

スキルサイエンスの展開 Development of Skill Science

古川康一
Koichi Furukawa

慶応義塾大学大学院政策・メディア研究科
Graduate School of Media and Governance, Keio University

Four years have passed since we launched a Challenge-for-Realizing-Early-Profits on “Elucidation of Physical Skill”. Until this point, we mainly focused on closed skill and we conducted our research on physical skill elucidation from both kinematics and kinetics points of view. Especially we studied on the extraction of the skill rules from biomechanical data, on the discovery or selection of key attributes by means of meta cognition, and on building mechanical models to explain several typical body movements for achieving given tasks. Furthermore, we have currently been developing a performance skill representation framework. Our future plans are to develop a support system for skill acquisition and even new playing methods for given hard tasks by adopting such advanced tools as abductive and/or inductive logic programming. We also plan to reformulate the attributes discovery/selection problem in terms of these new frameworks. Furthermore, we want to proceed toward the elucidation of open skill.

1. はじめに

楽器の演奏やダンス、スポーツなどの、与えられた課題をこなすことのできるスムーズな体の動かし方を我々は演技スキルと呼ぶことにする。演技スキルを獲得するためには、長期にわたる基礎的な訓練が必要である。そのような演技スキルは、言葉では容易に表現できない。しかしながら、演技スキルの言葉による表現はスキルの解明にとって本質的である。それは、各演技者が訓練によって会得したスキルをより確固としたものにするためにも、あるいは第三者へスキルを伝達するためにも有用であり、また、スキルをより客観的なルールとするためにも有用である。このようなスキルの言語化を追求するために、我々はこれまでにチェロの右手の動きに着目して、定性的な力学モデルの開発、メタ認知による着眼点の発見とスキルのルール化、計測データを対象としたデータマイニングによる動きの傾向の把握などを試みてきた[古川 03, 05a,05b, Furukawa 05, Ueno 00, 植野 05]。中でも演技スキルの形式的な表現は、その中心的な課題である[古川 06]。演技スキルを形式的に表現することによって得られるものとしては、上述した個人々人にとってのスキルの固定化、あるいは第三者へのスキルの伝達のほかに、与えられた課題をこなすための一連の動作列を自動的に求めるプログラミングや、与えられた課題をこなすのに必要とする基本動作(プログラミング問題でのオペレータ)が欠落している場合の発想推論による新たな基本動作の提案なども、この枠組みの中で形式化が可能である。

ここで、対象とするスキルを、クローズドスキルとオープンスキルという二つのカテゴリーに分類する[Poulton 57]。クローズドスキルは、一定の環境の下で与えられた基本課題をこなすための基本技を意味する。テニスのフォアストローク、バックストローク、サービスなどは、クローズドスキルにおける基本技の例である。チェロ演奏における開放弦でのロングトーン、弓の返し、スタッカート、移弦などもそのような基本技の例である。一方、オープ

ンスキルは、不確定で変化する環境の下でのスキルである。オープンスキルは、相手がいる場合に、とくに必要とされる技で、テニスにおける相手の動きを読んだ返球や、室内楽やオーケストラでのアンサンブルがその例である。我々は、主としてクローズドスキルを対象として、スキル表現系を考える。それは、オープンスキルの実現がクローズドスキルを前提としていることと、クローズドスキルの延長線上にオープンスキルの表現系を設定することが出来ると考えているからである。

スキルの表現にとって重要なもう一つの側面は、表現レベルの設定である。表現レベルとしては、脳神経系レベルと筋骨格系レベルの二つが考えられる。脳神経系レベルの表現では、脳の運動プログラムの構築、その起動による運動指令パルス列の生成、神経系による運動指令の伝達、神経反射回路の利用などを扱わなければ成らない。一方、筋骨格レベルでは、姿勢のとり方、各筋肉の使い方などが表現対象となる。筋骨格レベルは、さらに運動学をベースにした静的な表現と運動力学を加味した動的な表現に分けられる。本論文では、動的な表現を含んだ筋骨格系レベルを扱う。脳神経系レベルの表現を取り上げなかった理由は、その解明が十分に進んでいないことと、スキルの言語化にとって、脳神経系での制御パルスレベルの表現は詳細すぎると考えたからである。しかし、反射運動や誤信号伝達の問題など、脳神経系レベルの現象でスキルに直接関連した問題が存在することもよく知られており、これらは演技スキル表現系に含めるべきものである。

筋骨格系レベルでの静的表現と動的表現に関しては、前者が動きの途中での静止点に着目して、そのスナップショットを記述し、それらを並べることによって、動き全体を記述しているのに対して、我々のとった後者のアプローチは、各動きを起こさせる筋肉群の働きに注目している。また、動きに着目して、身体の各部分の動きの速度、加速度などを記述の対象にしている。

別の分類としては、制御信号や姿勢のとり方の定量的な指定と定性的な指定の二つが考えられる。前者はより精度の高い表現が得られるのでロボットの制御などに直接応用することが出来る反面、その表現は関数表現であったり、数値系列であったりするので、その直感的な意味を把握することは困難である。一方、後者はその逆で、精度が悪く、ロボットの制御には直接使えないが、直感的な理解は容易である。我々は、演技スキル表現系の目的により合致するアプローチとして、後者を選んだ。

本論文の構成は、以下の通りである。第 2 章では、我々の提案する演技スキル表現系の概要を与える。第 3 章では、本演技スキル表現系のプランニングへの応用について概説する。第 4 章では、まとめと今後の課題について述べる。

2. 演技スキル表現系の概要

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の表現、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。以下に、それぞれの構成要素について概説する。なお、これらのより詳細な記述は、[古川 06]を参照されたい。

2.1 演技譜

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組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。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[Forbus84, 淵 93]における事象とエピソードに対応している。チェロの運弓動作を例にとると、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。

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。

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。

2.2 演技ルール

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)、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)、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)、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。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。

<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。

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、条件ごとに個別の演技ルールを定義する。

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。

2.3 調節動作

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。調節動作は、プランニングにとって厄介である。それは、上に述べたように、実際の課題の遂行と並行して行われることが多いからである。すなわち、プランニング自身も並行動作を求めなければならない。

2.4 動作一貫性制約条件

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[Ueno 00]。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。

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、そのルール的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、主働筋と拮抗筋の強い共起がその原因となる。

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知ることは、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、そのルール的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。

2.5 演技状態系列

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。

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。

3. プラニング言語としての演技スキル表現系

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[Fikes71]がある。ここでのプラニング問題は、一般的なプラ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、プラニング自身、副プラ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。

3.1 不完全なルール集合上でのプラニング

ここでのプラニングにおいて、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。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[Kakas93, Kakas98]を用いた形式化として発想プラニング(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ニングへの応用なども行われている[Shanahan98]。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)[Kakas00]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、プラニン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。

一方、ルール集合の完全性の問題は、より困難な問題である。この問題は通常のプランニングシステムでは扱えない。この問題を解決することの出来る方法は、二通り考えられる。第1は、我々の提案に含まれる調節動作を利用して、ニュートラルポジションへ移行する方法である。こうすれば、状況ごとに異なるルールを用意する必要がなくなり、ルール集合の完全性を達成することが容易になる。

第2の方法は、状況に応じて必要となる演技ルールを発想的帰納推論によって求める方法である。代表的な帰納論理プログラミングシステム(Inductive Logic Programming System, ILP)である Progol では、背景知識と一つの正例からその正例を説明できる仮説を生成し、その後にはほかの例を当てることによって仮説の有効性の確認を行っている。すなわち、適当な背景知識があれば、ILP を利用して欠落しているルールを帰納推論することが可能である。

4. 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、一見簡単の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、「主働筋と拮抗筋の同時強活性化を禁じる」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、主として、あらかじめ楽譜や振り付けが与えられているような、いわゆる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、いわゆるオープンスキルを十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。

第 5 に、新たなトレーニング法や、新たな奏法の開発への応用が考えられる。新たなトレーニング法の開発は、課題の困難性が動作一貫性制約条件に起因していることを考え、とくに複数の制約条件が重なっている場合に、制約条件を緩めた複数の課題に分割してトレーニングを進めるような方法が考えられる。このようなトレーニング法を自動的に作り出すことも可能であろう。より挑戦的なテーマは、与えられた困難な課題を遂行するための新たな奏法の開発である。この問題は、プランニングにおいて新たなルールを生成することに関連している。探索空間を如何に絞り込んで妥当なルールを提案できるかが鍵となるであろう。

第 6 に、複数のルールが競合する場合に、それらを統合する方法を考えたい。複合動作での動作一貫性制約条件違反を避ける方法としては、従来は制約条件違反を起こさないような個別タスクの実行方法を考える、という方策を考えたが、ここではさらに根本的な処方として、競合関係にある二つのルール自身を統合し、より汎用性の高い、両動作に適応可能なルールを導き出す方法を考える。

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。また、誤信号伝達の問題は、アマチュアの陥りやすい、滑らかさを欠いた演奏を引き起こす大きな原因と考えられるが、そのメカニズムと、回避の方法を追求するのは、今後の課題である。それらの問題を解決する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 つの層の間に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。

参考文献

- [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)

- [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)
- [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 (EMBEC'05)*, Prague (2005)
- [古川 06] 古川康一, 清水聡, 吉永早織, 演技スキル表現系について, *人工知能学会論文誌*, Vol. 21, No. 2, SP-A (2006)
- [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.
- [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)
- [Poulton 57] Poulton, E. C.: On prediction in skilled movements, *Psychological Bulletin*, Vol. 54, pp.467-478 (1957)
- [Ueno 00] Ken Ueno, Koichi Furukawa, and Michael Bain: Motor Skill as Dynamic Constraint Satisfaction, *Electronic Transactions on Artificial Intelligence*, Vol. 4, Section B, 83-96, December 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)