サブグループに基づく評価を用いたGAによる つり輪ロボットの演技スキルの獲得

学生員 山 田 隆 明 (佐賀大学)

非会員 渡 辺 桂 吾 (佐賀大学)

非会員 木 口 量 夫 (佐賀大学)

非会員 泉 清 高 (佐賀大学)

Performance Skill Acquisition of a Rings Gymnastic Robot by GA Using Subgroup-Based Evaluation

Takaaki Yamada, Student Member, Keigo Watanabe, Non-member, Kazuo Kiguchi, Non-member,
Kiyotaka Izumi, Non-member (Saga University)

We have already proposed the “rings gymnastic robot” that has free-floating characteristics of gripping point. The purpose of this paper is to acquire performance skill represented by fuzzy rules to realize one of the compulsory requirements, i.e., a backward giant circle from handstand to handstand, in the rings event through the robot. In controlling the performance, it is divided into three basic exercises and one of fuzzy controllers for the basic exercises is selected according to the situation. In order to acquire parameters of the controllers, an evaluation method based on five subgroups is applied to genetic algorithm. A subgroup has independent evaluation and priority exists among the subgroups. Simulation results show the effectiveness of the performance skill obtained and the evaluation method proposed.

キーワード：つり輪ロボット、演技スキル、ファジィ制御、遺伝的アルゴリズム、サブグループ、コーチング

Keywords: rings gymnastic robot, performance skill, fuzzy control, genetic algorithm, subgroup, coaching

1. はじめに

男子器械体操の1種目であるつり輪には、器械（輪）と演技者の接点が前後左右の多方向に自由に動く特徴（握り点の浮動性）がある⁽¹⁾。このため、他の器械種目とは全く異なった運動特性を有する（図1を参照）。つり輪に関してはバイオメカニクスの分野を中心に研究が進められているが、体操選手による実際の演技の運動計測を行い、その結果に対する議論を行う形式のものが主であった。これに対して、我々はロボットを通してつり輪を理解し、それをコーチングに応用することを目指した「つり輪ロボット」を提案している⁽²⁾。

ロボティクスの分野では、人間や動物の巧みな動作においてどのような制御が行なわれているのかを明らかにし、それらをロボットによって実現することを目的とした鉄棒ロボット⁽³⁾⁽⁴⁾、トランポリンロボット⁽⁵⁾、エアリアルスキーロボット⁽⁶⁾やブラキエーションロボット⁽⁷⁾等が研究されている。一方、コーチングに関する研究としては、複数のダイナミックモデルに基づいて鉄棒の蹴上がり動作の改善

の試みが報告されている⁽⁸⁾。しかしながら、どれもロープという不定形な物体をシステムの一部として含むつり輪とは運動特性が異なり、これらの制御法を元にコーチングシステムを構築するのは容易ではない。

つり輪に限らず、体操選手の動作の改善は、通常目で見えた熟練者の演技を真似ることから始める。しかしながら、視覚により得られる情報は位置と速度であり、人間が動作を

図1 つり輪

Fig. 1. Rings event

行う際に必要となる加速度の情報は得られず、力の出し方を外部から直感的に推定するのは難しい。このように目で見えた位置と速度、そして力の差がコーチングでは最も難しい点となっている⁽⁹⁾。したがって、演技における力の出し方、つまり関節トルクがわかればコーチングに役立つ。さらに、関節トルクの制御法を“IF~THEN”のルールで表すことができれば、人間が関節トルクの時系列データを見てその技の実現方法を理解するのに比べ、演技を実現するための知識をより獲得し易くなると考えられる。そこで、我々はコーチングへの応用を目指したつり輪ロボットの制御法としてファジィ制御を採用する。

我々はこれまでにつり輪ロボットに関する研究の第一歩として、つり輪において必須の演技である後方車輪からの倒立という一連の演技を実現するためのファジィルールを獲得した⁽²⁾。その際、一連の演技を2つの基本演技（後方車輪と倒立）に分けて考え、それぞれに対するファジィ制御器を設計したが、後方車輪に対するファジィルールは体操選手の演技の映像や経験者のアドバイスを参考に設計者が試行錯誤で決定したものであり、実際に演技スキルを表すファジィルールのパラメータを獲得できたのは倒立の部分だけであった。このため、少しでも条件が変わった場合には、設計者が試行錯誤を繰り返す必要があった。そこで本稿では、倒立へ移行可能な条件を示し、それに基づいて後方車輪に対するルールのパラメータを獲得する。

また、これまで我々は後方車輪からの倒立しか行なっていなかったが、本研究では実際の演技により近づけるために、倒立したのち後方車輪を行ない、再び倒立する演技を対象とする。さらに、1回目と2回目の倒立には同じ制御器を用いることで、より多くの状態に対応できる倒立のルールを獲得する。このような場合、通常の遺伝的アルゴリズム（GA）では、ある1つの評価の最適化を行うことから、他の基本演技を挟んで2度使われる倒立の制御器のルールパラメータを獲得することはできない。したがって、本研究ではそれぞれ独立した評価を有するサブグループに基づく評価法をGAに導入することにより、この問題を解決する。その上、この評価法を導入すれば、一連の演技で必要とされる3つの基本演技に対するファジィ制御器のルールパラメータを1度に獲得できることを示す。最後に、提案するGAの評価法と獲得されたファジィ制御器の有効性をシミュレーションにより検証する。

2. つり輪ロボットのモデル

つり輪運動は本来3次元空間での運動となるが、本稿では特徴を捉え易くするために、最も単純なモデルとして2次元平面内で運動する2リンクのつり輪ロボットを用いる。この場合のロボットは新しいノンホロノミックシステム⁽¹⁰⁾の1つとみなすこともできる。なお、次節以降に示す倒立の実現条件などの概念はロボットの質量中心を基準として考えており、本稿における解析は基本的に3以上のリンクや3次元モデルの解析の場合にも応用可能である。

モデル化に際して、腕と胴体を1つのリンクとみなし、脚も同様に1つのリンクとみなせば、腰関節のみが駆動可能な2リンクロボットとなる。さらに、つり輪を握っている手先部で自由に回転できるとすると、図2のような2重物理振子をロープでつるしたO-XZ平面内でのモデルを想定することができる。一般座標を $q = [x_1 \ z_1 \ \theta_1 \ \theta_2]^T$ として、ラグランジュ法により導出した運動方程式は

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) = Q \dots\dots\dots (1)$$

となる⁽²⁾。ここで、 (x_1, z_1) はリンク1の質量中心位置座標、 θ_1 はZ軸とリンク1のなす角、 θ_2 はリンク1とリンク2のなす角であり、4×4行列 $M(q)$ は対称な慣性行列、4次元ベクトル $h(q, \dot{q})$ は遠心力とコリオリ力を表す項、4次元ベクトル $g(q)$ は重力を表す項、4次元ベクトル Q は一般力を表す項である。この場合、第1関節は非駆動であり、第2関節が腰関節となる。以下に $M(q)$, $h(q, \dot{q})$, $g(q)$, Q に含まれるパラメータの定義を示す。

- m_i : リンク i の質量
- l_i : リンク i の長さ
- l_{gi} : 第 i 関節からリンク i の質量中心までの長さ
- g : 重力加速度
- ϕ : Z軸とロープのなす角
- τ_2 : 第2関節への駆動入力トルク
- l_r : ロープの自然長
- k_r : ロープのばね定数
- b_r : ロープの粘性減衰係数

ただし、 $i = 1, 2$ である。

3. ファジィ制御

倒立から後方車輪をし、再び倒立に戻る演技を基本演技である倒立と後方車輪および倒立から後方車輪への移行動作の3つに分けて考える。本節では、各基本演技に対する

図2 つり輪ロボットの2リンクモデル
Fig. 2. Two-link model of rings gymnastic robot

ファジィ制御器を示す。これらを状況に応じて選択することにより、つり輪ロボットに演技を行わせる。図3に制御系のブロック線図を示す。なお、各ファジィ制御器のルールパラメータはGAにより獲得する。

〈3・1〉 倒立の制御 ここでは、まず倒立の制御を行うための倒立の実現条件を示す。ロボットの質量中心 $G(x_g, z_g)$ に常に集中質量 $m(=m_1+m_2)$ が存在すると仮定すれば、 G に作用する力 $F=[F_x \ F_z]^T$ の X と Z 軸方向成分は

$$F_x = -m\ddot{x}_g \dots\dots\dots (2)$$

$$F_z = -m\ddot{z}_g + mg \dots\dots\dots (3)$$

で表される⁽²⁾。このとき、 Z 軸と力ベクトル F のなす角 ψ は

$$\psi = \tan^{-1} \frac{F_x}{F_z} \dots\dots\dots (4)$$

で得られる。また、第1関節 (x_0, z_0) と G を通る直線と Z 軸のなす角 ψ' は

$$\psi' = \tan^{-1} \frac{x_0 - x_g}{z_0 - z_g} \dots\dots\dots (5)$$

で求められる。

図4に示すように ψ と ψ' が一致していれば倒れないと考えられるので、 ψ と ψ' を一致させるように制御すること

図3 制御システムのブロック線図
Fig. 3. Block diagram of control system

図4 ψ と ψ' の定義
Fig. 4. Definition of ψ and ψ'

で倒立の制御が行える。したがって、ここでは $(\psi - \psi')$ を推論前件部への入力とする簡略化ファジィ推論を用いて倒立を制御する。また、 $(\psi - \psi')$ が同じ値でも、ロープの傾き ϕ とその速度 $\dot{\phi}$ によって倒立に必要とされるトルクは変わることから、 ϕ と $\dot{\phi}$ も前件部への入力とする。各入力のラベル数を3とした場合のファジィルールは

Rule 1: If $(\psi - \psi')$ is 1A_1 and ϕ is 1B_1
and $\dot{\phi}$ is 1C_1 then $\tau_2 = {}^1c_1$

⋮

Rule 27: If $(\psi - \psi')$ is ${}^1A_{27}$ and ϕ is ${}^1B_{27}$
and $\dot{\phi}$ is ${}^1C_{27}$ then $\tau_2 = {}^1c_{27}$

で与えられる。ただし、 1A_i , 1B_i , 1C_i ($i=1\sim 27$) はそれぞれルール i における推論入力 $(\psi - \psi')$, ϕ および $\dot{\phi}$ に対するファジィ集合であり、 1c_i は後件部定数値である。推論への入力がすべて0のときには安定なので、トルクは0になる必要がある。そこで、前件部メンバシップ関数には図5に示すような三角形型と台形型を採用する。このメンバシップ関数では、ラベル Z のメンバシップ関数の適合度が1のときには、他のメンバシップ関数の適合度は0となる。したがって、すべての入力に対するラベルが Z であるルールの後件部定数を0に設定しておけば、上記の条件を満足できる。各入力に対する前件部メンバシップ関数のパラメータを表1に示す。なお、前件部適合度は各入力に対するメンバシップ関数の適合度の積として与える。

なお、シミュレーションにおいて、式(2)と(3)に含まれる $\ddot{x}_g$ と $\ddot{z}_g$ を離散時間で求める際には以下のオイラー差分式を使用するものとする。

$$\begin{aligned} x_2(k) &= x_1(k) + (l_1 - l_{g1}) \sin \theta_1(k) \\ &\quad + l_{g2} \sin \{ \theta_1(k) + \theta_2(k) \} \\ z_2(k) &= z_1(k) + (l_1 - l_{g1}) \cos \theta_1(k) \\ &\quad + l_{g2} \cos \{ \theta_1(k) + \theta_2(k) \} \end{aligned}$$

表1 倒立に対する前件部メンバシップ関数のパラメータ

Table 1. Parameters of antecedent membership functions for handstand

Input	a_N	a_P
$\psi - \psi'$	$-\pi/90$	$\pi/90$
ϕ	$-\pi/15$	$\pi/15$
$\dot{\phi}$	-1	1

図5 倒立と後方車輪への移行動作に対する前件部メンバシップ関数

Fig. 5. Antecedent membership functions for handstand and transitional motion

$$\begin{aligned}x_g(k) &= \{m_1x_1(k) + m_2x_2(k)\}/(m_1 + m_2) \\z_g(k) &= \{m_1z_1(k) + m_2z_2(k)\}/(m_1 + m_2) \\\dot{x}_g(k) &= \{x_g(k) - x_g(k-1)\}/\Delta t \\\dot{z}_g(k) &= \{z_g(k) - z_g(k-1)\}/\Delta t \\\ddot{x}_g(k) &= \{\dot{x}_g(k) - \dot{x}_g(k-1)\}/\Delta t \\\ddot{z}_g(k) &= \{\dot{z}_g(k) - \dot{z}_g(k-1)\}/\Delta t\end{aligned}$$

ただし、 k は離散時刻、 Δt はサンプリング間隔を表す。
〈3・2〉 後方車輪への移行動作の制御 後方車輪とは胸が先行して行なわれる車輪である。倒立状態から胸側に倒れさせ、後方車輪に移行できるように簡略化推論を用いて制御する。この移行動作を行うためのファジールールは

- Rule 1: If $(\psi - \psi')$ is 2A_1 then $\tau_2 = ^2c_1$
- Rule 2: If $(\psi - \psi')$ is 2A_2 then $\tau_2 = ^2c_2$
- Rule 3: If $(\psi - \psi')$ is 2A_3 then $\tau_2 = ^2c_3$

で表される。ここで、 2A_i ($i = 1 \sim 3$) はルール i における推論入力 $(\psi - \psi')$ に対するファジィ集合であり、 2c_i は後件部定数値である。前件部メンバシップ関数には倒立の制御と同様に、図 5 に示すような三角形型と台形型を用いる。ファジィ推論前件部への入力 $(\psi - \psi')$ に対するメンバシップ関数のパラメータは倒立用制御器と同じとする (表 1 を参照)。

〈3・3〉 後方車輪の制御 後方車輪の制御は簡略化ファジィ推論により行い、そのファジールールは

- Rule 1: If θ_1 is 3A then $\tau_2 = ^3c$
- Rule 2: If θ_1 is $^3\bar{A}$ then $\tau_2 = 0.0$

で与えられる。ここで、 3A は後方車輪での τ_2 が非零 (3c) の時のファジィ集合、 $^3\bar{A}$ はその補集合とし、 3A に対するメンバシップ関数には

$$\mu_{^3A}(\theta_1) = \exp\{\ln(0.5)(\theta_1 - \alpha)^2/\beta^2\} \dots \dots \dots (6)$$

で与えられるガウシアン型を用いる (図 6 を参照)。ただし、 α と β はそれぞれメンバシップ関数の中心値と標準偏差の逆数を示す。

4. 独立の評価を有するサブグループに基づく評価法

本稿では、倒立から後方車輪を行い、再び倒立をする演

図 6 後方車輪に対する前件部メンバシップ関数
Fig. 6. Antecedent membership functions for backward giant circle

技を対象としており、1 回目と 2 回目の倒立の制御には同じ制御器を用いる。この場合、通常の GA では図 7 に示すように

- (1) 始めに倒立の制御器のパラメータを GA を適用することにより獲得する。
- (2) (1) で獲得した制御器によって倒立を行い、移行動作の制御器のパラメータを GA を適用することで獲得する。
- (3) (2) と同様に (1) と (2) で獲得した制御器で倒立と後方車輪への移行動作を行い、後方車輪の制御器のパラメータを GA で獲得する。

といった手順で、3 回 GA を適用することにより倒立から後方車輪までの演技スキルを得ることができる。しかしながら、この方法では、1 回目と 2 回目の倒立の制御に同じ制御器を用いるために、(1) の GA で 1 回目の倒立に対して最も評価が高かった個体が、偶然 2 回目の倒立に対しても有効でない限り、両方の倒立に対して有効な制御器のパラメータを獲得するのは非常に困難である。

そこで、本研究では独立の評価を有するサブグループに基づく評価法を提案し、これを上記の問題に適用する (図 8 を参照)。通常の GA の評価では、評価関数が 1 つしか

図 7 通常の GA における制御器のパラメータ獲得手順

Fig. 7. Procedure for acquiring parameters of controllers in normal GA

図 8 サブグループに基づく評価を用いた GA による制御器のパラメータの獲得

Fig. 8. Acquisition of parameters of controllers by GA using subgroup-based evaluation

く、この関数の最大化や最小化の問題を扱う。これに対して、提案する評価法では各サブグループが独立の評価を有し、なおかつサブグループ間には優先順位が存在する。ただし、各個体のサブグループへの分類は、適用する問題に応じて設定された判定条件に基づいて行なわれる。

図 9 に示すように、本研究と同様に個体群が 5 つのサブグループから成る場合の評価の優先度は第 1、第 2、第 3、第 4、第 5 サブグループの順に高いものとし、世代が進むにつれて第 5 サブグループの占める割合が増えていくことが期待される。同じサブグループ内の個体は、それぞれのサブグループで設定された独立の評価に基づいて、その優先度が決定される。なお、各サブグループでの評価は、最大化問題と最小化問題のどちらでも設定が可能である。

5. GA によるルールパラメータの獲得

〈5・1〉 GA の設定 GA において個体数は 60、交叉は交叉率 0.6 の一様交叉、突然変異率は 0.01、選択は 3 個体によるトーナメント戦略とし、世代交代の際には 6 個体のエリート戦略を用いた。各遺伝子（個体）の構造を図 10 に示し、それぞれの基本演技に対する制御器での獲得パラメータについて以下に記述する。

倒立用ファジィルール：倒立に対するファジィルールにおいて、前件部のファジィラベルがすべて Z の場合の後件部定数を 0 に設定し、残りの 26 個の後件部定数値 ($1c_1 \sim 1c_{13}$, $1c_{15} \sim 1c_{27}$) を GA で決定する。これらの後件部定数値の探索範囲はどれも $-400 \sim 200$ [Nm] とした。

後方車輪への移行動作ファジィルール：倒立から後方車輪への移行動作に対するファジィルールにおける 3 つの後件部定数値 ($2c_1 \sim 2c_3$) を GA で決定する。これらの後件部

図 9 5 つのサブグループから成る個体群における評価

Fig. 9. Ordering in population with 5 subgroups

図 10 遺伝子の構造

Fig. 10. Structure of chromosome

定数値の探索範囲はどれも $-200 \sim 100$ [Nm] に設定した。後方車輪用ファジィルール：後方車輪に対するファジィルールにおいて、後件部定数値 $3c$ および前件部メンバシップ関数のパラメータ α と β の 3 つが GA により決定される。探索範囲は $3c$ が $700 \sim 1100$ [Nm], α が $-\pi/12 \sim \pi/12$ [rad], β が $\pi/180 \sim \pi/6$ [rad] とした。

〈5・2〉 サブグループへの分類 3 秒間倒立した後、後方車輪を行い、さらに 3 秒間倒立を行なう演技を実現するために、GA に独立の評価を有する 5 つのサブグループを用いた評価法を導入するが、ここでは、5 つのサブグループへの分類方法について述べる（図 11 を参照）。

ここで、まず倒立の安定度を

$$s_h(k) = \psi(k) - \psi'(k) \dots \dots \dots (7)$$

とする。本研究では、この絶対値が $\pi/90$ [rad] より大きくなった場合には、倒立に失敗したものとみなす。シミュレーション開始時から 3 秒間（1 回目の倒立の最終設定離散時刻である $k_{f1} = 3/\Delta t$ まで）は、次の判定条件

$$|s_h(k)| < \pi/90 \text{ and } \theta_2(k) < \pi/9 \text{ and } \theta_2(k) > -\pi/18$$

を満足しているかどうかを各離散時刻ごとに調べる。この条件では、倒立の安定性を判定すると共に、倒立時の腰関

図 11 各個体を 5 つのサブグループに分類する手順

Fig. 11. Procedure for classifying each individual into 5 subgroups

節の角度を一定の範囲内に制限している。必要以上に腰関節を曲げることは倒立のスキルとしても、また演技の見栄えとしても好ましくないことからこのような条件を付加している。設定時間内に上記判定条件のうちどれか1つでも満足できなかった個体は、第1サブグループに分類され、その個体の計算は終了する。残りの個体は

$$|s_h(k)| > \pi/90$$

を満足した時点での離散時刻 k_t において

$$s_h(k_t) < 0$$

を満足しているかどうか調べられる。この条件を満足できない個体では、倒立の後ロボットが後方車輪とは逆の方向に倒れてしまい、後方車輪への移行が行えない。よって、そのような個体は第2サブグループに振り分けられ、その個体の計算は終了する。

後方車輪への移行ができた個体は、倒立へ移行できるか否かが判定される。倒立へ移行するためには、倒立の実現条件 $s_h(k) = 0$ [rad] を満足する場合は $\theta_1(k) > \pi$ [rad] で存在する必要がある。したがって、 k_t となってから3.5秒間（後方車輪の最終設定離散時刻である $k_{f2} = k_t + 3.5/\Delta t$ まで）は、各離散時刻ごとに次の判定条件

$$\theta_1(k) > \pi \text{ and } s_h(k-1) > 0 \text{ and } s_h(k) < 0$$

により、その存在の有無を判定する。設定時間内に実現条件を満足する場合は存在しない、すなわち判定条件を満足できない個体は第3サブグループに割り付けられ、その計算は終了する。この判定条件を満足した場合でも、その時の離散時刻 k_{h1} における $s_h(k_{h1})$ の時間変化率がある程度小さくないと倒立への移行はできないことから、判定条件

$$|\dot{s}_h(k_{h1})| < 0.1$$

によって、その大きさを制限する。この条件を満足できなかった個体の後方車輪は、倒立への移行が困難であることから、第4サブグループに分類され、その個体の計算は終了する。残りの個体はすべての判定条件を通過しており、第5サブグループに振り分けられる。

〈5・3〉 評価関数 ここでは、各サブグループの評価関数について記述する。第1サブグループでは、倒立用のファジィ制御器に対する評価を行い、1回目の倒立の安定度を表す第1の評価

$$f_1 = f_{11} + f_{12} \dots\dots\dots (8)$$

を最小化する。 f_1 を最小化することは、最も安定に倒立を行えるファジィルールを獲得することを意味する。 f_{11} は $|s_h(k)| < \pi/90$ [rad] と $\theta_2(k) < \pi/9$ [rad] および $\theta_2(k) > -\pi/18$ [rad] の条件をすべて満たしたときの評価で

$$f_{11} = \sum_{i=0}^k |s_h(i)| \dots\dots\dots (9)$$

である。倒立用制御器の評価では、第2関節（腰関節）の角度に制限を設けており、その設定範囲を越えた個体は倒立を失敗した個体と同様に扱われる。したがって、上記の条件のうちどれか1つでも満足できなかった場合にはペナルティ

$$f_{12} = (k_{f1} + 1) - k \dots\dots\dots (10)$$

を与える。 f_{12} は1回目の倒立の最終設定離散時刻 k_{f1} と倒立を失敗したと判定した時刻の差を表す。各離散時刻における f_{11} の最大値よりも、離散時刻の値すなわち“1”の方が必ず大きくなることから、最小化問題において f_{12} はペナルティとなる。

第2サブグループでは、倒立から後方車輪への移行動作用のファジィ制御器に対する評価を行う。第2の評価は

$$f_2 = k_t - k_{f1} \dots\dots\dots (11)$$

で表され、この評価の最大化問題とする。すなわち、後方車輪と反対側に倒れるまでに要する時間が長いほど良い評価となる。

第3と第4サブグループでは、後方車輪用のファジィ制御器が評価される。第3サブグループでは、後方車輪が実現できるように第3の評価

$$f_3 = \max\{\theta_1(k_t), \dots, \theta_1(k_{f2})\} \dots\dots\dots (12)$$

の最大化を行う。後方車輪ができて $\dot{s}_h(k_{h1})$ の値がある程度小さくないと、倒立への移行はできない。したがって、第4サブグループでは、第4の評価

$$f_4 = |\dot{s}_h(k_{h1})| \dots\dots\dots (13)$$

の最小化を行う。

第5サブグループでは、再び倒立用のファジィ制御器を評価する。第5の評価は1回目と2回目の倒立の安定度を足し合わせた

$$f_5 = f_1 + f'_5 \dots\dots\dots (14)$$

で与えられ、この値の最小化問題とする。2回目の倒立に関する安定度は、第1サブグループの場合と同様に

$$f'_5 = f_{51} + f_{52} \dots\dots\dots (15)$$

と書ける。ここで、 f_{51} は $|s_h(k)| < \pi/90$ [rad] と $\theta_2(k) < \pi/9$ [rad] および $\theta_2(k) > -\pi/18$ [rad] をすべて満たした時の評価であり

$$f_{51} = \sum_{i=k_{h2}}^k |s_h(i)| \dots\dots\dots (16)$$

で表される。上記の条件を満たせない場合には

$$f_{52} = (k_{f3} + 1) - k \dots\dots\dots (17)$$

がペナルティとして与えられ、その個体の計算は終了する。ただし、 k_{h2} は $\theta_1(k) > \pi$ [rad] を満たした時の離散時刻であり、 $k_{f3} = k_{h2} + 3/\Delta t$ は2回目の倒立の最終設定離散時刻である。 $k = k_{f3}$ になると、シミュレーションの設定時間に達していなくとも、その個体の計算は終了する。

6. シミュレーション

つり輪ロボットの各リンクとロープのパラメータ、第2関節の可動域および第2関節の角度に応じて設定したばね定数と粘性減衰係数は文献⁽²⁾と同じ値を用いた。なお、ロープのパラメータおよび第2関節のばね定数と粘性減衰係数は、実際の体操選手の演技との比較により調整されている。シミュレーション時間を9[s]、サンプリング間隔を1[ms]とし、ロボットの初期状態は以下のように設定した。

$$\begin{aligned}\phi &= -\pi/36, \quad \theta_1 = -\pi + \phi, \quad \theta_2 = 0 \\ x_1 &= \{l_r + (m_1 + m_2)g/k_r\} \sin \phi + l_{g1} \sin \theta_1 \\ z_1 &= \{l_r + (m_1 + m_2)g/k_r\} \cos \phi + l_{g1} \cos \theta_1 \\ \dot{q} &= [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T\end{aligned}$$

サブグループに基づく評価を用いたGAにより3つの基本演技に対するファジィルールパラメータを獲得した後、そのルールを用いてシミュレーションを行った。図12にその時間履歴の結果を示し、図13にその演技の連続的なイメージを示す。これらの結果から、本研究で我々が対象としている倒立から後方車輪を行い、再び倒立に戻る一連の

図12 シミュレーション結果
Fig. 12. Simulation results

演技をつり輪ロボットが実現していることがわかる。これにより、所望のルールパラメータが獲得できていることとGAに導入した評価法の有効性が確認できた。

7. おわりに

本稿では、男子器械体操の1種目であるつり輪において必須である倒立から後方車輪をし、もう一度倒立を行う演技を実現するための演技スキルをつり輪ロボットを通して、ファジィルールとして獲得した。つり輪ロボットによる演技を制御する際には、一連の演技を3つの基本演技（倒立と後方車輪および倒立から後方車輪への移行動作）に分けて考え、それぞれのファジィ制御器を状況に応じて選択するものとした。これら3つの制御器におけるルールパラメータを獲得するために、サブグループに基づく評価法を提案し、GAに導入した。この評価法には

- (1) サブグループはそれぞれ独立の評価を持つ。
- (2) サブグループ間には優先度が存在する。
- (3) 個体は適用する問題に応じて設定された判定条件に基づいてサブグループに分類される。

といった特徴がある。最後に、つり輪ロボットを用いたシミュレーションにより、サブグループに基づく評価法を用

図13 つり輪演技の連続画像
Fig. 13. Sequential images of ring exercises

いた GA で獲得されたファジイルールパラメータとその評価法の有効性を確認した。

今後は、2 リンクつり輪ロボットの解析をベースとして、3 次元の解析や現在製作中の実機による実験へと拡張していく予定である。

(平成 13 年 7 月 23 日受付)

文 献

- (1) 金子明友：体操競技のコーチング，大修館書店，pp. 79-81 (1974)
- (2) T. Yamada, K. Watanabe, K. Kiguchi and K. Izumi: "Acquisition of Fuzzy Control Based Exercises of a Rings Gymnastic Robot," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001), pp. 2584-2589 (2001)
- (3) S. Takashima, "Dynamic Modeling of a Gymnast on a High Bar," Proc. of 1990 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'90), vol. 2, pp. 955-962 (1990)
- (4) S. Takashima, "Control of Gymnast on a High Bar," Proc. of 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS'91), vol. 3, pp. 1424-1429 (1991)
- (5) 海野貴之，大原慎司，高島俊：「トランポリン運動ロボットの制御—連続跳躍のための制御—」，ロボティクス・メカトロニクス講演会'97 講演論文集，vol. A, pp. 391-392 (1997)
- (6) 吉田和夫，平田光徳，長門英明：「フリースタイルスキーの宙返り演技のダイナミクスと運動制御」，日本機械学会論文集 (C 編)，vol. 57, no. 543, pp. 3558-3564 (1991)
- (7) 福田敏男，細貝英実，近藤裕二：「ブラキエーション形移動ロボットの研究 (第 1 報，動特性の解析とシミュレーション)」，日本機械学会論文集 (C 編)，vol. 56, no. 527, pp. 1839-1846 (1990)
- (8) 中脇ダレル，周桑完，宮崎文夫：「複数のダイナミックモデルに基づく蹴上がり動作スキルの解析」，日本ロボット学会誌，vol. 18, no. 1, pp. 59-65 (2000)
- (9) 深代千之，桜井伸二，平野裕一，阿江通良：スポーツバイオメカニクス，朝倉書店，pp. 7-8 (2000)
- (10) 中村仁彦：「非ホロノミックロボットシステム」，日本ロボット学会誌，vol. 11, no. 4, pp. 521-528 (1993)

山 田 隆 明 (学生会員) 1976 年 3 月 23 日生。1996 年 3 月徳

山工業高等専門学校機械電気工学科卒業。1998 年 3 月同高専専攻科機械制御工学専攻修了。2000 年 3 月佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程修了。現在，同大学院工学系研究科博士後期課程在学中。ロボットに関する研究に従事。IEEE，日本ロボット学会，日本機械学会，バイオメカニズム学会，計測自動制御学会各会員。

渡 辺 桂 吾 (非会員) 1952 年 4 月 23 日生。1976 年徳島大

学工学部機械工学科卒業，1978 年同大学院修士課程修了。1980 年 1 月九州大学助手，1985 年 4 月静岡大学工業短期大学部助教授，1990 年 4 月佐賀大学理工学部生産機械工学科助教授，1993 年 4 月同教授，1997 年機械システム工学科教授。1998 年 4 月より同大学院工学系研究科教授 (生体機能システム制御工学専攻)。この間，1987 年 3 月～9 月，アテネ工科大学研究員。インテリジェント制御，行動型制御，ロボット制御等の研究に従事。工学博士。日本機械学会，IEEE などの会員。

木 口 量 夫 (非会員) 1964 年 2 月 15 日生。1986 年新潟大学工学部機械工学科卒業。マツダ株式会社等の勤務を経て，1993 年カナダ University of Ottawa 大学院博士前期課程修了。新潟工業短期大学助手，講師を経て，1999 年より佐賀大学大学院工学系研究科助教授。博士 (工学) [名古屋大学]。知的作業ロボット，医療・福祉ロボット等の研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本コンピュータ支援外科学会，日本バーチャルリアリティ学会，IEEE などの会員。

泉 清 高 (非会員) 1968 年 6 月 9 日生。1991 年長崎総合科学大学工学部電気工学科卒業，1993 年佐賀大学大学院工学系研究科博士前期課程修了，1996 年同大学大学院博士後期課程修了。1996 年佐賀大学理工学部機械工学科助手。1997 年機械システム工学科助手。2001 年工学系研究科助手。博士 (工学)。知能ロボットの研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，電気通信情報学会，日本ファジィ学会，精密工学会各会員。