

鉄棒体操における動作知識のファジィ言語表現

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2011-06-23 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 田川, 聡洋, 西野, 順二, 小高, 知宏, 小倉, 久和, TAGAWA, Akihiro, NISHINO, Junji, ODAKA, Tomomro, OGURA, Hisakazu メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/3426

鉄棒体操における動作知識のファジィ言語表現

田川 聡洋* 西野 順二** 小高 知宏** 小倉 久和**

Control Knowledge for the Horizontal Bar Gymnastic Action Represented by Fuzzy Language

Akihiro TAGAWA, Junji NISHINO, Tomohiro ODAKA and Hisakazu OGURA

(Received Feb. 28, 1997)

The purpose of this study is to represent player's behaviors knowledge for the horizontal bar gymnastic action in terms of fuzzy language. We have developed a kinetic simulator of a player at the horizontal bar gymnastic action. This model is coming from many links and joints. We realize player's behavior on a computer simulation by fuzzy language based on the human knowledge instead of mathematical expressions. The model of this knowledge was realized by hierarchical structured fuzzy control system.

This time, we have acquired the control knowledge about giant swing and fling up.

1 はじめに

本研究は、動作知識を用いて多変数システムを制御することを通して、言語による鉄棒運動の動作知識の獲得を目的としている。

コンピュータで何かを行う際には、その対象に関する知識を何らかの方法で表現し、その情報をコンピュータに与える必要がある。そのため、知識をコンピュータが扱える形にどうやって表現し直すかは重要な問題である。しかし、コンピュータが扱えることだけを重要視すると人間側からのアプローチが困難になり、システム全体の可読性、操作性を向上させ、人が扱えることも考える必要がある。このような問題の解決の一つの方法として知識表現として言語を用いたコンピュータシステムの構築について検討する。

そこで、動作知識の言語表現の試みを行う対象として、器械体操の種目の一つであり初等体育教育にも含まれている鉄棒体操を扱ってきた。[1],[2],[3] 知識の獲得を行うため、まず、実際に演技者が鉄棒をするのと同じような多関節多リンクからなるモデルをもとにシミュレータを構築する。これを制御することにより各種演技をコンピュータ上で実現する。しかし、多次元自由度をもつ制御は困難であるばかりでなく、一つの演技を実現しようとした場合、肩や腰や膝などを連動させた複数の制御を、時間に依存して最良のタイミングで行う必要がある。そこで、数値を用いて実現するのではなく、体操競技教本や人の知識をもとにファジィ言語表現による制御 [4] を用いてコンピュータ上で実現することを目指す。

*大学院情報工学専攻

**工学部情報工学科

2 鉄棒体操演技シミュレーション

2.1 鉄棒体操演技システム

体操知識とその表現を検討するために、知識を伝える場面、すなわち鉄棒体操を教える方法を考えてみる。すると、ある姿勢において「腰を曲げる」と具体的な言葉を用いて指示する方法や、「こんな姿勢になるように」というように感覚的な言葉を用いて指示する方法、また、「この姿勢になったらそれをしてこの姿勢になったらそれをする」というように動作の流れを含んで指示する方法などがある。まとめると、動き、目標の姿勢、切り換えのタイミングといった要素が重要な働きをしていると考えられる。このように、それぞれの指示方法に応じたシステムを検討する必要がある。また、各動作を行うタイミングを検討する必要もある。

そこで、本研究では、言語表現された動作知識を制御系として実現する枠組みとして図1のシステムを構成した。さまざまな指示や制御知識の表現方法に対しては、階層的知識 [5],[6] を採用して実現した。

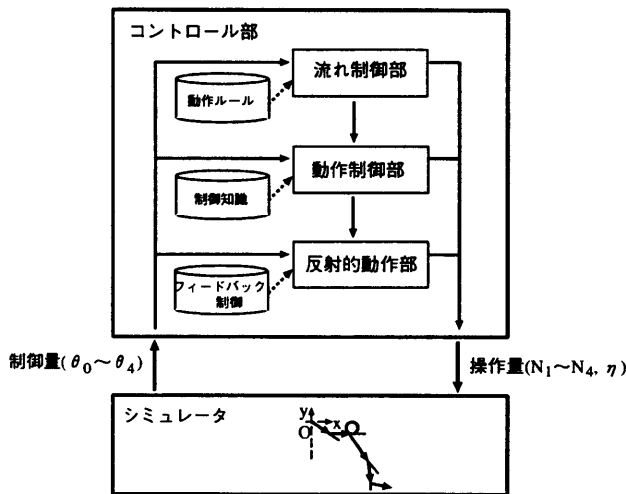


図 1: システム構成

システムは、シミュレータとコントロール部から構成される。シミュレータは、操作量である各関節トルクから制御量である各関節角度、角速度、角加速度を計算する。コントロール部は、流れ制御部、動作制御部、反射動作部から構成され、階層的な構造を持ち、制御量から操作量を推論する。

以下、コントロール部の詳細について説明する。

流れ制御部

流れ制御部では、演技における一連の動作やつながりを知識としてもち、高度な判断を行う。連続技「け上がり - 指示後振りおろし - ほん転逆上がり - 後方浮支持回転懸垂前振り - け上がり」のように技の順序を決定している。プレイヤーの状態(角度、角速度、重心の座標 etc)や現時点の演技動作から次の演技動作を判断する。また、次の演技にはいるタイミングなど技の連続のために必要な処理を判断を行う。

動作制御部

動作制御部では、鉄棒体操の各部分動作、一つ一つの演技を行う。例えば、「大車輪」、「ほん転逆上がり」が該当する。ここには、各動作要素を実現する上でのルールが知識としてたくさんある。例えば、「大車輪」の中に「真下を通過したら肩をまげる」というルールが含まれている。これから各関節に加えるトルクや姿勢の目標値を推論する。「大車輪」の方法や順序や車輪の中における各ステップのタイミングを制御する。

反射動作部

反射動作部では、「腰をまげる」など指示されたことをそのまま実行する。また、「ある姿勢」という感覚的な指示に対しての動作、そのまの姿勢を維持する動作がこの部分に該当する。動作制御部で、推論された目標値とフィードバックゲインにしたがって feedback 制御を行う。ファジィ規則によるファジィフィードバックとすることもある。

2.2 プレーヤーのモデル化

鉄棒体操運動の演技シミュレータを構築する際、その運動を力学的に解析するためには対象物である人体を解析可能な形にモデル化する必要がある。ここで、プレーヤーのモデル化を行なう。

モデルは、図2のような4関節5リンクからなり、各リンクは一樣な剛体とする。頭は重さゼロとする。鉄棒の断面を原点 O 、水平方向に x 軸、鉛直上方に y 軸とし、プレーヤーは x - y 平面で運動するものとする。全ての角度の向きは、反時計廻りを正とする。

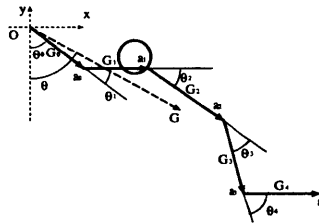


図 2: プレーヤーのモデル

各記号は、

M_{all}, G : 全体の質量, 重心の位置	θ : 全体の重心角
m_0, a_0, G_0 : 前腕の質量, 長さ, 重心の位置	θ_0 : 前腕傾角
m_1, a_1, G_1 : 上腕の質量, 長さ, 重心の位置	θ_1 : 肘屈曲角
m_2, a_2, G_2 : 上体の質量, 長さ, 重心の位置	θ_2 : 上腕拳上角
m_3, a_3, G_3 : 大腿の質量, 長さ, 重心の位置	θ_3 : 上体伸展角
m_4, a_4, G_4 : 膝下の質量, 長さ, 重心の位置	θ_4 : 下肢屈曲角

とする。各リンクの重心の座標を $G_i(x_i, y_i) (i = 0, 1, 2, 3, 4)$ とする。

2.3 プレーヤーモデルの運動方程式の導出

運動方程式は、ラグランジュ方程式を用いて求める。

運動エネルギー T は、各リンクにかかる運動エネルギー T_i の総和になるので、

$$T = \sum_{i=0}^4 \left(\frac{1}{2} m_i (\dot{x}_i^2 + \dot{y}_i^2) + \frac{1}{2} I_i \dot{\phi}_i^2 \right) \quad (1)$$

である。ここで、 I_i は、各リンクの回転による慣性モーメントで、

$$I_i = \frac{1}{3} m_i \left(\frac{a_i}{2} \right)^2 \quad (2)$$

である。これより、

$$T = \sum_{i=0}^4 m_i \left(\frac{1}{2} \dot{x}_i^2 + \frac{1}{2} \dot{y}_i^2 + \frac{a_i^2}{24} \dot{\phi}_i^2 \right) \quad (3)$$

となる。重力によるポテンシャルエネルギー V は、全体の重心にかかるポテンシャルエネルギーなので、

$$V = M_{all}gY = \sum_{i=0}^4 m_i g y_i \quad (4)$$

となる。ここで g は、重力加速度である。よって、ラグランジュ関数 $L = T - V$ は、

$$L = \sum_{i=0}^4 m_i \left(\frac{1}{2} \dot{x}_i^2 + \frac{1}{2} \dot{y}_i^2 + \frac{a_i^2}{24} \dot{\phi}_i^2 - g y_i \right) \quad (5)$$

である。このラグランジアンを用いると、自由度 θ_i に対する運動方程式は、次のラグランジュ方程式から得られる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = N_i \quad (6)$$

この運動方程式を、4 次の Rungr-Kutta 法により離散化し N_i をパラメータとして、シミュレータで数値的に扱った。ラグランジュ方程式から離散化するための数式処理は Mathematica を用いて行った、

3 鉄棒体操演技動作知識と言語表現

3.1 動作知識の言語表現

鉄棒体操演技では、肘や肩や腰などの多次元自由度を連動させた制御を、適切なタイミングで行う必要がある。このような制御を行うには、身体動作とそれが運動に与える影響などといったすでに得られている熟練者のもつ経験的知識を利用することができれば、対象システムの数式化やパラメータ同定、強い近似などの処理負担を軽減できる。このとき、そのような知識をいかに記述し、利用するかが重要な問題となる。この、知識による複数の制御の実現方法として数値を用いる方法、言語表現を用いる方法が考えられる。一つ一つの演技を数値で表現すると多くの数値を導かなくてはならない。この方法では、汎用性がなく、その値を決定するのが困難であるという問題点が生じる。一方、言語表現を用いる事で、これらの問題の回避が期待できる。通常、演技者は、鉄棒体操を練習する際に体操競技教本や人の知識や熟練者の演技を参考にする。そこで、鉄棒を行うための動作知識の特徴を検討してみることにした。

ここでは、動作知識の特徴を、教本の中から抜粋した懸垂振動の演技を例にとり説明する。この図 3 は、左から右に時間が推移しており、演技者の状態が連続図により示されている。

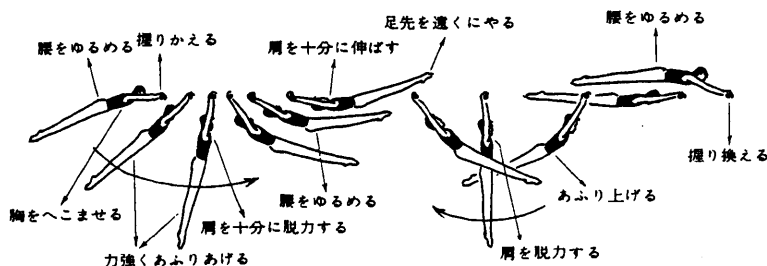


図 3: 懸垂振動の連続図 (金子明友 著, 森 直幹 画: "体操競技教本 II 鉄棒編" より抜粋)

連続図は、各時点での動作が言葉によって書かれている。この様に、動作知識は、「体がある状態に達したときに適切な動作を行う」という形で人間の頭の中にイメージとして存在する。また、懸垂振動の練習における重要なポイントとして以下の 3 点があげられている。

1. 前に振れた時と後ろに振れた時には軽く腰をまげる

2. 前振りでも後振りでも、足先が真下を通過するときには腰を伸ばす

3. 振れ戻る時に、肩にゆるみをなくすようにしながら足先を遠く押し出すようにして後振りに備える

同様に、経験者が鉄棒体操を教える場合であっても、体がある状態に達したときに次動作を指導することが多い。このように演技者が、鉄棒体操を行うためには体操の教本や人の知識をもとにしている。この知識から演技者は、複数の関節を簡単に制御して演技する。

計算機で扱う言語表現にはさまざまな表現方法がある。本研究では、ファジイ集合を用いた言語表現を行った。これは、鉄棒体操の動作知識を検討してみたところ「力強くあふりあげる」、「十分に肩を伸ばす」などといったあいまいな表現があり、これに対処するためである。以下では、ファジイ集合を用いることにより動作知識の表現を行った。

3.2 大車輪

大車輪とは、鉄棒体操の運動を行う時の基本的な演技の一つである。大車輪のような回転運動は、支点の鉛直線上から重力により、振り下ろし時に位置エネルギーが運動エネルギーに変換される。振り上げ時には、逆に運動エネルギーが位置エネルギーに変換されてもとの鉛直線上にもどることになる。このとき、振り下ろし前半時に身体を伸長して回転半径を増すか、振り上げ後半時に身体をまげて回転半径を短縮することによって運動エネルギーを増す必要がある。採点規則に鉄棒競技の三大特性として安全性、優雅さ、雄大さがある。大車輪においても、雄大さを求めより大きな回転運動を行うためには、回転中に身体各関節をできるだけ曲げない方がよい。よって、何らかの方法で必要なエネルギーを得なければならない。この様子は、図4の連続図により示す。この図4において、時間は左から右に推移しており、その各時点での動作が言葉によって書かれている。このように、鉄棒体操の演技者は自分の体がある状態に達した時に適切な制御を行っている。

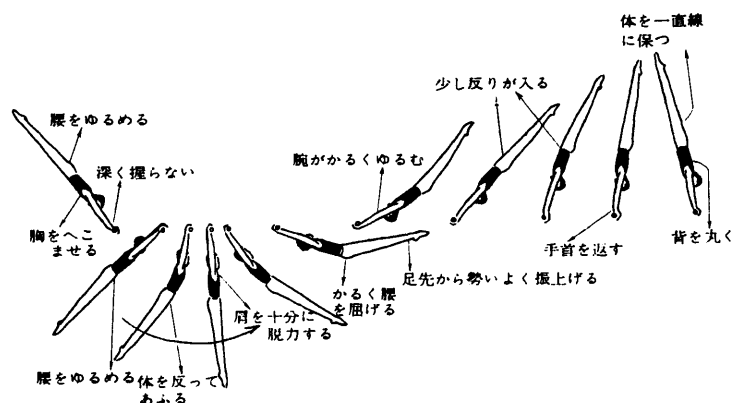


図4: 順手車輪の連続図(金子明友 著, 森 直幹 画: "体操競技教本 II 鉄棒編"より抜粋)

この演技を実現するにあたって重要なことは、あふりだすタイミング、演技終了状態での体を伸ばし切るタイミング、そして、あふるために腰をゆるめて体をそらすことの3点と考えられる。大車輪を行う上での動作知識を体操競技教本 [7],[8] から獲得した。図5は、この知識を図示したものである。

このようにして獲得した鉄棒における動作知識を、人間が運動をイメージするのにより近い表現の一つとして、ファジイプロダクションルールを用いて構成した。形式は、if プレーヤーの状態 then 操作量 となっている。プレーヤーの状態は、重心の位置や各関節の角度、各関節の角速度や各関節にかかっているトルクである。操作量は、各関節にかかるトルクである。図5の動作知識をルールにすると次の通りになる。このルールは図1のシステムでは、動作制御部に対応する。

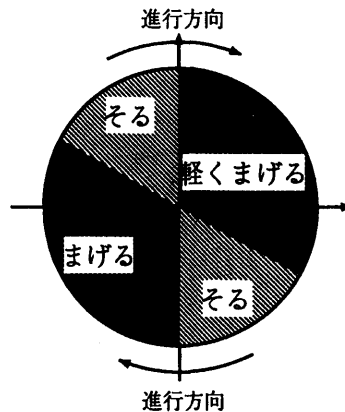


図 5: 大車輪

θ_g 真下より少し前 and $\dot{\theta}_{gx}$ 負方向 then N 少し伸ばす
 θ_g 真下通過後 and $\dot{\theta}_{gx}$ 負方向 and θ_3 s then N 大きくまげる
 θ_g 真下通過後 and $\dot{\theta}_{gx}$ 負方向 and θ_3 m then N 中ぐらいまげる
 θ_g 真下通過後 and $\dot{\theta}_{gx}$ 負方向 and θ_3 b then N 少しまげる
 θ_g 真上前 then N 中ぐらい伸ばす
 θ_g 真上通過後 and $\dot{\theta}_{gy}$ 少し速度 then N 中ぐらいまげる

ここで、 θ_3 は、上体伸展角、 θ_g は、重心の位置、 $\dot{\theta}_{gx}$ は、重心の x 方向の移動速度、 $\dot{\theta}_{gy}$ は、重心の y 方向の移動速度、 N は、腰のトルクを示す。ルール中の「真下より少し前」などは、ファジィ集合のラベルであり、あいまいなひろがりをもっている。

3.3 振り上げ

振り上げのためには、腰や肩を屈げた状態からの反動、または引き上げを使って支持回転系の運動に持ち込み、棒下振り出しの方法で、前に振り出すという手順の運動が必要である。これをする上でのポイントは二つある。その一つは体を引き上げてから腰を鉄棒に引寄せながら前に振り出していきスピードを高めることである。このためには、体を引き上げてから後方に回転を起こすのに肩が十分に後上方に保たれていることが大切である。二つめのポイントは、振り出し切った時の姿勢についてである。

振り上げの動作知識の検討のため、鉄棒体操が録画されたビデオを繰り返し見て、振り上げ演技の分析を行った。この時、カメラのアングルが真横で演技が行われている映像を参考にした。また、その運動をコマ送りで再生し、演技者の状態の変化を細かく記録した。振り上げ演技は、以下の六つの手順で行っていると考えられる。各手順での動作知識は以下のようにまとめられる。

1. ふらさがっている時から少ししかずれてない時、膝が見えるぐらいまで足を大きくふりあげて鉄棒に足首を近づける
2. 膝が見えた時、ふりあげた足を利用して体をそる
3. 体が完全に真下を通過したら、そった体の反動を利用して上にはねあがる
4. 肩を鉄棒の高さまでもってきたら、鉄棒におなかと胸をひきつける
5. 重心が真下ぐらいになったら、膝を伸ばす

6. 膝が伸び始めたら、肘を伸ばす

また、次の目標とする姿勢にうつるタイミングも獲得した。目標姿勢になるようにフィードバック制御を行う。

ルール適応時のプレーヤーの状態と次の動作を、言語で表現したものは以下のとおりである。

表 1: 目標姿勢

	rule1	rule2	rule3	rule4	rule5	rule6
	足首を鉄棒に近づける	身体を反る	肩を鉄棒の高さに持つてくる	鉄棒におなかと胸をひきつける	膝をのばす	肘をのばす
肘	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ
肩	屈げる	軽く反る	屈げる	強く屈げる	強く屈げる	まっすぐ
腰	強く屈げる	軽く反る	軽く屈げる	屈げる	まっすぐ	まっすぐ
膝	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ	まっすぐ

表 3.3の目標姿勢は図 6に示す。

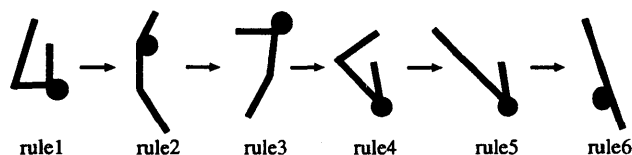


図 6: 振り上げ

これらのルール (獲得した動作知識) を用いて振り上げの実現を試みる。ここでルール変更時のタイミングが重要な問題となる。タイミングが少しずれると演技が成り立たない。よって、プレーヤーの状態をしっかりと把握しなければならない。プレーヤーの各関節の角度だけでは、プレーヤーの姿勢、状態把握は不十分である。そこで、重心の位置、速度も加えて把握する。

4 シミュレーション結果

4.1 大車輪

教本から獲得した動作知識を用いて車輪をシュミレートした。結果を図 7の連続図に示す。図 7の連続図から前述の制御によって大車輪演技が実現できていることが分かる。真下前から身体を反ってあふる動作や真上前では体を少し反る動作、また真上では体を一直線に保つ動作が確認できた。これより大車輪における動作知識が獲得できたといえる。教本から獲得した知識と図 7を比較してみると知識と動作結果がずれている個所があることが分かる。これは、動作を指示しても、すぐには姿勢にはあらわれないからだと考えられる。なぜなら、プレーヤーは、腰をずっとまげていて伸ばす動作をしようとしてもすぐにはそれを実行できないからである。また指示されて動作を行っているが、プレーヤーの速度、移動方向によって力加減は変化するからである。

図 8は重心の軌跡を示す。図 8が楕円になっていることより回転半径が小さくなっている個所があることが分かる。

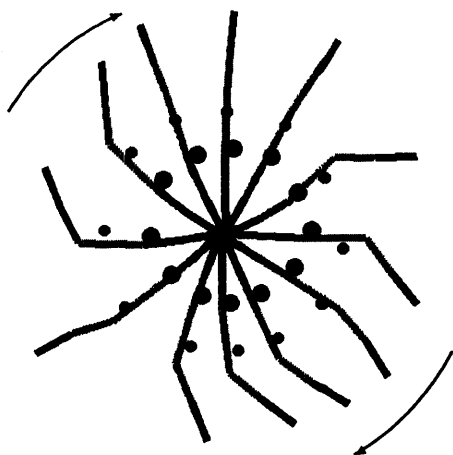


図 7: 大車輪

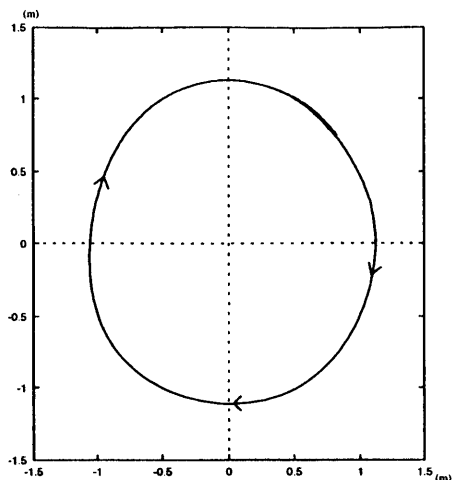


図 8: 重心の軌跡

図 9 は力学的エネルギーを示す。手には常に手の周りの速度に比例した摩擦がかかっているにもかかわらず、エネルギーが増加している。一回転前と後の 0.0 秒と 2.8 秒の時点のエネルギーを比較すると明かである。エネルギーが急激に増加したのはあふりの影響だといえる。また、エネルギーが急激に増加した前の減少は、あふりのタイミングのずれだと考えられる。

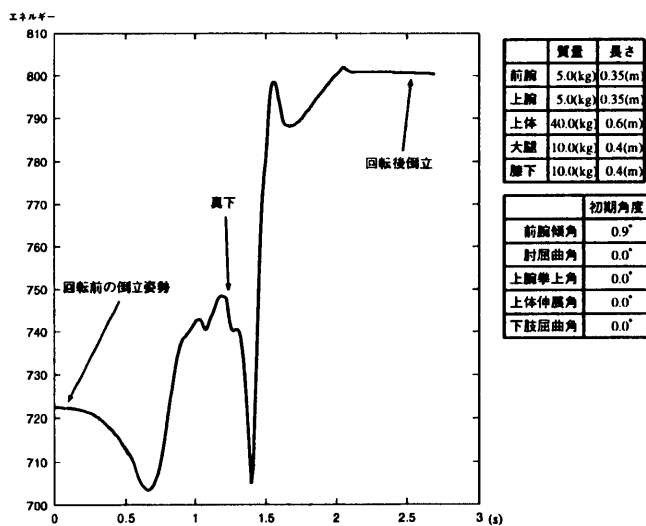


図 9: 力学的エネルギー (大車輪)

4.2 振り上げ

3.3で述べたように教本や人から獲得した動作知識を用いて振り上げを試みた。姿勢に着目してフィードバック制御を用いた。ここでは、次の目標姿勢を実行するタイミングが重要であった。それは、タイミングの微妙なずれにより演技が成功しないことが実験によってみられたことから分った。タイミングは教本の知識と試行錯誤により獲得した。

結果を図 10 の連続図により示す。この図 10 において時間は左から右に推移している。図 10 の中で、プレーヤーの重心位置は、各プレーヤー位置に対してつけた小さい黒点で示した。図 11 は重心の軌跡を示す。

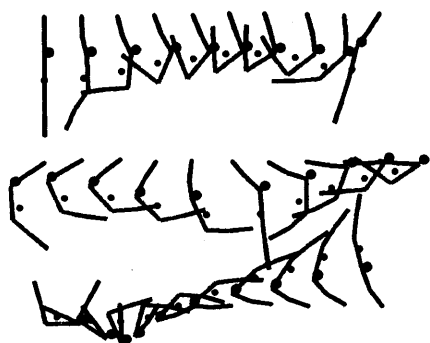


図 10: 振り上げ

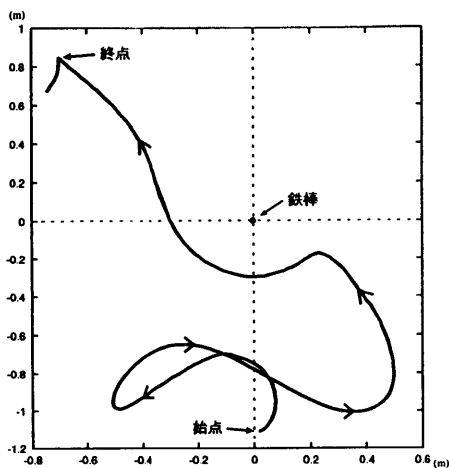


図 11: 重心の軌跡

図 12 は力学的エネルギーを示す。部分的にエネルギーの減少がみられる。これもタイミングのずれにより生じたものだと考えられる。

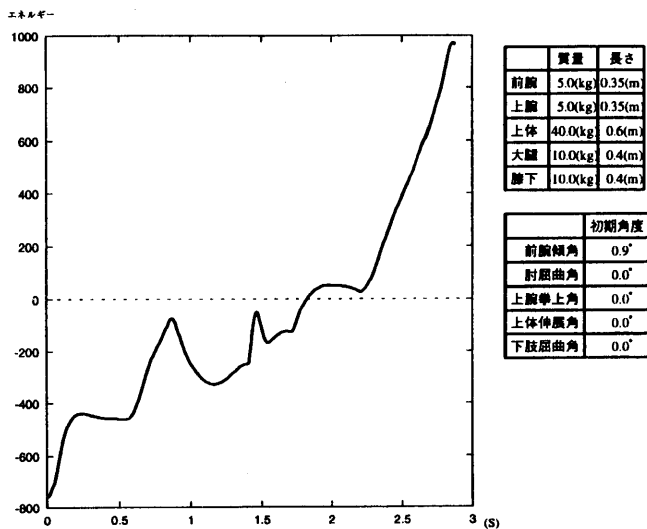


図 12: 力学的エネルギー

5 考察と今後の課題

これまで、肘や肩や腰など多次元自由度をもつモデルに対して制御を行ってきた。その方法としてファジィ言語表現を用いた。動作知識は、鉄棒体操のビデオや人や教本の知識から各演技における演技者の状態を演技者が各関節に与えているタイミングや力の入れ具合、演技中の姿勢などから獲得した。言

語表現された動作知識を制御系として実現する枠組みとしてシステムを構成した。さまざまな指示や制御知識の表現方法に対しては、階層的知識にすることにより実現した。階層的にしたことにより、各関節の部分的な動作まで簡単に表現することが可能となった。また、言語により表現された動作知識をプログラムすることが可能となった。

大車輪、振り上げの動作知識を獲得できた。力学的エネルギーから明かであるように、動作のタイミングが重要であることが分ったため、主に人の知識や試行錯誤により力学的エネルギーの減少を最小とするように制御規則やパラメータを調整した。しかし、現在までの結果では、狭い範囲でしか演技が成功しない。通常、演技者の姿勢はかるくゆれていたりして演技を始める姿勢はその都度変化しているのです、さらに初期姿勢の許容範囲を広げる必要がある。よって、ルールの見直し、タイミングの見直しが必要となってくる。そのため、ルールの見直しについて、次のことを考えなければならない。今まで、姿勢に着目して各関節の角度に対してフィードバック制御を行ってきただけなので、目標姿勢だけでなく、速度に対してもフィードバック制御をする必要がある。そうすれば、より許容範囲の広い動作知識を獲得でき、初期姿勢を少しずらしても演技が成功すると考えられる。タイミングの見直しについては次のことを考えている。タイミングの獲得は、本の知識だけでは不可能である。次の動作にうつるタイミングは、前の動作によって変化していく。このことを考えてタイミングを獲得していかなければならない。よって、実際の体操経験者でないとタイミングの獲得が困難である。このタイミングに対しても角度、重心の位置、速度、今まで各関節に加えたトルクの履歴からタイミングを獲得しなければならない。

なお、当研究室では、現在トカチェフのような鉄棒から手が離れるような技についても研究を行っている。[9]論文では、4関節5リンクからなるモデルを対象としてきたが、手放し技では、簡単のためとりあえず、3リンク2関節からなるモデルを対象としている。鉄棒を持っている状態（拘束有り）、鉄棒を持っていない状態（拘束無し）の別々のモデルを作成し、それぞれの運動方程式を導出し、シミュレータを構成している。鉄棒を放したり掴んだりする動作は、この二つモデルを切り替えることで表現している。これによってコバチ演技やトカチェフ演技らしい動作をさせることができている。詳しくは別途報告する予定である。

謝辞

本研究は、応用物理学科の長谷川健二先生の鉄棒体操コンピュータシミュレーションをきっかけにして開始し、教育学部保健体育科の吉澤正尹先生の示唆を頂いて行ってきたものである。両先生に深く感謝いたします。また、本研究室の前田成司君には、討論に参加してもらったことを感謝する。

参考文献

- [1] 北川昇：「鉄棒体操における制御知識の表現とシミュレータ・インタフェースとの統合」福井大学工学部平成6年度卒業論文
- [2] 田川聡洋, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和：「鉄棒体操における動作知識の言語表現の試み」平成8年度電気関係学会北陸支部連合学会
- [3] 田川聡洋, 西野順二, 小高知宏, 小倉久和：「鉄棒体操における動作知識の言語表現」平成9年度情報処理学会第54回全国大会
- [4] 菅野道夫：「ファジィ制御」日刊工業新聞社(1988)
- [5] 安信誠二：「ファジィ工学」昭見堂
- [6] 田中一男：「アドバンストファジィ制御」共立出版
- [7] 金子明友著：「鉄棒競技教本 鉄棒編」不味堂
- [8] 京都大学体操研究会：「体操競技研究」タイムス(1984)
- [9] 前田成司：「鉄棒体操のシミュレーションの拡張と制御知識の再構成」福井大学工学部平成8年度卒業論文