$

と表せる。

さらに位相差の微分方程式(13)～(15)式を、提案手法1のために書き換えると、

$$\dot{\delta\phi}_{12}(t) = \delta\omega_{12} + \omega_{Feedback1} - \omega_{Feedback2} \quad (27)$$

$$\dot{\delta\phi}_{23}(t) = \delta\omega_{23} + \omega_{Feedback2} - \omega_{Feedback3} \quad (28)$$

$$\dot{\delta\phi}_{34}(t) = \delta\omega_{34} + \omega_{Feedback3} - \omega_{Feedback4} \quad (29)$$

となる。ここで再びフィードバックの項に注目する。1周期 T で積分すると、

$$\begin{aligned} &\int_0^T (\omega_{Feedbacki} - \omega_{Feedbackj}) dt \\ &= \text{フィードバックの項が及ぼす,} \end{aligned}$$

1周期における i 脚 j 脚間の位相差の変化量

となる。新たに $S_{ij} := S_i - S_j$ となる S_{ij} を考え、3章の(22)式より、脚 j 脚間の位相差の変化量は

$$\begin{aligned} &\int_0^T (\omega_{Feedbacki} - \omega_{Feedbackj}) dt \\ &= \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki} dt - \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbackj} dt \\ &= S_{i(methot1)} - S_{j(methot1)} \\ &= S_{ij(methot1)} \end{aligned} \quad (30)$$

と表せる。

4.2 遷移前後の位相差からフィードバック量 $S_{i(methot1)}$ を導出

例えば、ある歩容 A からある歩容 B に遷移するとき、歩容 A の位相差が $\delta\phi_{ijA}^*|_{i,j=1,\dots,4}$ 、歩容 B の位相差が $\delta\phi_{ijB}^*|_{i,j=1,\dots,4}$ で与えられてるとする。前節の内容より、 $S_{ij(methot1)}$ はフィードバックの項が及ぼす、1周期における i 脚 j 脚

間の位相差の変化量であるが、与えられた歩容間の位相差の変化量を $S_{ij(methot1)}$ と一致させれば、フィードバック項を用いた歩容の遷移が可能となると考えた。

遷移前後を比較してその位相差の変化は、

$$\Delta\delta\phi_{ijBA}^* = \delta\phi_{ijB}^* - \delta\phi_{ijA}^* \quad (31)$$

である。この1周期での位相差の変化をフィードバック項で補おうとすると、 i 脚と j 脚の間の位相差の変化量 $\Delta\delta\phi_{ijBA}^*$ は、

$$\begin{aligned} &\Delta\delta\phi_{ijBA}^* \\ &= S_{ij(methot1)} \\ &= S_{i(methot1)} - S_{j(methot1)} \\ &= \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki}(t) dt - \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbackj}(t) dt \end{aligned} \quad (32)$$

となる。ここで $S_{1(methot1)} \sim S_{4(methot1)}$ の中の1つを基準としてある値に定めて、 $S_{ij(methot1)}$ の定義式をもとに、他の $S_{i(methot1)}$ の値を求めることができる。この $S_{i(methot1)}$ の値は、先述の通り、フィードバック項が1周期の間に及ぼす位相のずれの総量である。この値に一致するような $\omega_{Feedback1}$ を、第2章の内容に基づいて設定することについては後の章で述べる。以上が提案手法1である。

4.3 例：提案手法1を用いた trot から gallop への遷移

ここで、具体例として提案手法1を用いた trot 歩行から gallop 歩行への遷移について考える。

まず1脚と2脚について考えると、

$$\begin{aligned} &\int_0^T (\omega_{Feedbacki} - \omega_{Feedbackj}) dt \\ &= \text{フィードバックの項が及ぼす,} \end{aligned}$$

1周期における1脚2脚間の位相差の変化量

= trot の位相差と gallop の位相差の差分

というフィードバック量になれば, trot から gallop への歩容の遷移, すなわち位相差を変化させることができる.

例えば, trot における $\delta\phi_{23}^* = \frac{\pi}{4}$ に対して, gallop においては $\delta\phi_{23}^* = \frac{3\pi}{4}$ である場合,

$$S_{23}(\text{methot1}) = \delta\phi_{23\text{gallop}}^* - \delta\phi_{23\text{trot}}^* = \frac{3\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2} \quad (33)$$

となる. これと同様に $\delta\phi_{12\text{trot}}^* = \pi, \delta\phi_{34\text{trot}}^* = \pi, \delta\phi_{12\text{gallop}}^* = 0, \delta\phi_{34\text{gallop}}^* = 0$, と与えられたとき, $S_{12} = -\pi, S_{34} = -\pi$ も求められたとする.

$$S_{12}(\text{methot1}) = S_{1(\text{methot1})} - S_{2(\text{methot1})} \quad (34)$$

$$S_{23}(\text{methot1}) = S_{2(\text{methot1})} - S_{3(\text{methot1})} \quad (35)$$

$$S_{34}(\text{methot1}) = S_{3(\text{methot1})} - S_{4(\text{methot1})} \quad (36)$$

となるような $S_{i(\text{methot1})}$ ($i = 1, \dots, 4$) を求める必要がある. ここで $S_{1(\text{methot1})}$ を基準となる値を設定することにより, $S_{2(\text{methot1})}, S_{3(\text{methot1})}, S_{4(\text{methot1})}$ が順に求められる. 例えば $S_{1(\text{methot1})} = \pi$ とすると

$$\begin{aligned} S_{2(\text{methot1})} &= S_{1(\text{methot1})} - S_{12(\text{methot1})} \\ &= \pi - (-\pi) = 2\pi \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} S_{3(\text{methot1})} &= S_{2(\text{methot1})} - S_{23(\text{methot1})} \\ &= 2\pi - \frac{\pi}{2} = \frac{3}{2}\pi \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} S_{4(\text{methot1})} &= S_{3(\text{methot1})} - S_{34(\text{methot1})} \\ &= \frac{3}{2}\pi - (-\pi) = \frac{5}{2}\pi \end{aligned} \quad (39)$$

が得られる.

5. 提案手法 2

5.1 結合項とフィードバック項を用いた歩容遷移

提案手法 1 では, 結合項を省略してフィードバック項のみで歩容遷移させたが, 提案手法 2 では結合項とフィードバック項の両方を用いた歩容遷移の提案手法を検討する. まず, 提案手法 1 と同様にある歩容 A からある歩容 B への遷

移を考える. 歩容 A の位相差が $\delta\phi_{ijA}^*|_{i,j=1,\dots,4}$, 歩容 B の位相差が $\delta\phi_{ijB}^*|_{i,j=1,\dots,4}$ で与えられてるとする. ここで, 位相差の微分方程式である (13)~(15) 式を考える. 歩容 B に遷移し十分に時間が経ったとき, 遷移は終わっているので $\omega_{Feedbacki} = 0 (i = 1, \dots, 4)$ であり, また位相差は変化しないので, $\dot{\delta\phi}_{ijB}^* = 0 (i, j = 1, \dots, 4)$ であり, (13)~(15) 式は,

$$\begin{aligned} 0 &= \delta\omega_{12B} - 2k_{12} \sin \delta\phi_{12B}^* \\ &\quad + k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^* \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \delta\omega_{23B} - 2k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^* + k_{12} \sin \delta\phi_{12B}^* \\ &\quad + k_{34} \sin \delta\phi_{34B}^* \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} 0 &= \delta\omega_{34B} - 2k_{34} \sin \delta\phi_{34B}^* \\ &\quad + k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^* \end{aligned} \quad (42)$$

となる. このとき, 結合係数 k_{ijB} は, 文献⁸⁾に基づき

$$k_{12B} \cos \delta\phi_{12B}^* > 0 \quad (43)$$

$$k_{23B} \cos \delta\phi_{23B}^* > 0 \quad (44)$$

$$k_{34B} \cos \delta\phi_{34B}^* > 0 \quad (45)$$

を満たすものとして定める. これを $\delta\omega_{ijB}$ について解くと,

$$\delta\omega_{12B} = 2k_{12} \sin \delta\phi_{12B}^*(t) - k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^*(t) \quad (46)$$

$$\begin{aligned} \delta\omega_{23B} &= 2k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^*(t) - k_{12} \sin \delta\phi_{12B}^*(t) \\ &\quad - k_{34} \sin \delta\phi_{34B}^*(t) \end{aligned} \quad (47)$$

$$\delta\omega_{34B} = 2k_{34} \sin \delta\phi_{34B}^*(t) - k_{23} \sin \delta\phi_{23B}^*(t) \quad (48)$$

となり, $\delta\omega_{ijB}$ が求まる.

ここで $\omega_{1B} \sim \omega_{4B}$ のうちどれか 1 つを基準としてある値に定めて, (12) 式を用いて, 他の ω_{iB} も求めておく. また歩容 A についても同様に ω_{iA} を求めておく.

5.2 求めた ω からフィードバック量 $S_{i(\text{method2})}$ を導出

前節で、 $\omega_{i_A}|_{i,j=1,\dots,4}, \omega_{i_B}|_{i,j=1,\dots,4}$ が求められた。遷移前後の ω の差から、理想的なフィードバック量 $S_{i(\text{method2})}$ を求める。しかし、 $S_{i(\text{method2})}$ は位相の変化量であり、 ω の差は角速度の変化量であるので、次元を揃えるために遷移に要する時間である t_{fin} との積を用いる。

$$\begin{aligned} (\omega_{i_B} - \omega_{i_A})t_{fin} &= \int_0^{t_{fin}} \omega_{Feedbacki}(t) dt \\ &= S_{i(\text{method2})} \end{aligned} \quad (49)$$

5.3 結合係数の遷移について

結合係数 k_{ij} について、歩容遷移の前後については(43)～(45)式に基づいて符号を決めることができるが、歩容の遷移段階ではどのように定めるか検討中であるため、現状では結合係数 k_{ij} の符号が変わらない範囲で、歩容の位相差の条件を与えることとする。結合係数の遷移については稿を改めて報告する。これで提案手法2は以上である。

5.4 例：提案手法2を用いたboundからgallopへの遷移

ここで、具体例として提案手法2を用いたbound歩行からgallop歩行への遷移について考える。

例えば、boundにおける $\delta\phi_{23}^* = \pi$ に対して、gallopにおいては $\delta\phi_{23}^* = \frac{3\pi}{4}$ である場合、

$$S_{23(\text{method2})} = \delta\phi_{23\text{gallop}}^* - \delta\phi_{23\text{bound}}^* = \frac{3\pi}{4} - \pi = -\frac{\pi}{4} \quad (50)$$

となる。これと同様に $\delta\phi_{12\text{bound}}^* = 0, \delta\phi_{34\text{bound}}^* = 0, \delta\phi_{12\text{gallop}}^* = 0, \delta\phi_{34\text{gallop}}^* = 0$ 、と与えられたとき、 $S_{12} = 0, S_{34} = 0$ も求められたとする。

$$S_{12(\text{method2})} = S_{1(\text{method2})} - S_{2(\text{method2})} \quad (51)$$

$$S_{23(\text{method2})} = S_{2(\text{method2})} - S_{3(\text{method2})} \quad (52)$$

$$S_{34(\text{method2})} = S_{3(\text{method2})} - S_{4(\text{method2})} \quad (53)$$

となるような $S_{i(\text{method2})}$ ($i = 1, \dots, 4$)を求める必要がある。ここで $S_{1(\text{method2})}$ を基準となる値を設定することにより、 $S_{2(\text{method2})}, S_{3(\text{method2})}, S_{4(\text{method2})}$ が順に求められる。例えば $S_{1(\text{method2})} = \pi$ とすると

$$\begin{aligned} S_{2(\text{method2})} &= S_{1(\text{method2})} - S_{12(\text{method2})} \\ &= \pi - 0 = \pi \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} S_{3(\text{method2})} &= S_{2(\text{method2})} - S_{23(\text{method2})} \\ &= \pi - \left(-\frac{\pi}{4}\right) = \frac{5\pi}{4} \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} S_{4(\text{method2})} &= S_{3(\text{method2})} - S_{34(\text{method2})} \\ &= \frac{5\pi}{4} - 0 = \frac{5\pi}{4} \end{aligned} \quad (56)$$

6. まとめ

スチュアート・ランダウ方程式に基づく結合振動子の位相を、センサーフィードバックシステムのパラメータを適切に設定することにより、遷移させる手法を2つ提案した。遷移前の位相差と遷移後の位相差を元に、遷移に必要なフィードバックの量 S を導出し、センサーフィードバックに係る一次遅れフィルタのパラメータを設定した。提案手法1では結合係数 k_{ij} を除去してフィードバック項 $\omega_{Feedbacki}$ のみで位相差を遷移させる手法であり、提案手法2は結合係数 k_{ij} と固有角振動数 ω_i を導出することにより、フィードバック項と結合項の両方で位相差を遷移させる手法である。

前章で述べた結合係数 k_{ij} の遷移手法については、稿を改めて報告する予定である。

参考文献

- 1) 木村浩：ロコモーション・パターン創発研究の現状と今後の展望；日本ロボット学会誌, vol.41, No.3, pp.217-222 (2023)
- 2) 大脇, 石黒：ミニマルなCPGモデルから探る四脚動物の脚間協調メカニズム；計測と制御, vol.54, No.4, pp.272-277 (2015)
- 3) 大脇大：動物の歩容遷移を再現する4脚ロボット；日本ロボット学会誌, vol.37, no.2, pp.126-131 (2019)

- 4) 大槻, 陳, 大友: 方向量子化探索手法 (VQSM) を用いた 4 足ロボットの歩行パターン自己形成; システム制御情報学会論文誌, vol.15, no.8, pp.396-403 (2002)
- 5) 伊藤 (聡), 湯浅, 伊藤 (宏): エネルギー消費量による四足歩行パターン遷移の発振器—力学モデル; 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.11, pp.1535-1543 (1996)
- 6) 湯浅, 伊藤: 自律分散システムとその歩行パターン発生器への応用; 計測自動制御学会論文集, vol.25, no.2, pp.180-187 (1989)
- 7) 木村, 下山, 三浦: 四足動歩行ロボットの力学的解析; 日本ロボット学会誌, vol.6, No.5, pp.367-379 (1988)
- 8) 奥平, 村松: スチュアート・ランダウ方程式を用いた結合振動子による歩容生成; 第 68 回システム制御情報学会 研究発表講演会講演論文集, pp.536-543(2024) システム制御情報学会論文誌掲載予定 (2025)