

スキルサイエンスの展望 Prospect 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

This year is the last year of five-years Challenge-for-Realizing-Early-Profits program on “Elucidation of Physical Skill”. Until this point, we conducted rather fundamental research on such issues as extraction of physical skills from biomechanical data, development of mechanical models for typical skillful motion, development of performance representation framework, and so on. As a result, we succeeded in establishing basis for developing practical realization such as skill discovery support technologies based on meta cognition and/or mechanical models, skill diagnosis technologies based on abductive inference and so on. This paper gives prospect of skill science aiming at practical realization and contribution to society.

1. はじめに

スキルの解明は、困難であることが知られている。その第1の理由は、自由度が多すぎることである。手のある目的の場所に持っていき単純な到達運動を考えてみても、そのやり方には多くの可能性があることが知られている。これはベルンシュタイン問題として知られている古典的な問題である[Bernstein67]。その多様性の一つは、運動の軌跡の多様性である。スタート地点からゴール地点に到達する軌跡は、無限の多様性がある。仮にその一つを決めたとしても、肘や手首の軌跡の多様性が残る。さらにこれを固定したとしても、筋肉の使い方の多様性が存在する。このような問題は、不良設定問題としても知られている。

スキルの解明が困難である第2の理由は、スキルの暗黙性である。熟達者は、彼らがどうして上手く弾けるのかを説明することが出来ないし、スランプからどのようにして脱却すればよいのかも分からない。スキルの暗黙性は、スキル自身が練習の繰り返しによって脳内にその運動固有の運動プログラムが作られ、体を制御する過程に思考プロセスが関与出来なくなるからであろう。一方、初心者が熟達者の演奏を見ても、その本質を掴むのが困難である。その理由は、ベルンシュタイン問題で出てきた最後の多様性、すなわち筋肉の使い方の多様性が存在し、見ただけではその解が容易に分からないからである。

第3の困難性の理由は、スキルの文脈依存性である。一つの課題、たとえば弓の返しを考えてみても、その方法は多種多様である。その中から最良な制御を選ばなければならないが、それは、その場面での音楽的な要請、あるいは同時に達成しなければならないほかの課題の影響も受ける。そのため、各課題を達成するためのスキルが、色々なものの影響を受けることになり、それらの文脈ごとにスキルを用意しなければならないことになる。この問題は、ベルンシュタインが指摘している、環境によってもたらされる困難性の問題である。

第4に、最適な制御を実現する際の個人差の問題がある。体格、筋力、柔軟性、あるいはスキルレベルによって、そのような

個人差が生まれると予想される。さらには、流派によって演奏法が異なる、という問題もある。スキルの解明にとって、この個人差、あるいは流派差の問題は、大きな障害となる。この問題も、環境によってもたらされる困難性の1つである。ベルンシュタインは、シナジーによる運動制御、すなわち反復練習により複数の筋肉の協調動作を習得することによって、人はベルンシュタイン問題を回避している、と主張している[Bernstein67]。

我々は身体知の解明を通して、このような困難な問題を解決することを目指してきた。その結果、いくつかの有望なアプローチが見えてきた。それらは、時系列データマイニングによる生体力学的データからの有用なスキルルールの抽出、力学モデルおよびメタ認知によるスキル創造支援、発想推論に基づくスキル診断技術などである。

以下に、これらのアプローチについて、順次述べる。

2. 時系列マイニングによるスキルルールの抽出

職業演奏家の演奏データからそのスキルが自動的に抽出できれば、スキルの解明に大きく前進すると期待できる。そのような目標を掲げて、我々はデータマイニングによるスキルの自動抽出法を探っている。手掛かりとなるデータは、モーションキャプチャリングシステムによる動きのデータ、筋電計による各筋肉の活動状況を示すデータ、床反力系による重心の移動軌跡のデータなどである。これらのデータの特徴は、それらがすべて時系列データである、という点である。時系列データマイニングは、新しい研究分野であり、これからの成果を期待するところであるが、我々はいくつかのアルゴリズムを開発した。そのうち、ここでは2つを紹介しよう。

2.1 ピークタイミングシナジー抽出アルゴリズム

シナジーとは、複数の筋活動または関節運動がタイムラグを伴って協調しながら動く一連の動作を意味する。このようなシナジーは、高度なスキルを獲得した熟達者に良く見られる現象である。植野[植野 05]は、複数の時系列間のピーク値が起こるタイミングに着目して、このようなパターンを抽出するアルゴリズムPRESTOを開発した。PRESTOの考え方は、はじめに系列ごとにピーク値の時系列を抽出し、つぎに、複数の系列間から頻出時系列パターンを抽出する手法によって頻出ピークタイミング系列、すなわちピークタイミングシナジーを抽出する、というもので

ある。植野は、PRESTO を用いて実際にチェロの熟達者のデータから、手首→肘屈伸→上腕回旋と、三角筋中部繊維束→(三角筋後部、上腕三頭筋)の二通りのシナジーが同時に発生していることを確かめた。

2.2 課題固有な筋活動パターンの抽出アルゴリズム

与えられた課題を遂行する動作は、定常的な動作の連続と考えられる。たとえば、チェロの演奏における、一定のテンポでの開放弦の往復運弓動作が、ここでの課題である。その中には、一連の要素動作(下げ弓、弓先での返し、上げ弓、弓元での返し)が含まれ、それらが繰り返される。金城[金城 06]は、そのような課題に含まれる連続動作に対する背中、上腕、前腕、手首の各筋電データに対して、要素動作ごとの定常性(局所定常性)を仮定して、局所定常自己回帰モデル[北川 05]やノンパラメトリック回帰における再帰分割線形回帰モデル[Hastie 02]に基づくセグメンテーションアルゴリズムを開発した。つぎに、そこで得られた各セグメントの類似性に基づいたクラスタリングを行い、各クラスタに記号を割り当てた。この操作は、シンボル接地問題への1つのアプローチと捉えることができる。この場合のシンボルは、正確には各課題に対応するものではない。また、筋肉ごとにその活性化のパターンは異なるので、そのセグメンテーションのタイミングも異なる。各シンボルは、対応する筋肉が定常的な動きをする区間を表しており、シンボルに対して、その区間の開始時刻と終了時刻が与えられる。そのような区間の系列データに対して、Allen[Allen94]の時区間論理を用いて、筋肉間の活性パターンを抽出することが可能である。具体的には、Allenの時区間論理を背景知識とし、あるテンポでの上記の課題に対する区間列データを正事例とし、他のテンポに対するそれを負事例として帰納論理プログラミング(ILP)による帰納推論を行って、特定のテンポにおける特徴的なパターンの抽出に成功した。ここで得られた特徴的なパターンは、往復が1秒の繰り返し運弓動作課題に対するルールで、その特異性は筆者によって以前明らかにされていた現象である。その現象がこの手法によって自動的に見出されたわけである。

3. スキル創造支援

高度な身体スキルの獲得を阻害する要因にはいろいろ考えられるが、中でも間違ったメンタルモデルに基づく身体制御は、厄介な問題である。たとえば、自転車に乗る場合、右に倒れそうになったら右に舵を切り、左に倒れそうになったら左に舵を切ればよいが、はじめは逆方向に舵を切ってしまう。また、速度を早くすると安定するが、はじめはなかなか速く進めることが出来ない。車のハンドル操作でも同様のことが起こる。カーブのとき、車の速度およびステアリングの回転量とカーブの切れ具合の関係が理解できず、ハンドルを切る動作が遅れてしまう。それは、カーブに応じた適切な速度を選ぶことが出来ず、さらにハンドルを切った結果が積分して車がカーブすることが理解できないからである。

このような問題は、メンタルモデルの問題と呼ばれる。脳が制御対象に対して、制御量とその動きの関係のモデルを構築しているが、そのモデルが間違っていることにより望ましい制御が出来ない、という問題である。この問題は、思い込みを修正しなければ直らない、という厄介な側面を持っている。この問題を解決するためには、被制御対象およびそれを制御するための身体動作の正しい理解が重要である。そのためには、与えられた課題をこなすための身体動作にとって、何が重要なかを表現する着眼点の発見が必須である。

以下に、着眼点の発見のための2つのアプローチについて述べる[古川 06b]。

3.1 力学モデルによる着眼点の発見

技巧的な動作の多くは、シナジー、すなわち筋肉群の協調的な活性化が重要な働きをすることはすでに述べたとおりである。そして、力学モデルはそのような複数の筋骨格に跨る連係動作についての適切な理解を可能にする。我々は、これまでに有用な力学モデルとして、振り子動作、回転動作、鞭動作、引き押し動作などについての考察を行ってきた[古川 03,05a,05b,06c, Furukawa 05]。

鞭動作を例に取り上げると、それはヒトのしなやかな動作のモデルを与える。そして、鞭力学によれば、鞭は波動現象であり、その最高速度の部位が材質の音速で鞭の元から先に向かって伝播するが、その音速自身が材質のヤング率、すなわちバネの強さの平方根に比例することが知られている。この事実から、ゴルフのスイングや、野球の投球、弦楽器での運弓動作などの様々な動作での背筋の重要性が示唆される。

もう1つの例として、振り子動作を考えよう。振り子の力学モデルによれば、振り子の周期が振り子長の平方根に比例するので、より早いテンポでの運弓動作は、振り子長を2乗のオーダで短くしなければならない。テンポが倍になれば、振り子長は1/4にしなければならない。これは、腕の各部位のインピーダンスを調節することによって実現される。

ところで、振り子の力学が重要であるのは、そのモデルの適用条件が満たされなければならない点である。動作が振り子状に動くためには、支点の固定が必須である。具体例としては、弓先での素早い弓の返しの課題がある。その際、右肩を固定するために左足を閉じる奏法を採用するのがポイントである。こうすると、腰の左回転に対する可動域が制限され、そのために、腰筋を強く活性化せずに、上体が左に流れるのを防いでくれる。この抑制力は、左足が床から受ける摩擦力によってもたらされるので、余分な力を使う必要がない。このように、関連性の長い連鎖を辿ることによって始めて、左足を閉じることによって右肩の固定が実現されることが理解できる。このような納得のいく理解なしに、ただ言われたとおりに左足を閉じることを実行した場合、他の前提条件を満たさないためにこの方法が使えない場合があっても、その原因が分からないままに終わってしまう。とくに、この例のように右肩と左足のように、それらの部位が大きく離れている場合、そのような関係を思いつかないのが普通である。

3.2 メタ認知による着眼点の発見

メタ認知は、諏訪[諏訪 05]によって導入された手法で、演技中に、演技者が自分の演技に対する自己分析を行うことにより着眼点を見出す方法である。とくに、上手い演技について、その理由を考察することによって、上手い演技を一過性の現象ではなく持続的にスキルの向上に役立てることを可能にする。この方法は演技スキルの進化性を実現する上で不可欠なものである。それによって、新たな演技法、奏法を発見することが出来る。それは、言語化によって初めて、新たな奏法の着眼点を整理でき、後々まで役に立つスキルとして定着するからである。また、ここで獲得された言語化の要素、すなわち、基本属性は、それが一般的な着眼点であればあるほど、将来の技術の発展に役立つ表現言語の一部となるであろう。諏訪[諏訪 05]は、これらの循環プロセスの重要性を指摘している。

4. スキル診断支援

我々は、非単調推論に基づく身体スキルの発想支援のモデル化を試みてきた[古川 07]。そこでは、動作一貫性制約(Motion Integrity Constraint, MIC)が本質的な働きをしている。ベルンシュタインが提示した自由度の多寡を抑制する手法として我々が考えたのは、MIC による動きの制限である。以下、初めに動作一貫性制約を概観し、つぎに発想推論を紹介する。そして、最後 MIC を用いた発想推論によるスキル診断支援システムの提案を行う。

4.1 動作一貫性制約

Ueno 等[Ueno00]は、スキルの達成のためには、動作に関する一貫性制約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。Ueno 等は、その概念をスキルのドメインに応用し、それを動作一貫性制約(Motion Integrity Constraint, MIC)と名付けた。さらに古川ら[古川 06a]は、MIC を取り込んだ演技スキル表現言語を設計した。

動作一貫性制約(MIC)とは、動きに関する一貫性制約のことで、生体力学的アトム、各四肢の位置、動作イベントの発生時刻、発生場所などの間でなり立つ制約である。たとえば、上腕二頭筋と上腕三頭筋の同時強活性化を制約するためのルールは、

$$\leftarrow \text{上腕二頭筋強活性化} \wedge \text{上腕三頭筋強活性化}$$

のように表される。

MIC には、多くの種類が存在する。それらは、力学的な要請に起因するもの、筋骨格系の特性に起因するもの、および時空間による制約の3種類に大別される。第1の力学的な要請に起因する MIC には、回転運動における慣性モーメントの調節、体の中心への引っ張り、あるいは中心からの押し出しの動作における適切な反力の生成、速度、加速度などの量的な制限などが考えられる。

第2の筋骨格系に起因する第1の MIC は、インピーダンス制約である。たとえば、上腕筋を使って、肘の曲げ伸ばしを行うとき、上腕二頭筋と三頭筋を同時に強活性化すると肘が固まってしまう、スムーズな運動を阻害する。これは、インピーダンス制約の例である。第2の MIC は、各関節の可動域に関する制約である。ヒトが苦勞せずに動かせる関節角度を守ることが大切であり、それは可動域制約として表せる。第3の MIC は、協応動作に関する制約である。協応動作(Coordination)は、複数の筋骨格間での調和の取れた動作のことであり、それはスムーズな運動を実現するためには不可欠である。第4の MIC は、姿勢の調節に関する制約である。その最も典型的な例は、体を伸ばす姿勢と縮める姿勢の両立が出来ないことである。

第3の時空間制約としては、異なった物体が同時刻に同じ場所を占めることが出来ない、という制約が最も本質的なものであるが、動きを考えると、それに加えて移動速度の物理的な限界も重要なファクタとなる。それから、各課題の要請から、運動軌跡の時空間的制約も問題となる。それらをすべて枚挙することは困難であるが、ここでは、2つの例を挙げる。第1は、課題が要求するスピードに関連した制約であるが、上に述べた慣性制約は、このような時間制約の一種でもある。もう1つ、重要な時間制約は、タイミングである。一定のテンポを保って演奏することを要求するのは、この例である。また、アンサンブルなどでは、他

のメンバーとの同期も非常に大切である。この問題は、とくにオープンスキルで重要になってくる。空間制約の例には、弓の軌跡がある。運弓動作において、1つの弦での長音の運弓は、その弦によって決まる平面内での運動が要求される。その場合は、多少の誤差は認められるが、2弦同時の長音運弓では、誤差の許容範囲が著しく狭められる。また、移弦動作は、長音運弓面とほぼ直角の、むしろ矢状面に平行な平面内での運動となる。このように、運動が特定の部分空間内に制限されるのが、空間制約である。

4.2 発想推論

発想推論は必ずしも正しい結論を導くわけではないが、証拠を説明する仮説を生成する推論仮定と考えられる。発想推論は Peirce[Peirce]によって導入された概念で、演繹推論、帰納推論と共に、人間の行っている自然な推論形式の1つと考えられる。演繹推論とは、一般的ルールを特定のケースに当てはめて、結論を得る分析的過程である。帰納推論とは、特定のケースと結論から、ルールを推論する合成的過程である。発想推論とは、ルールと結論から、特定のケースを推論する、もう1つの合成的過程である。

発想推論をより厳密に定義すると以下のようになる[Kakas00]。

定義 4.1

与えられた一般論理プログラム P 、一貫性制約を表す論理式の集合 I 、基礎原子文から成る候補仮説集合 A および観測事実 G に対して、**発想推論**は以下の2つの式を満足する $\Delta \subseteq A$ を求める。

1. $P \cup \Delta \models G$
2. $P \cup \Delta$ は、 I を満足する。

このとき、三つ組 $\langle P, A, \Delta \rangle$ を**発想論理プログラム** (abductive logic program)と呼ぶ。

すなわち論理プログラム P に Δ を補うことによってはじめて、観測事実 G が説明できるようになる。一方、 $P \cup \Delta$ は一貫性制約の集合 I を満足しなければならない。そのような Δ を求めるのが発想推論である。

4.3 発想推論に基づくスキル診断

古川ら[古川 07]は、発想推論を用いることによって、極限課題や複合課題などの困難な課題を動作一貫性制約を回避しながら遂行するスキルルールの抽出実験を行い、システムの設計者が予想しなかったようなスキルルールの導出に成功した。それは、ビブラートを掛けながらポジション移動を行う、という複合課題のためのルールであるが、ビブラートの掛け方およびポジション移動の仕方それぞれ二通りの方法を仮定して、それらの組み合わせの中から MIC に違反しない奏法を選び出すのが問題である。ビブラートの奏法には、前腕を回内・回外させる方法と肘の微小な内外転による方法が考えられる。また、ポジション移動には、肘を回転軸とした前腕の振り出しによる方法と、肘を上下に動かしながらその角度を変化させる方法とがある。一方 MIC は、ビブラートを行うための肘の位置の固定と上腕の内外転運動の矛盾である。これは、上腕を内外転させると肘の位置を固定させることが出来ないことを意味する。このような可能な奏法と MIC を入力として与えて、発想論理プログラミングシステム PrologICA[Ray06]を実行させた結果、答えとして「前腕の振り出しによってポジション移動を行い、前腕の回内・回外によりビブラートを掛ける」奏法と、「前腕の振り出しによってポジ

ョン移動を行い、肘の微小な内外転によりビブラートを掛ける」奏法の二つが提案された。この後者の奏法は、筆者は当初予想していなかった回答である。システムは、この奏法も動作一貫性制約に違反していないことを保証している。

このように、奏法の提案自身、有用な機能であるが、ここではさらに、発想推論の枠組みを用いて、スキル診断を実現する方法を提案したい。そのためには、各個人の奏法のどこがおかしいのかを指摘する機能が必要である。すなわち、観測事実としては、失敗に終わった試技のデータが必要となる。また、それと同時に、熟達者による模範試技で採用しているスキルルールを求めなければならない。後者は、前述したスキルルールの抽出手法によって得ることが出来る。その時に、何故前者で試技が失敗するのか、その原因を探らなければならないが、それは熟達者の解の中から探せばよい。その中で、当事者に欠落しているようなスキルが見つければ、そこを補えばよいことになる。

5. おわりに

本論文では、近未来 AI チャレンジセッションの目標を視野に入れて、本アプローチの近未来における産業、社会への貢献の可能性について論じてきた。具体的には、時系列マイニングによるスキルルールの抽出、スキル創造支援、スキル診断支援の3つの可能性を示した。これらは、近い将来、実際の場面において利用されることが期待される。しかしながら、真の実用システムとなるためには、幾つかの問題点を解決しなければならない。それらは、実システムとしての実現可能性の問題である。我々の提案は、モーションキャプチャリングや筋電図と言った、やや高価な計測システムの利用を前提としている。それは、価格的問題だけでなく、専門的な知識を持った技術者が必要であること、しかも、データの獲得に手間隙が掛かることが問題となる。この問題を解決するには、計測システムの簡便化が望まれる。

さらに、本アプローチによって、どの程度有効なスキルの創造支援、あるいは診断支援が可能かが問題となる。真に実用に供するためには、これからさらに解決しなければならない問題が山積みである。その第1は、間違っただメンタルモデルへの対処である。この点については、スキル診断によって解決できる部分もあるが、学習者の思い込みの間違いを分かりやすく説明するなどの、より高度な機能が必要とされる。第2には、オープンスキルへの対処である[Poulton 57]。オープンスキルは、ゲームにおける相手のように、予測が困難な環境と考えられるが、その対処方法は、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。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。今後の計測技術の進展に期待したい。

参考文献

- [Allen 94] Allen, James F. and Ferguson, G.: Actions and events in interval temporal logic. *Journal of Logic and Computation*, 4(5), pp.531-579 (1994)
- [Bernstein 67] Bernstein, N.: *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon Press, New York (1967)

- [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 (EMBE'05)*, Prague (2005)
- [古川06a] 古川康一, 清水聡史, 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).
- [古川06b] 古川康一, 諏訪正樹, 加藤貴昭: 身体スキルの創造支援について, *日本機械学会ジョイント・シンポジウム2006「スポーツ工学シンポジウム」*, 222-227 (2006)
- [古川06c] 古川康一: 鞭力学による協調動作のモデル化, *バイオメカニズム研究討論会*, 2B1, pp.171-176 (2006)
- [古川07] 古川康一, 小林 郁夫: 身体スキル発想支援の非単調推論によるモデル化について, *人工知能学会基本問題研究会*, 札幌 (2007)
- [Hastie 02] T.Hastie, Robert Tibshirani, J.Friedman *The elements of statistical learning*, springer (2002)
- [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)
- [金城 06] 金城敬太, 古川康一: 局所モデリングと時区間論理を用いた時系列データマイニング, *人工知能学会基本問題研究会*, 大阪(2006)
- [Peirce] Peirce, C.S., *Collected papers of Charles Sanders Peirce*. Vol.2, 1931--1958, Hartshorn et al. eds., Harvard University Press.
- [Poulton 57] Poulton, E. C.: On prediction in skilled movements, *Psychological Bulletin*, Vol. 54, pp.467-478 (1957)
- [Ray06] Ray, O. and Kakas, A.C.: "ProLogICA: a practical system for Abductive Logic Programming", *Proc. of the 11th Non Monotonic Reasoning Workshop*, pp.304-314 (2006)
- [諏訪 05] 諏訪正樹: 身体知獲得のツールとしてのメタ認知的言語化, *人工知能学会誌*, Vol.20, No.5, pp.525-532 (2005)
- [Ueno00] Ken Ueno, Koichi Furukawa, and Michael Bain: Motor Skill as Dynamic Constraint Satisfaction, *Electronic Transactions on Artificial Intelligence*, Vol. 4, Section B, pp.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)