演技スキル表現系について

On Performance Skill Representation Framework

古川 康一

FURUKAWA Koichi

慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科

Graduate School of Media and Governance, Keio University

furukawa@sfc.keio.ac.jp, <http://bruch.sfc.keio.ac.jp/>

清水 聡史

SHIMIZU Satoshi

慶應義塾大学環境情報学部

Faculty of Environmental Information, Keio University

t02485ss@sfc.keio.ac.jp

吉永 早織

YOSHINAGA Saori

(同上)

t02007sy@sfc.keio.ac.jp

keywords: skill science, performance skill, skill representation, performance rule, dynamic integrity constraint

Summary

In this paper, we propose a framework for representing performance skill. Firstly, we notice the importance of performance skill representation. We introduce five different representation targets: performance tasks, performance rules, pre-shaping actions, dynamic integrity constraints, and performance states. Performance task description consists of a sequence of performance tasks and expressions. It acts as a goal description in planning. Performance rules describe model performance methods for given tasks including how to shape body parts and how to use various muscles. Pre-shaping action rules are similar to performance rules. Its role is to pre-shape in between consecutive tasks to prepare for the next task. Dynamic integrity constraints specify constraints to be satisfied during performance. They provide such general rules as prohibiting simultaneous strong activations of agonist and antagonist. Performance states are for describing real performance done by players including professionals and amateurs. The aim of the framework is to provide a uniform scheme for representing model performance methods given performance score such as music score. The representation framework will define targets of inducing formal skill rules as well as describing performance states automatically from biomechanical performance data. It also is related to a fundamental research issue of attributes finding/selection in discovering useful rules for skillful performance. We conclude our paper by stating future research direction.

1. はじめに

身体知の解明は、困難な課題である。従来は、スポーツ科学の分野を中心に種目ごとに多様なアプローチが採られてきた。しかしながら、それらの努力が1つの方向に収束しているようには見られない。その理由は、身体知自身の複雑性、および進化性にあると考えられる。第1の問題は、人工知能の分野で、いわゆる不良設定問題と呼ばれている困難性であると考えられる。それは、文脈依存性と言い換えても良い。第2の問題は、スキル自身が発展を続けている、という問題である。それは、高度な熟達者による新たな着想に基づく、新たなスキルの発見の可能性である。我々は、この2つの問題に取り組む、5年以内での問題解決・実用化を目指して、近未来チャレンジセッション「身体知の解明に向けて」を発足させた[古川03]。

この二つの問題へのアプローチとして取り組まなければならない課題には、演技スキルの知識表現系の設計、

しなやかな動きをモデル化するために必要な粘弾性力学モデルの構築、スキル解明の着眼点を得るための属性発見・選択、スキルの個人差のモデル化などが考えられる。本稿では、その中でとくに第1の課題である演技スキルの知識表現系の設計を取り上げる。本論文では、とくにチェロの右腕による運弓動作に着目して、そのスキルの表現を目的として、演技スキル表現系を提案するが、ここでの提案は、ダンスやスポーツなどでのスキルの表現にも応用が可能であると考えられる。

本稿の構成は、以下の通りである。2章では、本チャレンジのゴール、研究計画、および進捗状況について述べる。また、本論文に取り上げる演技スキルの表現系の、本チャレンジでの位置づけについて述べる。3章では、これまでの演技表現の試みについてサーベイする。4章では、演技スキルの知識表現の枠組みを与える。5章から9章では、4章で与えた演技スキルの知識表現の各構成要素について、それらの詳細を述べる。5章では、演技譜の表現について概説する。6章では、演技譜を構成する各

演技課題に対する演技ルールの表現を与える。7 章では、調節動作の表現について述べる。これは、pre-shaping と呼ばれる、各演技課題のための準備動作である。8 章では、演技中に満たされなければならない動作一貫性制約条件について述べる。9 章では、演技状態系列の記述を行う。演技状態は、実際の演技者による演技のされ方を記述するものである。10 章では、5 章から 9 章で与えた各演技表現の構成要素をどのようにして作り上げていくのか、その過程について述べる。11 章では、本演技スキル表現系を利用した演技のプランニングについての構想を述べる。12 章では、演技スキル表現系の開発に向けての今後の課題を述べると共に、身体知の解明に向けた本近未来チャレンジのゴールの達成の可能性について論じる。

2. 本近未来チャレンジのゴールと研究計画について

我々が提案した近未来 AI チャレンジのテーマ「身体知の解明に向けて」のゴールは、身体知の解明のための方法論の確立である。身体知の対象には、楽譜通りの演奏のような安定した環境を仮定したクローズドスキルと、試合において相手に合わせた動きをするような不安定な環境でのオープンスキルの 2 種類があるが [Poulton 57]、ここではより基本的で訓練段階においても先行して獲得されるクローズドスキルを取り上げる。具体例として取り上げるチェロの運弓動作は、クローズドスキルの要素が強く、また、それ自身は高度なスキルを要求するので、ここでの研究対象としてふさわしいものと考えられる。

本提案の特徴は、従来力点が置かれてきた運動学に止まらず、運動力学をも考慮した様々な技巧的な動きの原理の解明に焦点を当てている点である。そのためには、結果としての体の動きのみに注意を払うのではなく、その原因となる、筋肉の使い方、姿勢のとり方を問題にしなければならない。また、本研究テーマを遂行するに当たり、いくつかの課題を設定した。第 1 の課題は、動作一貫性制約条件、すなわち、複数の筋肉の活動、姿勢のとり方、あるいは協調動作などに関する制約条件を明らかにすることである。それらの制約条件は、好ましい体の動きを選択する際の探索空間の絞込みを可能とする。第 2 の課題は、スキルを的確に表現するのに必要となる属性発見・選択の問題である。第 3 の課題は、従来の剛体力学モデルから脱却して、しなやかさを扱うのにより適した、粘弾性力学モデルの構築である。第 4 の課題は、データマイニングなどの方法による観測データからのスキルの自動抽出手法の開発である。

我々は、これらの各課題について、様々な研究活動を続けてきた。第 1 の課題、すなわち、動作一貫性制約の解明に関しては、その重要性を [Ueno 00] で指摘した。第 2 の課題、すなわち、属性発見・選択については、[古川 05b] でそのアプローチを解説した。第 3 の粘弾性力学モ

デルの構築に関しては、とくに鞭運動についての考察を行い、その成果を [Furukawa 05] で報告した。第 4 の課題、すなわちデータマイニング手法によるスキルの自動獲得については、その研究開発の一端は [植野 05] で発表した。

本論文で提案する演技スキルの知識表現系は、これらの各アプローチの統合プラットフォームと位置づけることが出来る。そのため、演技スキルの知識表現系の研究開発は、本近未来 AI チャレンジの中では、全体の統合計画として捉えることが出来る。また、本知識表現系自身としても、与えられた課題に対する適切な動作系列のプランニングのために直接利用することを目指している。

本論文では、クローズドスキルの例としてチェロの運弓動作を取り上げ、そのスキルの記述を表現するための演技スキル表現系を提案するが、それは単にチェロの運弓動作の表現に止まらず、より多くの対象に対して応用が可能であると考えている。

3. 演技表現の関連研究

演技譜とは、音楽や舞踊などの演奏や演技などのためのプログラムであり、最もよく知られているのは音楽の演奏のための楽譜である。ところで、演技スキルは、体の動きが重要である。そのため、体を動かす舞踊の表現は、演技スキルの表現により深く関係しており、舞踊の表現としては、Labanotation がよく知られている。Labanotation とはルドルフ・ラバンが開発した舞踊を記録する記譜法の一つであり、国際会議でしばしば改良が行われ、欧米において舞踊研究や教育の分野で幅広く用いられている [中村 01a]。音楽におけるスコア譜と考え方は近く、スコア譜がオーケストラの各パートの音の情報を時系列的に書き記せるのに対し、Labanotation は身体各部位の状態を時系列的に記号として表現できる。Labanotation は選択された静止点での各身体部位の空間上の位置を提示するとどまり、ある型から別の型へ移行する際の軌跡については記述を行わない。それによって、記述量の爆発を防いでいる。また、楽譜における表情記号 (クレッシェンド、フォルテなど) に当たるものも存在する。

我々が目指すところと Labanotation は関係性が強いが、いくつか注意すべき点がある。第 1 に、舞踊譜を理解するためにはスコア譜を読みこなすのと同じように、それなりの訓練が必要であるということであり、第 2 に、本論文で提案する演技スキル表現系は筋肉の活動状態を含んだ運動力学を考慮しているが、Labanotation は運動学的な側面しか記述できないということである。さらに、第 3 にダンスは型そのものが半ばゴールであるが、音楽演奏においてはその結果として現れる音が良くなければならないという点も我々の問題と異なる。この点について補足すれば、演奏においては楽器に制約されたアプローチを求められ、個人差の問題が舞踊よりも顕著に

なることは自明であるとも言えよう。このような問題点は大いだが、近年 Labanotation とコンピュータをリンクさせた研究が始まっており、運動学的な側面を補う意味で参考になる部分があり、本節で諸研究の一部を紹介したいと考える。

まず、高木ら [高木 96] による研究では、Intelligent-Pad [IPC 05] 上に Labanotation を構築し、CG で人間の動作を製作する際の手間を削減させている。吉田ら [吉田 98] は、Labanotation の譜面をコンピュータに読み込ませる LabanReader を開発し、GUI で編集のできる Laban Editor の開発も行っている。そしてそれらとともにモーションキャプチャを利用した Labanotation の学習システムを開発し、複雑な Labanotation の理解を助けることを試みている [中村 01b]。八村ら [八村 01] はモーションキャプチャから得られたデータを Labanotation の舞踊譜に変換する手法について模索している。中澤ら [中澤 04] はモーションデータから速度の極小値に注目した最小セグメント化に EM-Algorithm を使用し、より大きな単位にするために Apriori Algorithm を適用させ、生体データを Labanotation 化する精度をさらに上げる手法を提案している。[Zhao 04] では、Labanotaion の専門家によって訓練されたニューラルコンピューティングモデルを用いて、モーションキャプチャとビデオデータから得られた手の動作の特徴抽出についての研究を行っている。

上述した研究は必ずしも演技スキル表現系に直接結びつくとは限らないが、舞踊の世界で数十年批評され改良されてきた Labanotation がコンピュータと親和性が高く、身体運動を表現する記号の新たな活路を見出すことに成功していると言える。それを音楽における身体動作研究に応用するのは、そう難しいことではないと思われる。

Labanotation と本研究での表現の最も異なる点は、その抽象度である。本稿で与える演技の表現は、体の具体的な動きそのものではなく、スキルという観点から見て重要であると思われる「演技課題」を単位として、その記述を行うことを狙っている。それは、実際の動き自身を記述するのに比べ、より抽象的である。また同時に、その時の体の各部分の使い方を記述している点では、より詳細である。

演技スキルは、動きが本質的である。そのため、知識表現自身、静的な論理表現の枠を超えなければならない。そのような表現としては、Event Calculus に基く発想論理プログラミング (Abductive Logic Programming, ALP) [Kakas 93, Kakas 98]、Situation Calculus に基くアクション言語 [Gelfond 93, Inoue 05] などがその候補と考えられる。これらの表現系は時間経過に伴って変化する世界の記述を可能としているので、それらを用いることによって、動きに関するさまざまな推論が可能となる。本稿では、演技の各瞬間を表現する言語として静的な命題論理を考え、演技の変化を捉える表現言語として、

それらの時系列を考える。これは、ALP やアクション言語への翻訳が可能であり、それらの表現系が持つ推論能力をそのまま利用することが可能であると考えられる。

4. 演技スキルの知識表現の枠組み

演技スキル表現の構成要素としては、1. 演技者が演ずべき事柄を表現する演技譜、2. 規範的な演技方法を表現する演技ルール of 表現、3. 各演技課題の遂行にとって最適なポジションを作るための調節動作、4. 演技中に満たされなければならない動作一貫性制約条件の表現、および 5. 実際の演技状態系列の表現、の 5 種類が考えられる。

第 1 の演技譜は、ダンスや楽器演奏などでの一連の演技を表現する演技課題と表情の対の系列によって与えられる。この系列は、プランニングにおけるゴールに相当するが、通常のプランニングと異なる点は、それが時系列になっている点である。

第 2 の演技ルールは、各演技課題を遂行するための規範的な演技方法を与える。各演技ルールは、各課題の説明 (課題名)、各課題を遂行するために必要な体のポジション (前提条件)、その課題の遂行によってもたらされる表情上の効果、および課題の遂行に伴う副作用 (体のポジションの状態変化) によって構成される。

第 3 の調節動作は、pre-shaping と呼ばれ、各課題の遂行に適した体のポジションを作るための動作である。これは準備動作であるが、実際には課題の遂行と並行して行われることが多い。調節動作は、調節動作の説明 (調節動作名)、各調節動作を遂行するために必要な体のポジション (前提条件)、およびその遂行に伴う副作用 (体のポジションの状態変化) によって構成される。

第 4 の動作一貫性制約条件は、演技中に満たされなければならない制約条件を与える。一貫性制約条件は、データベースの用語であり、データベースが全体として満たしていなければならない (あるいは違反してはならない) 条件を指している。ここでは、それを動作の記述に導入した。とくに、筋肉レベルでの体の使い方の不整合を防ぐことを目的として、この記述が利用される。たとえば、上腕二頭筋は肘を曲げるための筋肉であるが、上腕三頭筋は肘を伸ばすのに使われる。もし、これらの 2 つの筋肉を同時に強く活性化させると、肘関節が動かなくなってしまう。このような状況が起こるのを禁止するためのルールが動作一貫性制約条件である。

第 5 の演技状態系列は、実際の演技者による演技のされ方を記述するものである。演技状態の記述は、実際には演技ビデオの観測や演技中の生体力学的な計測データなどから得られるもので、実際の演技が規範的な演技とどう違うのかを知るのに有用な情報を提供する。すなわち、演技状態系列は、実際の演技の抽象表現と見なすことが出来る。

これら 5 つが演技スキル表現系を形成している。それ

表 1 演技スキル表現系の構成

演技スキル表現系の構成要素	各構成要素の内容
演技譜	(演技課題 + 表情) 系列
演技ルール	課題名 前提条件 表情上の効果 身体状態の変化
調節動作	調節動作名 前提条件 身体状態の変化
動作一貫性制約条件	満たすべき身体状態
演技状態系列	身体状態の変化の列

を図示すると、表 1 のようになる。

5. 演技譜の表現

演技譜は、すでに述べたように、舞踊や楽器演奏などでの一連の演技を表現する演技課題と表情要求の対の系列によって与えられる。そして、それらは、プランニングにおける一連のゴールを定める。この系列の構成要素、すなわち、各演技課題および表情要求は、楽器演奏や舞踊、ゴルフスイングなどの各種目ごとにその種別を決めなければならない。

演技を定性的に捉えると、ある時刻で瞬間的に発生する瞬時課題とある時間区間継続する連続課題に区別される。これらはそれぞれ、定性プロセスモデル [Forbus 84, 淵 93] における事象とエピソードに対応している。定性推論での定式化との違いは、我々のアプローチは、楽譜や舞踊の振り付けのような指定されたパフォーマンス系列をターゲットとして与え、それを達成するためのプロセス (動作) や装置 (人体) の制御列を生成しなければならない点である。

チェロの運弓動作を例に取ると、瞬間課題は、弓の返し、弓の停止、弓の弦への接触と離反、移弦が挙げられる。また、連続課題としては、下げ弓、あるいは上げ弓による音の連続生成がある。瞬間課題と連続課題は、交互に発生するものと考えられる。

それらの各課題の種別は、たとえば弓の返しでは、下げ弓から上げ弓への返しとその逆がある。また、それぞれが弓のどこで起こるのかによって、さらに課題の細分化がなされる。このように、一つ一つの課題を細分化したものを表 2 に示す。

この表から分かるように、運弓動作だけでも、その可能な課題の数は、瞬間課題では、弓の返し・弓の停止の 6 パターンおよび離弦・接弦の 2 パターンが移弦の 5 パターンと組み合わせるので、合計 60 通りあり、連続課題では、弓の速度から発音までの各課題の組み合わせ数の

表 2 チェロの運弓動作における演技課題

瞬間課題	
弓の返し †	弓先
	弓中央
	弓元
弓の停止 †	弓先
	弓中央
	弓元
離弦・接弦	-
移弦	同行
	隣弦上行
	隣弦下行
	離弦上行
	離弦下行

† は互いに排反。

連続課題	
弓の速度	高速
	低速
音型	単音
	引っ掛け
	二重音
	多重音
	アルペジオ
	上下繰り返し
	下上繰り返し
弓使い	下げ弓
	上げ弓
発音	レガート
	スタッカート
	スピッカート

84 通りある。

演技譜の要素の第 2 の成分である表情要求は、楽器の演奏の場合には譜面に書かれた表情記号に対応する。この表情要求は、音符の動きを楽譜通りに忠実に演奏するだけでなく、そこに書いてある表情記号を守りながら演奏することを要求している。表情も、事象と同様、瞬時表情と連続表情とがある。たとえば、スフォルツァンドは前者の例で、クレッシェンド、デクレッシェンドなどは後者の例である。また、楽譜上の表情記号の他にも、速いパッセージでは正確性を要求し、遅いパッセージでは柔らかさを要求することが多いが、これらの要求も表情要求の一種と考えられる。

プランニングで言えば、演技課題は達成すべき課題の論理的側面を表し、表情要求は美的側面を表している。

図 1, 図 2 に、演技譜の具体例を示す。図 1 は、対象となる運弓記号付きの楽譜 (ボッケリーニのロンドの冒頭) であり、図 2 は、対応する演技譜を表す。

図 1 楽譜

[1(高速上げ弓下降アルペジオスラスタックカート, p), 弓元弓返し, [2,4 高速単音下げ弓スタックカート, 弓中央離弦上行移弦弓返し, 3,5 高速重音上げ弓スタックカート] × 2, 弓元弓返し, 6 高速重音下げ弓弓元スタックカート, 弓中央離弦下行移弦弓同行, 7 高速単音下げ弓弓中央スタックカート, 弓中央離弦上行移弦弓返し, 8 高速上げ弓下降アルペジオスラスタックカート, 弓元弓返し, [9,B 高速単音下げ弓スタックカート, 離弦上行移弦弓返し, A,C 高速重音上げ弓スタックカート] × 2, 弓元弓返し, D 高速重音下げ弓スタックカート, 弓中央弓返し, E 高速上げ弓下降アルペジオスラスタックカート, …

図 2 対応する演技譜の例．表情要求が与えられていない場合時には演技課題のみが書かれている．

6. 演技ルール表現

各演技課題に対して、それを実現するための演技ルールが複数存在する．各演技ルールは、各課題の説明（課題名）、各課題を遂行するために必要な体のポジション（前提条件）、その課題の遂行によってもたらされる表情上の効果（結果表情）、および課題の遂行に伴う体のポジションの状態変化（副作用）によって構成される．演技ルールは、プランニングにおけるオペレータに相当している．その形式を以下のように定める．

【定義 1】（演技ルールの形式）演技ルールは、以下の形式を持つ：

```
op(task:<課題名>, result_expr:<結果表情>,
  body_cond:<前提条件>, side_effect:<副作用>)
```

ここで、<課題名>は、課題の種別を表す名前であり、各課題を特徴付けるパラメータの並びで表現する．<結果表情>は、その課題を遂行することによってもたらされる表情上の効果である．<前提条件>は、その課題を遂行するのに必要な体の状態の記述である．<副作用>は、その課題を遂行したことによってもたらされる体の状態の変化である．

課題名の例には「中速単音下げ弓弓元」「高速上下繰り返し下げ弓弓元」などがある．後者の課題は、弓元から弓を 2 弦に跨って高速に繰り返し振動させるように演奏する課題を表す．各課題を達成するのに適した身体各部の活性度などの条件を与えるのが、<前提条件>である．それらの条件は、命題論理のリテラルの連言によって記

述される．ここに現れる命題記号は、身体の生体力学的な状態を表現するアトムであり、生体力学的アトムと名付ける．それらは、各筋肉の活性状態、関節の硬軟、姿勢の伸び縮みなどを表す．たとえば、「高速上下繰り返し下げ弓弓元」の条件は、以下のように記述される：

体縮み ∧ 肩固定 ∧ 上腕筋中活性化 ∧ 手首先指後

また、「同行弓先弓返し」の条件は、以下のように複数存在する：

体伸び ∧ 肩固定 ∧ 腰筋活性化 ∧ 大腿筋高活性化 ∧ 肘先手首後 (1)

体伸び ∧ 肩やや柔軟 ∧ 肘固定 ∧ 上腕筋中活性化 ∧ 手首先指後 (2)

ここで、前者の連言は腰と肩を使った奏法に対応し、後者は上腕筋による奏法を表す．このような複数の条件が存在する場合、各条件ごとに個別の演技ルールを定義する．

つぎに、同じくチェロの演奏を例に、<結果表情>について考える．<結果表情>は、与えられた前提条件の下での課題の遂行によってもたらされる表情を表す．上の例で、(1) の弾き方は腰と肩を使っているの、音がしっかりしているが、柔軟性に欠ける．そのため、表情は「力強い」「音が大きい」などとなる．一方、(2) の弾き方は上腕と手首を使っているの、柔軟性に富み、しかも反応が速い．そのため、表情は「切れが良い」「正確である」などとなる．このように、1 つの課題名に対して、複数のルールが存在する可能性があるが、それは期待される表情を満足するために必要になる．

4 番目の引数である<副作用>は、当該課題を遂行したときにもたらされる生体力学的、あるいは体のポジションの変化を示す．その形式は、<前提条件>の形式と同じである．この引数は、プランニングでの「オペレータの効果」に相当する．以下に、演技ルールの具体例を示す．この例は、チェロの運弓課題「同行弓先弓返し」に対する二通りの演技ルールを示している．

ルール例 1: 腰と肩を使って弓を返す奏法

```
op(task:同行弓先弓返し, result_expr:力強い,
  body_cond:体伸び ∧ 肩固定 ∧ 腰筋活性化 ∧ 大腿筋高活性化 ∧ 肘先手首後, side_effect:)
```

ルール例 2: 上腕筋を使った手首の返しによる奏法

```
op(task:同行弓先弓返し, result_expr:正確,
  body_cond:体伸び ∧ 肩やや柔軟 ∧ 肘固定 ∧ 上腕筋中活性化 ∧ 手首先指後, side_effect:)
```

ここで、<副作用>が与えられていないときは、<前提条件>と同じであると仮定した．前提条件および副作用

に現れる生体力学的アトムの語彙を選択する問題は、機械学習における属性発見・選択問題とみなすことが出来る。適切な語彙を用いれば、各ルールは課題の演技にとって妥当なものとなるであろう。属性発見・選択問題はスキルサイエンスにとっても最も重要な問題であり、メタ認知、時系列データからの知識発見などの様々な手法が取られている。詳細については、[古川 05a, 古川 05b]を参照されたい。

演技課題系列、表情系列とも、楽譜で指示されることが多いので、通常はそれらの情報は楽譜から得られると考えてよい。しかしながら、それらは時代によって、あるいは作曲家によって大きく異なり、一般的には、時代が遡るにつれて、それらの指定は少なくなる傾向がある。また、作曲家による暗黙的な演奏スタイルの存在も知られている。そのため、これらの情報を楽譜だけから抽出することは困難である。

上述した演技課題は、ひとつの瞬間課題、あるいはひとつの連続課題を対象としていたので、基本演技課題と呼ぶことにしよう。一方、実際には、これらの基本課題を同時並行的に遂行したり、あるいは同じパターンを繰り返したりすることが良くある。そのような場合、その同時並行的複数課題、あるいは連続的複数課題を一まとめとして、新たな課題と考えたいことがある。このような課題を複合課題と呼ぶことにする。たとえば、瞬間課題は、それ自身ではあまり意味が無く、その前後の連続課題が与えられて初めて意味を持つと考えられる。たとえば、前後に上下移弦繰り返しがあったときの下げ弓から上げ弓の繰り返し、あるいは上げ弓から下げ弓の繰り返しは、大変困難な課題として知られている。そのため、このような典型的な困難な課題を選んで、そのための演技ルールを記述することは、大変意味がある。複合課題のルールは、実際には個々の要素である基本課題の記述を合成して得られる。このとき、＜前提条件＞は、要素課題の前提条件をすべて $\wedge$ で結合しなければならない。しかしながら、この組み合わせは常に上手くいくとは限らない。それは、後で述べる「一貫性制約条件」を満たさなければならないからである。

7. 調節動作の表現

調節動作は、演技課題系列を演技ルールの系列で遂行できれば不要である。しかしながら、ある演技課題から次の演技課題に移るときに、前者に対応する演技課題の副作用が後者の演技課題の遂行を邪魔する場合、すなわち、対応するすべての演技ルールの前提条件がその副作用を満たさないとき、その演技課題は遂行できなくなってしまう。この問題を解決するのが、調節動作である。

調節動作の構成要素は、調節動作の説明(調節動作名)、各調節動作を遂行するために必要な体のポジション(前提条件)、およびその遂行に伴う体のポジションの状態変

化(副作用)の3つである。これは、演技ルールの構成要素から「結果表情」を除いたものである。ルールの表現形式は、定義1に準ずる。

調節動作の具体的な例としては、弓先での下げ弓から上げ弓への弓の返しのときに、「手首先指後」の状態を作らなければならない、という状況が生じる。このとき、下げ弓の実行中に「指伸ばし」の調節動作をしなければならない。しかしながら、この調節動作自身が、その動作を実行するための＜前提条件＞があるので、それが同時に実行している演技課題の遂行の＜前提条件＞、あるいは＜副作用＞に違反してはならない、という厄介な問題が生じる。すなわち、演技のための最適な方法を探すためには、関連する前後の演技、および、調節課題の実行の可能性も考えて決める必要がある。

調節動作に関連して、興味のある体のポジションにニュートラルポジションがある。これは、あるピオラ奏者による提案であるが、楽譜上にニュートラルポジションを取るべき場所を決めておき、そこでそのポジションを取るようにする。ニュートラルポジションはリラックスして、しかも体の伸びた状態であり、その状態から他のどんな状態への移行もがスムーズに行えるのがその特徴である。もし、ニュートラル状態を取るべき場所が決まれば、上に述べたようなプランニングでの矛盾の回避の問題も、そのプランを作る課題列が短くなり、問題の解決が容易になる。

表3に、チェロ演奏の場合の調節動作の一覧を示す。

8. 動作一貫性制約条件の表現

植野等[Ueno 00]は、スキルの達成のためには、動作に関する動作一貫性制約条件を満たさなければならないことを指摘した。一貫性制約条件は、もともとデータベースにおいて定義された概念であり、データベース中のすべてのデータが満たすべき条件のことを指している。植野等は、その概念をスキルのドメインに応用した。動作一貫性制約条件違反は、複合課題で起きる事もあれば、継続した課題同士の組み合わせで起きる事もある。複合課題での動作一貫性制約条件は、その構成要素である異なった基本課題に含まれるリテラル間での制約条件違反を表現する。たとえば、高速移弦の課題は、そのルールの前提条件で上腕筋でのインピーダンスを弱くすることを要求しているが、もし弓の返しの課題が同時に存在したなら、そこでは上腕筋のインピーダンスを強めにしなければならないとすると、この2つの課題は、お互いに制約条件違反を起こすことになる。これは、主動筋と拮抗筋の強い共起がその原因となる。また、制約条件違反は腰筋と指筋のように、遠く離れた筋肉同士の間にも発生する。たとえば、課題が指の柔軟な状態を要求している場合に、腰筋によって連動して指筋が活性化してしまう場合、このような制約条件違反が発生する。このよう

表 3 チェロの運弓動作における調節動作

	ゴール	前提条件	副作用
体幹の伸ばし	体幹の伸縮状態を伸ばし状態にする	背筋のインピーダンスが過度に強くない	背筋のインピーダンスが強まる
体幹の縮め	体幹の伸縮状態を縮め状態にする	背筋のインピーダンスが過度に強くない	背筋のインピーダンスが弱まる
指の伸ばし	指を伸ばして手首前指後の状態を作る	前腕のインピーダンスが過度に強くない	前腕のインピーダンスが強まる
左の背筋の弛緩	左の背筋の過度な緊張をほぐし、左手のポジション移動に備える	右背筋のインピーダンスが過度に強くない	右背筋のインピーダンスが強まる
重心の移動	弓の返しより早い位相で重心を移動させる。これによって、重心の動きで弓を引っ張る	動かす方向の足を突っ張らない	逆足のインピーダンスが強まる

な離れた筋肉同士の共活性化は、体のバランスを取るなどの理由によって発生することがある。また、同時刻ではないが、継続して発生する課題間の遷移の過程で、制約条件違反を起こすことがある。

制約条件には、上に述べた筋肉の活性箇所に関するもの他に、インピーダンス調節に関するもの、姿勢に関するもの、弓の軌跡に関するもの、および時間制約がある。各個人で、どのような不必要な筋肉間の共活性化が起こるかをすることは、その人の悪い演奏の原因を探る意味で重要である。

動作一貫性制約条件の表現には、ヘッド部を持たないホーン節を用いる。この表現は、そのルールの前提部の生体力学的アトムが同時に成り立ってはならないことを示す。たとえば、上腕二頭筋と上腕三頭筋の同時高活性化を制約するためのルールは、

← 上腕二頭筋高活性化 ∧ 上腕三頭筋高活性化

のように表される。

動作一貫性制約条件の中には、必ず満たさなければならない制約条件と、満たしたほうが望ましい制約条件と

が存在する。たとえば、上記のような筋肉の使用に関する不整合は起きてはならないが、それらが時間的にずれがあり、調節動作によって回避できる場合には、必ずしも満たす必要はない。また、表情要求を満たさないような演技法を選ぶ場合、他に選択の余地がない場合には、そのような制約条件は、無視してよい。前者の制約条件を強制制約条件と呼び、後者を弱制約条件と呼ぶ。これらの2種類の制約条件を考慮するためには、モデルの選好を扱える非単調論理の枠組みが必要である。非単調論理は、一般には計算量が大きく、現実問題には使えないと考えられているが、後述する発想制約論理プログラミング (Abductive Constraint Logic Programming, ACLP) の枠組みは、多くの問題に対して効率の良い処理系を実現している [Kakas 00]。我々は、ACLP に基づく処理系の実現を計画している。

9. 演技状態の表現

演技課題の表現は、指定された演技を遂行するのに適した体の動かし方を与える。ところが、初心者がこのような理想的な体の動きが出来るわけではなく、実際の動きはそれとは異なると予想される。そのような状況に対処するために、我々は実際の演技の表現として演技状態列を導入する。演技状態列は、演技状態の系列であり、各演技状態は演技者による演技のある瞬間あるいは区間での状態を表す論理表現である。我々は事象を表現するために用いた体伸び、肩柔軟、腰筋活性化などの生体力学的状態を表すリテラルの連言によって演奏状態を表現する。与えられた演技課題についての事象列に付随する条件部と対応する演技状態の相違は、各演技者の個人的な癖や欠陥を表す。

各演技者の各試行に対して、1つの演技状態時系列が対応する。これらの表現は、演技データを解析して得られる。問題は、演技状態時系列データのセグメンテーションと、演技状態集合の抽出である。演技状態は、課題よりも種類が多いと考えられ、最悪で、課題に現れるリテラルの矛盾しないすべての連言から成る巾集合 (power set) となる。演技状態時系列は、課題の時系列と比較され、演技者の演技の診断がなされる。

10. 演技スキル表現の生成

5章から9章にわたって述べてきた演技スキル表現をどのように生成するかが大きな問題である。本章では、各構成要素について、その生成方法を考察する。

演技譜は、たとえば楽器の演奏では、主として楽譜からそれらの情報が得られる。舞踊の場合、3章で紹介した Labanotation から演技譜を抽出することが可能であろう。しかし、それだけで不十分な場合には、それを補うのは演技者、あるいは演技指導者の役割である。オー

ケストラの場合、それは指揮者の役割であろう。とくに表情要求は、指揮者が独自の指示を与えることも多い。

演技ルールに関しては、熟達者の自己分析からルールを作っていくのが、第1の方法である。しかし、演技ルールの多様性を考えると、その方法で完全なルールセットを作れる保証はない。第2は、熟達者の実際の演技を計測し、その生体力学的時系列データから演技ルールを自動抽出する、という方法である。

時系列データから演技ルールを自動抽出するためには、いくつかの問題を解決しなければならない。第1は、時系列データのセグメンテーションである。すなわち、時系列データのどの部分がどの演技課題に対応しているのかの区分けを行わなければならない。高野等 [高野 05] は、ロボットにいくつかの課題を連続して行わせ、その動作をモーションキャプチャリングシステムで観測し、その観測データからセグメンテーションを行う手法を開発した。その手法は、演技譜に従った一般の演技についても、適用できるものと考えられる。また、演技譜が与えられていれば、セグメンテーションの際に、課題の系列の情報を利用したより効率の良いアルゴリズムの構築が期待できる。一方、困難な問題もある。それは、複合課題の扱いである。とくに、複数の課題が同時並行的に行われる場合、そのセグメンテーションは新たな手法を必要とすると考えられる。

セグメンテーションで切り出された各部分に対して、主として運動力学的なデータから、演技ルールを抽出しなければならない。そのための特徴抽出を行うアルゴリズムとしては、音声認識における隠れマルコフモデルや、時間軸上の伸縮を許したマッチングを行う Dynamic Time Warping (DTW) などが知られているが、多変量時系列データに対してそれらのアルゴリズムを適用することは容易ではない。一方、麻生等 [Asoh 05] は、ダイナミックベイジアンネットワークを解くアルゴリズムとして知られている Particle Filter Algorithm を用いて、複数のマイクロフォンと画像データから移動話者の場所を推定する問題を解いている。

ここでは、モーションキャプチャリングデータから得られる肩、肘、手首などの種々の回転角および角速度、筋電計からの各筋肉の活性度、床反力系からの重心位置などの複数のデータから、現在の演奏状態を推定する問題を上記のアルゴリズムを用いて解くことが出来ないか、その可能性を検討中である。

調節動作の自動抽出は、原理的には演技ルールと同様、演技中の生体力学的時系列データからの自動抽出が望ましいが、それは演技ルールと不可分なので、それ自身を取り出すことは不可能である。そのため、調節動作は、熟達者の自己分析からあらかじめ与えてしまうのが適切である。こうすれば、演技ルールの構築の際に、調節動作の部分を差し引くことが可能になるであろう。

動作一貫性制約条件の自動抽出は興味のある問題であ

る。これは、熟達者が演技中に守っている制約条件を見出すことになるが、この問題に対しては、演技データの全体的な性質を抽出することが必要になる。そのため、記述的学習手法が適していると考えられる。また、複数の生体力学的アトム間などの満たすべき条件を抽出しなければならないので、とくに Claudien [De Raedt 97] などの記述的帰納論理プログラミングシステムの利用が有効であると考えられる。

演技状態列の自動抽出は、手法的には演技ルールの自動抽出とほぼ同じと考えられる。異なる点は、たとえば初心者演技の場合、それは必ずしも演技譜どおり進められないので、演技譜の参照には、工夫を要する。

11. 演技スキル表現系に基くプランニング

演技スキル表現系は、直接的な応用としては、与えられた演技課題を遂行するための動作系列のプランニングが考えられる。与えられたゴールを達成するためのプランを自動的に求めるプランニングの研究は、古典的な人工知能の問題である。よく知られている手法には、STRIPS [Fikes 71] がある。ここでのプランニング問題は、一般的なプランニング問題と異なる点がある。それは、課題自身が複数の副課題の系列として与えられているので、プランニング自身、副プランニング問題の系列として定義される。また、ここでは、各副プランニング問題でのゴールは、与えられた課題列に含まれる表情要求によって定義される。さらに、本演技スキル表現系の構成要素の1つである動作一貫性制約条件は、プランニングにおいて枝刈りのための情報として利用することが出来る。与えられた動作一貫性制約条件を満たさない計画は不適切な計画であり、そのような可能性は除去されるべきである。

ここでのプランニングにおいて、最も困難な問題は、ルール集合の完全性の要求、およびルールの前提条件を満たすための状態記述の完全性への要求である。しかしながら、それらを記述し尽くすのは困難であり、事実上不可能である。ルール集合の完全性の問題は、中々困難な問題であるが、我々の提案に含まれる調節動作を強化することにより、この問題の解決は図れると思われる。一方、状態記述の完全性については、近年、この問題に対して、発想論理プログラミング (Abductive Logic Programming, ALP) の枠組み [Kakas 93, Kakas 98] を用いた形式化として、発想プランニング (Abductive Planning) が提唱され、不完全な状態の記述を不完全な述語 (abducible predicate) を導入した発想推論で補う方法が提案されている。また、実際にこの枠組みを使ってロボットのプランニングへの応用なども行われている [Shanahan 98]。ALP、あるいはそれを拡張した発想制約論理プログラミング (Abductive Constraint Logic Programming, ACLP) [Kakas 00] は一貫性制約条件および不完全な述語の扱いが可能であり、我々の枠組みとの適合性が高い。本研究では、プランニ

グシステムの検討は今後の課題であるが、実用化を目指す観点から、本アプローチの有効性は高い。

12. お わ り に

本稿では、演技譜が与えられているときにその中に現れる各演技課題を遂行するのに必要とされるスキルを表現するための演技スキル表現系を提案した。本スキル表現系を与えることにより、従来取り上げられてきたスキルに関する様々な問題が共通言語で表現できるようになると考えられる。すなわち、本表現系は演技スキル研究のプラットフォームを提供することになる。それらの問題の例は、多変量時系列データからのスキルの自動抽出、属性発見・選択問題、個人差の問題などである。

最後に、本研究の今後の課題について述べる。第1に、ここで提案した表現系の具体化を進める予定である。本表現系は、演技スキルの個々の要素と、それらを利用する処理系とからなる。個々の要素は、対象によって異なるが、チェロの運弓動作だけを取り上げても膨大なものとなると予想されるが、問題を限定して、サブセットを切り出し、その実現を図る予定である。取り上げる問題としては、熟達者によって指摘された、一見簡単ように見えて実は厄介な課題を考えている。また、処理系については、ALPに基づくプランニングシステムを中心にその開発を進める予定である。

第2に、本表現系の基礎になっている命題論理を述語論理に拡張することを考えている。それは必ずしも命題論理では記述し切れない問題があるという訳ではないが、たとえば動作一貫性制約条件などの記述を「主動筋と拮抗筋の同時強活動を禁じる」といった一般規則での表現を行いたいからである。また、ALPの利用は、これらの拡張を許すものである。

第3に、本表現系に含めるべき要素として、時間制約を考えたい。時間制約とは、ある課題なり調節動作なりを遂行するのに要する時間のことであり、実際に高度なスキルになるにしたがって、その役割は重要になってくる。時間制約を除いて、与えられた課題をゆっくりこなしても、それは高度なスキルを実現しているとはいえない。音楽の演奏の場合、時間制約は演奏する曲のテンポとも関連してくる。特に困難な課題は、速いテンポの部分であり、その意味でも時間制約は重要である。

第4に、本スキル表現系の他分野への応用について考えたい。本論文で取り上げたチェロの運弓動作は、その中にスキルを構成する様々な要素を含んでいるので、ここで提案した演技スキル表現系自身、その表現できる範囲は充分広いと考えられる。しかしながら、本論文で提案している演技スキル表現系は、すでに述べたように、あらかじめ楽譜や振り付けが与えられているようなクローズドスキルを対象としており、たとえばサッカーのような、対応すべき状況が著しく多様で、その影響が強いオー

プンスキルを充分に表現することは出来ない。また、たとえクローズドスキルであっても、対象が異なれば、その対象ごとにスキルを記述する別個の属性を必要とする。また、スポーツを対象とする場合、表情要求が速さ、強さ、正確さなどに限定されてしまい、プランニングにおけるゴールの性質が、チェロ演奏のような美的な要素が重要である場合と大きく異なる。それらの違いが、表現系にどのように影響してくるかを考察するのも、今後の課題である。

より大きな問題としては、脳の運動プログラムとの関係がある。とくに、反射運動は、高度なスキルの実現に深く関与していると考えられているが、それを直接証明した研究成果は得られていない。そのためには脳神経系による筋肉の活動制御が問題となるが、現在に至るまで、そのレベルでの計測技術が確立されていない。一方、脳の運動モデルの研究、すなわちヒトがどのようにして運動を行っているのかの解明も進められている。そこでの主要なアプローチは、ニューラルネットワーク、あるいはHMMでの最適パラメータの学習問題としての形式化である。これらの研究のターゲットは、我々の研究に類似しており、手法的にも、とくに信号レベルの処理では共通する点も多い。それらの研究と我々の研究の最も異なる点は、第1に前者が脳神経レベルでのモデル化を目指しているが、我々の研究はよりマクロな筋骨格レベルのモデル化を目指している点であり、第2に得られたモデルの可読性の差異である。モデル化のレベルの差を考慮して、我々が目指している筋骨格レベルでの演技スキル表現系の下部に、より詳細な脳神経レベルでの表現系を位置づけることは可能である。しかしながら、その2つの層の間の関連付けは未知の研究領域に属し、その追求は今後の研究課題である。

我々の目的は、身体知の解明であり、言語化である。そのため、ニューラルネットワーク、あるいはHMMでの動作のパラメータ表現は、我々の目的にそぐわない。しかし、この点においても、最近、これら両者のアプローチを統合する新たな枠組みが提案されている [Zelezny 05]。それは、機械学習において、分類精度と可読性を両立させることを目的としており、まずニューラルネットワークやHMM、あるいはサポートベクタマシンのように分類精度は優れてはいるがブラックボックスとして働く分類器を構築して、その分類器を入力としてそれとほぼ等価な可読性の高い述語論理に基づく分類器を構築する、というものである。このようなアプローチも念頭において、本研究を進めていきたい。

謝 辞

本論文の執筆に当たり、東京大学大学院情報理工学系研究科中村研究室の高野渉氏には、同氏のご研究についての詳細なご教示を頂いた。また、国立情報学研究所の佐藤健教授、井上克己教授には、発想プランニングについ

での有益な示唆を頂いた。この場をお借りして、深く感謝いたします。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Asoh 05] Asoh, H., Asano, F., Yamamoto, K.: Tracking human speech events using particle filters, Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP 2005), II-1153-1156 (2005)
- [De Raedt 97] De Raedt, L. and Dehaspe, L.: Clausal discovery, Machine Learning, Vol.26, pp.99-146 (1997)
- [Fikes 71] Fikes, R. E. and Nilsson, N. J.: Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving, Artificial Intelligence, Vol.2, pp.189-208 (1971)
- [Forbus 84] Forbus, K.D.: Qualitative Process Theory, Artificial Intelligence, Vol.24, pp.85-168 (1984)
- [古川 03] 古川康一, 植野研, 五十嵐創, 森田想平, 尾崎知伸, 玉川直世: 身体知の解明を目指して, 第 17 回人工知能学会全国大会, 3D5-01 (2003)
- [古川 05a] 古川康一, 尾崎知伸, 植野研: 身体知解明へのアプローチ, 第 19 回人工知能学会全国大会, 2B1-01 (2005)
- [古川 05b] 古川康一, 植野研: AI とスキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol.20, No.5, pp.510-517 (2005)
- [Furukawa 05] Furukawa, K., Kinjo, K., Shimizu, S., Sawai, K., Yoshinaga, S.: On Modeling Bow Arm Movement in Cello Playing by Whip Motion, Proceedings of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference (EM-BEC'05), Prague (2005)
- [淵 93] 淵一博 (監訳): 人工知能ハンドブック, 第 4 巻, 共立出版, pp.439-451 (1993)
- [Gelfond 93] Gelfond M. and Lifschitz V.: Representing action and change by logic programs, Journal of Logic Programming, Vol. 17, pp.301-321 (1993)
- [Inoue 05] Inoue, K., Bando, H., and Nabeshima, H.: Inducing Calusal Laws by Regular Inference, In Kramer, S., and Pfahringer, B., Inductive Logic Programming, LNAI 3625, pp.154-171 (2005)
- [IPC 05] IPC (IntelligentPad Consortium) : URL <http://www.pads.or.jp/> (2005.08.04)
- [Kakas 93] Kakas, A. C., Kowalski, R. A., Toni, F.: Abductive logic programming, Journal of Logic and Computation, Vol.2, No.6, pp.719-770 (1993)
- [Kakas 98] Kakas, A. C., Kowalski, R. A. and Toni, F.: The role of abduction in logic programming, In D. M. Gabbay, C. J. Hogger, and J. A. Robinson, editors, Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming, Vol. 5, pp. 235-324 (1998)
- [Kakas 00] Kakas, A. C., Michael, A. and Mourlas, C.: ACLP: Abductive constraint logic programming, Journal of Logic Programming, Vol.44, pp.129-177 (2000)
- [McMillen 03] McMillen T. and Goriely A.: Whip Wave, Physica D: Nonlinear Phenomena, Vol. 184, Issues 1-4, pp.192-225 (2003)
- [中村 01a] 中村美奈子: 舞踊記譜法 用途, 歴史, 分類, そして応用, アート・リサーチセンター紀要, Vol.1 (2001)
- [中村 01b] 中村美奈子, 山川誠, 八村広三郎: 舞踊記譜法 Labanotation とモーションキャプチャを用いた舞踊教育のためのマルチメディア教材の開発, 情報処理学会研究報告, 人文科学とコンピュータ 50-5, No.51, pp.33-40 (2001)
- [中澤 04] 中澤篤志, 中岡慎一郎, 白鳥貴亮, 工藤俊亮, 池内克史: モーションキャプチャによる全身運動解析と模倣ロボット-「じょんがら」節を HRP-1S に踊らせる-, 情報処理学会研究報告, コンピュータビジョンとイメージメディア 146-5, No.113 (2004)
- [Poulton 57] Poulton, E. C.: On prediction in skilled movements, Psychological Bulletin, Vol. 54, pp.467-478 (1957)
- [Shanahan 98] Shanahan, M.: Reinventing Shakey, Working Notes of the 1998 AAAI Fall Symposium on Cognitive Robotics, pp.125-135 (1998)
- [高木 96] 高木龍也, 岡田義広, 田中譲: 記号による記述を用い

た身体モデルの動作制御, 情報処理学会研究報告, グラフィックスと CAD 81-9, No.77, pp.49-54 (1996)

- [高野 05] 高野渉, 中村仁彦: 統計的相関に基づく動作パターンの分節化手法, 第 19 回人工知能学会全国大会, 3F1-02 (2005)
- [Ueno 00] Ueno K., Furukawa K., and Bain M.: Motor Skill as Dynamic Constraint Satisfaction, Electronic Transactions on Artificial Intelligence, Vol. 4, Section B, pp.83-96 (2000)
- [植野 05] 植野研, 古川康一: ピークタイミングシナジーによる動作スキル理解, 人工知能学会論文誌, Vol.20, No.3, pp.237-246 (2005)
- [八村 01] 八村広三郎, 中村美奈子: モーションキャプチャデータから舞踊譜 Labanotation の生成, 情報処理学会研究報告, コンピュータビジョンとイメージメディア 128-14, No.66 (2001)
- [吉田 98] 吉田康行, 松岡洋介, 八村広三郎: 舞踊譜 Labanotation に基づく身体運動の処理 譜面読取り LabanReader と譜面エディタ LabanEditor, 情報処理学会研究報告, 人文科学とコンピュータ 38-6, No.51 (1998)
- [Zelezny 05] Zelezny F., Tolar J., Lavrac N., Stepankova O.: Relational Subgroup Discovery for Gene Expression Data Mining, Proceedings of the 3rd European Medical and Biological Engineering Conference (EM-BEC'05) (2005)
- [Zhao 04] Zhao L., Norman I. B.: Acquiring and validating motion qualities from live limb gestures, Graphical Models, Vol.67, pp.1-16 (2004)

〔担当委員: 阿部 明典〕

2005 年 9 月 18 日 受理

著 者 紹 介

古川 康一(正会員)

1965 年東京大学工学部計数工学科卒業。1967 年同大学院修士課程(計数工学)修了。同年,電気試験所入所。1982 年(財)新世代コンピュータ技術開発機構へ出向。1992 年慶應義塾大学環境情報学部教授,1994 年より同大学大学院政策・メディア研究科教授。工学博士。この間,人工知能言語,論理プログラミング,帰納論理プログラミング,暗黙知の言語化などの研究に従事。情報処理学会,日本ソフトウェア科学会,日本認知科学会,バイオメカニズム学会,

各会員。

清水 聡史

慶應義塾大学環境情報学部在籍。バイオリン演奏時のスキルに興味を持つ。情報処理学会学生会員。

吉永 早織

慶應義塾大学環境情報学部在籍。組織内における知識共有に興味を持つ。