

発想推論に基づく着眼点の発見

Discovering Knack by Abductive Reasoning

古川康一¹ 小林郁夫² 井上克巳³ 諏訪正樹⁴

Koichi Furukawa¹, Ikuo Kobayashi², Katsumi Inoue³ and Masaki Suwa⁴

¹慶應義塾大学

²慶應義塾大学 SFC研究所

¹Keio University

²SFC Research Institute, Keio University

³国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系

³Principles of Informatics Research Division, National Institute of Informatics

⁴慶應義塾大学 環境情報学部

⁴Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract: In this paper, we investigate how to discover knack in performing skillful tasks. Our approach is to formalize knack discovery problems in terms of abductive inference. We define two problems related to knack discovery: one is rule-abduction which tries to find missing rules to explain observed causality to accomplish hard performance tasks such as “increase sound volume” in playing the cello. The other is new knack discovery which suggests the learner where to focus attention during performance. We utilize an observed knack such as keeping right arm close during bowing which empirically proved to achieve the given task. We provide abductive inference programs to conduct both rule induction and new knack discovery. Especially, we point out the importance of existentially quantified logical formula to express hypotheses including logical variables representing missing nodes to be introduced.

1 はじめに

身体スキルを獲得するに際して、着眼点の発見が果たす役割は、計り知れない。それにより、今までにないスキルレベルへの飛躍的なジャンプが可能になる。着眼点の発見の方法論については、その追求の試みすらほとんどなされていない。そのようなことが果たして出来るのか、といった疑問も提示されることもしばしばである。本論文は、この大問題への足がかりを築くことを狙っている。

はじめに、本研究のきっかけとなった実体験について述べよう。筆者の一人は、新たなチェロ奏法を突然思いついた。それは「右腕の脇を締めて運弓動作を行う」という単純なものである。この単純な奏法を採用することによって、「音を大きくする」という目的の達成が可能となった。その前までは、この問題を解決できるうまい方法が見つからなかったが、この発見により十数年悩み続けてきた課題をついに克服することが出来た。これが、着眼点の発見を考える出発点となった。

我々は、この問題に関連するさまざまなアプローチを検討してきた[1][2]。それらを列挙すると、生体

力学モデルの検討、スキルの計測・可視化、スキルデータの解析・データマイニング、メタ認知、発想推論に基づくスキルの創造・診断支援などである。これらの検討を通して明らかになった点は、飛躍的なスキルの向上を促すコツは、「発見された着眼点」のみに依拠するのではなく、むしろそれとその他の注目すべき多様な事実との関係性のなかに存在する、という事実である。また、それらはルールで表現することが可能である。チェロの運弓動作の例で言えば、「手首を柔軟にすれば、弓の返しがうまくいく」といったルールである。スキルのこのようなルール表現は、発想推論に基づくスキルの創造・診断支援の研究で展開されている[3]。

また、着眼点の発見にとって、その表現のための言葉を如何にして見出すのが大変重要な課題であるが、そこで威力を発揮するのがメタ認知の方法論である[4]。メタ認知は、繰り返しの練習における自己の体の使い方に対して詳細な記述を取り続け、その変化を見て、着眼点の発見に結びつける方法論である。その場合、コーチによって与えられた新たな課題は、学習者にとっては今までの蓄積を越えて、新たなスキルを獲得するきっかけを与えてくれるが、

同時にこれまでの知識体系を一旦取り壊して、新しく再構築する作業を必要とする[5]。その際、新たな注意点と従来の知識体系をどのように関連付けるのかが、最大の問題となる。この関連付けの基本は、やはり関係性である。

上に述べた、「音を大きくするために右腕の脇を締めて運弓動作を行う」という奏法の例では、「脇を締める」ことが「音を大きくする」ために不可欠な（経験的に得られた）着眼点の例である。ところで、この着眼点およびそれに付随する演奏ルールが真に有用であるためには、この演奏ルールの妥当性についての納得のいく説明が必要である。

本論文では、「着眼点の発見」の形式化を「発想推論」を基に行っている。発想推論、あるいはアブダクションは、もともと Peirce[6]によって、人間の発見的な知的活動をモデル化するための道具立てとして導入された論理的枠組みであり、ここでの利用は的を射ていると考えられる。我々が採用しているのは、完全な述語論理の証明器を基にした発想推論システムであり、それによって存在限量された論理式を補うべき仮説として得ることが出来る。この機能を利用して、新述語を表現するノードを表す論理変数を含んだ仮説を生成している。

2 問題設定

本論文ではルール・アブダクションおよび新述語の導入について論じるが、その準備として、チェロの運弓動作を例に問題設定を行う。

チェロの右腕による運弓動作は、音の強弱の制御、円滑な弓の返しおよび移弦、スタッカートやレガートなどのさまざまな弾き方への対応など、大変多様であり、かつ高度なスキルを必要とする。ここで問題にする課題は、「音を大きくする」ことである。音を大きくするためには、弓をコマの近くに当てて弾かなければならない。コマの近くで弦を振動させるためにはより多くのエネルギーを注入しなければならないが、その注入の仕方にむらがあると雑音が入ったり音が途切れてしまったりするので、細心の注意が必要である。より多くのエネルギーを注入するためには、弓が弦の振動に負けないよう、弦に対して一定の力を加え続けなければならない。また、弓の動きを円滑にするためには、手首に余分な力が入らないようにし、弓の返しを柔軟にしかもエネルギーの注入の中断なしに行わなければならない。この課題に対して筆者の一人が発見したのが、「脇を締める」という方法である。すなわち、ここで得られた関係は、図2.1のような因果関係である。

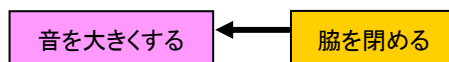


図2.1 観測された因果関係

ところで、ここで重要になってくるのが、なぜこのような因果関係が成立するのか、という問題である。この問題に対する納得のいく説明がなければ、それは技として定着しない。我々が考察により得た説明は、以下の通りである。音を大きくするためには(inc_sound)、弓をコマの近くで弦に当てなければならない(bow_close_to_the_bridge)。そこでの弦の振動を維持するためには、1. 弓を安定させて動かさなければならない(stable_bow_movement)。これは、弦に対して一定の力を加え続けるためである。また、2. 弓の返し時にエネルギーの注入の中断がないように、弓の返しを円滑にしなければならない(smooth_bow_direction_change)。そのためには、手首を柔らかくしなければならない(flexible_wrist)。ここまでの考察に出現した述語と述語間の因果関係を図示すると、図2.2のようになる。

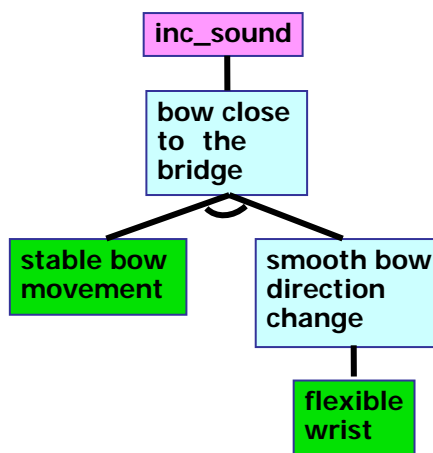


図2.2 音を大きくするための弓と手首の動き

この図の下端にある二つのノードが満たされれば、音を大きくすることができる、ということになる。そのため、我々が観測した事実、すなわち「脇を締める」ことがこれらを成り立たせるのかを考察すればよい。ところが、弓は手で保持しており、手首も脇と離れているので、直接の因果関係を論じるのは無理がある。この事実は、これらの間を埋めるためのノードが必要になることを意味している。実際、解剖学的にも手首と脇の間には、前腕および上腕が存在する。これらに関係する体の使い方の中に、その間を埋めるものがあればよい。実は、我々は次の事実を知っている：「関節のしなやかな動きは、その関節の一つ以上手前の関節を動かすにことよって実

現する。すなわち、二つ以上手前の筋肉群を用いる」[7]。この事実は、手首の柔軟な動きは上腕の活動が関係していることを示唆している。実際には、単に上腕の筋肉群を用いるという指示だけでは不十分であり、そこでのインピーダンスの増加が必要になる (increase_upper_arm_impedance)。この「インピーダンスの増加」は、手首の柔軟な動きを実現するとともに、図2. 2のもう1つの右端ノードである stable_bow_movement をも実現してしまう。さらに、生体力学的な考察によって、上腕のインピーダンスの増加は、脇を締める (keep_one's_arm_close) ことによってもたらされることが分かるので、このノードの導入によって推論が図2. 3のように完結する。

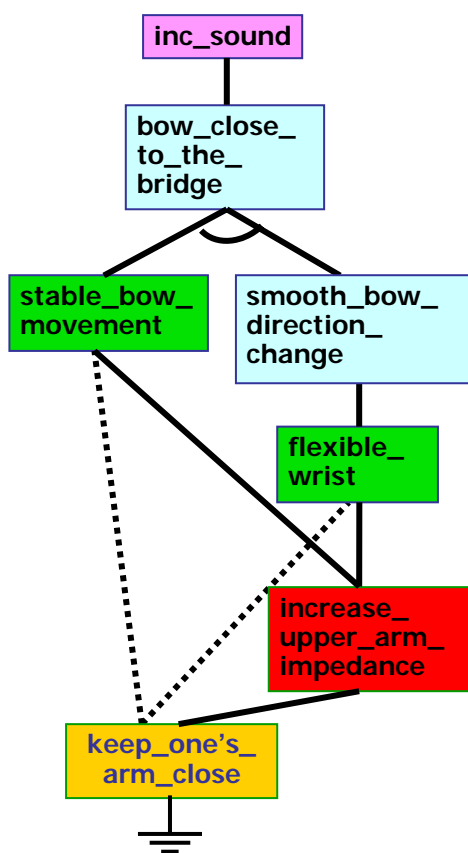


図2. 3 increase_upper_arm_impedanceノードの導入によって完結した推論パス。接地記号は対応ノードが事実として成り立っていることを示す。

本論文では、この推論図の完成を目指す、そこに至る二通りの問題設定を行う。

1. increase_upper_arm_impedance ノードが既知で、それが stable_bow_movement および flexible_wrist の実現を可能にしていることも知っている場合。

2. increase_upper_arm_impedance ノード自身が未知の場合。

問題設定1で我々が必要とするのは、図2. 3において、keep_one's_arm_close ノードから increase_upper_arm_impedance ノードへの因果リンクを張ることによって、破線で示されたリンクを取り除くことである。そのためには、この新しいルールを導入するために、ルール・アブダクションが必要になる。

一方、問題設定2においては、increase_upper_arm_impedance ノード自身を導入しなければならない。これは、新述語の導入問題である。

以下に、問題をより明確に記述するために、いくつかの用語を定義する。

ゴール述語は、与えられた困難な課題を表す述語である。隠れ着眼点は、求めるべきルールの頭部となる述語である。経験的着眼点は、与えられた困難な課題の解決に役立つ、経験的に発見された着眼点である。隠れルールは、観測された因果関係がなぜ与えられた困難な課題の解決に役立つのかを説明するために不可欠なルールで、ルール・アブダクションのターゲットとなる。

これらの用語の関係は、図2. 4のように表される。図2. 3の例で言えば、ゴール述語は inc_sound であり、隠れ着眼点は increase_upper_arm_impedance である。また、経験的着眼点は keep_one's_arm_close である。

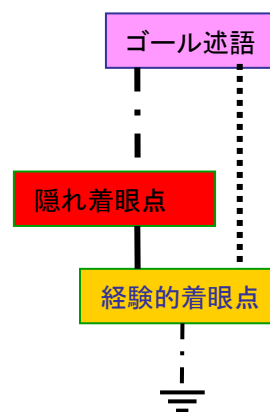


図2. 4 ゴール述語, 隠れ着眼点, 経験的着眼点の関係。一点鎖線は推論パスの存在を意味する。点線は観測された因果関係 (経験則) を表す。実線は隠れルールを表す。

3 発想推論によるルールの発見

3.1 発想推論システム SOLAR

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過程と考えられる。以下に、発想推論の定義を与える。

定義 3. 1

B を背景知識を表す節集合とし、G を観測事象を表すリテラルの集合とする。また、 Γ を候補仮説を表すリテラルの集合とする。 Γ の要素であるリテラルおよびその例を**仮定可能**(abducible)リテラルと呼び、これらのリテラルがもつ述語記号を**仮定可能**(abducible)述語と呼ぶ。

B, G, および Γ が与えられたとき、**発想推論**は以下の2つを満足する仮定可能リテラルの集合 H を求める[8].

1. $B \cup H \models G$,
2. $B \cup H$ は無矛盾である。

このとき、H を (B, Γ に関する) G の**説明**と呼ぶ。H の仮説は変数を含むことが可能で、その場合存在限量されていると仮定する。説明 H が変数を含まなければ基礎(ground)説明と呼ぶ。

定義3.1 において、条件1 は背景知識 B に H を補うことにより観測事実 G が説明できるようになることを示している。なお、論理プログラムではなく述語論理の節理論を用いるため、一貫性制約は一般に B の中で負節として表現され、条件2 の無矛盾性の条件が一貫性制約を満たすことに相当する。

発想推論を実際に動かすことの出来る計算方式に、SOL 導出[8]があり、SOL導出を実現しているシステムにSOLAR [9]がある。以下では、論理式の集合S と、S に含まれるすべての論理式を論理積で結んだ論理式 $\bigwedge_{F \in S} F$ を同一視する。

まず、SOL導出を用いて発想推論を実現するために、定義3.1 の条件1 と同値である次の関係式を用いる。これは、**逆伴意**(inverse entailment)として知られた関係の発想推論への適用にもなっている。

$$B \wedge \neg G \models \neg H$$

いま G と H はともにリテラルの論理積とみなせるため、 $\neg G$ と $\neg H$ はともに節である。また、定義3.1 の条件2 は $B \models \neg H$ と同値である。よって、発想推論の問題において、G の説明を計算するためには、 $B \wedge \neg G$ の定理であって B の定理ではないような結論 $\neg H$ を計算しその否定を取ればよい。このとき、H の要素はすべて仮定可能リテラルであることから、 $\neg H$ を構成するどのリテラルも Γ のある要素の例の否定となっている。また、節集合の

定理は節として求められるため、中に含まれる変数はすべて全称限量されているが、否定を取った式ではこれらの変数が存在限量されることになる。

SOL導出では、与えられた節集合の論理的帰結であり、限定された言語に属するリテラルのみからなる節を計算する。このために、Prolog の基にもなった順序付き線形導出において、 $\neg G$ を先頭のゴールとし、選択されたサブゴールのリテラルが Γ の要素の例の否定であるときに、融合を行う代わりにSkip と呼ばれる操作を行ってこのリテラルを保存し次のリテラルを解きに行く。このようにして証明が終了したとき、Skipされたリテラルを集めてできる節は公理集合からの論理的帰結となる。SOLAR ではこの計算をタブロ方式によって高速に実現しており、無駄な再計算を可能な限り削減している。SOLAR は任意の一階述語節理論において、結論発見に関して完全である。このため、逆伴意で求められる仮説の否定の計算においても完全性が保障されている。

3.2 因果関係に基づく発想推論の形式化

因果関係を論理的関係によって表現すると、論理の持つ推論能力を利用することが出来る。また、同時に、発想推論も可能になる。発想推論では、推論図を完成させるために補うべき論理式を求めることが問題となる。そのため、推論図における欠落部分(空隙)の発見を必要とする。

因果関係を表す推論図は、因果関係グラフを表していると考えられる。因果関係は、因果関係グラフにおける有向アークに対応する。この因果関係グラフにおいて、到達可能性は因果連鎖を表す。ゴール述語から下方に、あるいは経験的着眼点から上方に因果関係グラフを辿ることにより、因果連鎖を調べることが出来る。因果関係グラフが不完全な場合、ゴール述語から経験的着眼点に至る妥当な経路が存在しない。その場合、その経路上に新たなノードを追加して、経路を完結させるのがここでの目的となる。

因果連鎖を表現するために述語論理式による表現形式を用いる。いま、ノードqからノードpに対して直接的な因果関係が存在するときに **connected(p,q)** が真であると定義する。また因果関係の連鎖によりノードqからノードpに到達できるときに **caused(p,q)** が真であると定義する。このとき、次の2式が成立する：

$$\text{caused}(X,Y) \leftarrow \text{connected}(X,Y).$$

$$\text{caused}(X,Y) \leftarrow \text{connected}(X,Z) \wedge \text{caused}(Z,Y).$$

もしノードqからノードpに直接的な因果関係が存

在しないことがわかっていれば、統合的制約として

$\leftarrow \text{connected}(p,q).$

と書いておけばよい（この表現は、論理的否定を用いた表現 $\neg \text{connected}(p,q)$ の節表現である）。

ここで注意を要するのは、**connected** あるいは **caused** が含意関係を意味しているわけではない、という事実である。また、ここで扱った因果関係自身、完全な原因-結果の関係を表しているのではなく、たとえば $\text{connected}(p,q)$ は、 q は p が引き起こされるための原因のひとつであることを意味している。

3.3 ルール・アブダクション

いま例えば、ゴール述語 g 、経験的着眼点 s 、隠れ着眼点 r の間に、以下のような直接的因果関係および制約が存在する場合を考える（図 3. 1）：

$\text{connected}(g, r).$

$\leftarrow \text{connected}(g, s).$

g と s の間にはこの制約により直接的な接続はないが、観測としては次の因果連鎖がある場合を考える：

$\text{caused}(g, s).$

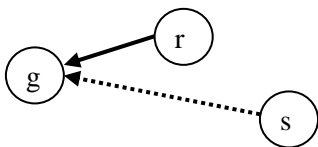


図 3. 1 直接的因果関係と直接因果関係にない観測された関係の共存. 矢印は、因果関係の方向を示す。

この観測を説明するために、アブダクションを実行する。その際、得られる仮説の候補としては、**connected** 述語だけが現れて欲しいので、そのことを表すために、**connected** のみを **abducible** 述語として指定する。そして、述語論理におけるアブダクションを実行すると、例えば以下の仮説を得る。
 $\text{connected}(r, s)$

これは、因果関係を表すルールなので、ルール・アブダクションとなっている。このルールを付け加えると、観測された因果関係は 2 つの **connected** の関係から導かれ、図 3. 2 のような証明図を得る。

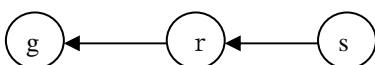


図 3. 2 ノード r を介した説明

3.4 新ノードの導入

つぎに、以下のような 2 つの観測された因果関係と、関連する制約が存在する場合を考える（図 3. 3）：

$\text{caused}(g, s).$

$\text{caused}(h, s).$

$\leftarrow \text{connected}(g, s).$

$\leftarrow \text{connected}(h, s).$

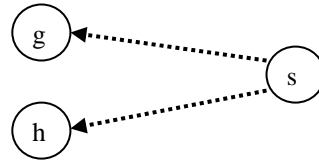


図 3. 3 直接因果関係にない観測された関係

これらの観測を説明するために、**connected** を **abducible** 述語としたときの述語論理におけるアブダクションを用いると、例えば以下の仮説を得る。

$\exists X. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(h, X) \wedge \text{connected}(X, s)).$

X は前節のように既存のノードと単一化してもよいが、もし新ノードであると考えれば、それは新述語の導入に対応している（図 3. 4）。

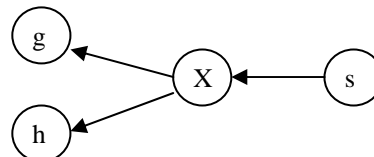


図 3. 4 あるノード X を介した説明

別の解としては、複数のノードを介した仮説：

$\exists X \exists Y. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(h, Y) \wedge \text{connected}(X, s) \wedge \text{connected}(Y, s)).$

も存在する。これは、 X と Y が別のノードである場合（図 3. 5）やどちらかが既存のノードと単一化する場合（図 3. 4）などを含んでいる。さらに、2 つのノード X, Y を介した説明が別の構造を持つ可能性もあり、例えば、

$\exists X \exists Y. (\text{connected}(g, X) \wedge \text{connected}(X, Y) \wedge \text{connected}(h, Y) \wedge \text{connected}(Y, s)).$

は図 3. 6 で表される構造に相当する。

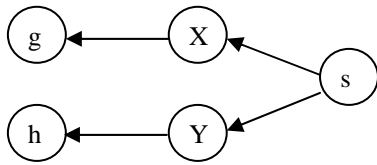


図3. 5 2つのノード X, Y を介した説明(1)

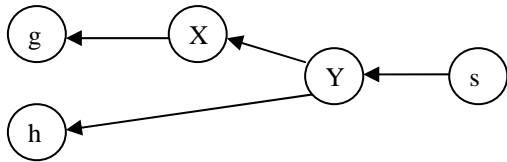


図3. 6 2つのノード X, Y を介した説明(2)

このように、述語論理における限量論理式を用いることにより、ネットワークの様々な構造を表現することができる。

以上のような述語論理におけるアブダクションは SOL 導出 [6] で実現可能であり、これを実現しているシステムとしては SOLAR [7] が存在する。

音を大きくするための問題設定においては、以下のような因果関係と制約を考えることができる：

```
connected(inc_sound, bow_close_to_the_bridge).
connected(bow_close_to_the_bridge,
           stable_bow_movement).
connected(bow_close_to_the_bridge,
           smooth_bow_direction_change).
connected(smooth_bow_direction_change,
           flexible_wrist).
```

← connected(inc_sound, keep_arm_close).
観測された因果関係として以下を考える：

```
caused(inc_sound, keep_arm_close).
```

この論理式は、「脇を閉めると音が大きくなる」という因果関係が観測されたことを意味する。我々は、さらに以下の2つの派生的な“観測された因果関係”を必要とする。これらは、実際に音を大きくするために必要なサブゴールが経験的着眼点によって満たされることを意味している。

```
caused(stable_bow_movement, keep_arm_close).
caused(smooth_bow_direction_change, keep_arm_close).
```

アブダクションシステムは、これらの観測事実を与えて、それを証明できるように、欠落している仮説を探し出す。

この観測を説明する仮説の一つは次の通りであ

る：

```
∃ X. (connected(stable_bow_movement, X)
      ∧ connected(flexible_wrist, X)
      ∧ connected(X, keep_arm_close)).
```

この論理式の X に increase_upper_arm_impedance を代入すれば、increase_upper_arm_impedance という新述語を導入し、さらにそれと他の述語間に成り立つルールをアブダクションで得たことになる。それらのルールは図2. 3の increase_upper_arm_impedance ノードから出ている3本の実線に対応している。

実際に SOLAR を用いた実験では、深さ10の推論制限、仮説長の上限4の下で93個の説明パターンを生成しており、上の解はその一つである。

4 導入された新ノードの同定

前章の例で得られたルールに表れる変数 X は、式

```
∃ X. (connected(stable_bow_movement, X)
      ∧ connected(flexible_wrist, X)
      ∧ connected(X, keep_arm_close)).
```

を見れば分かるように、stable_bow_movement ノードおよび flexible_wrist ノードの原因にならなければならない。同時に、keep_arm_close ノードの結果とならなければならない。ところで、我々は X として inc_upper_arm_impedance を選択するといろいろなことが都合がよく説明できることを知っている。このようなノードを同定することがここでの問題であり、その結果は、対象ドメインで考えれば、そこでの新述語の導入と考えられる。そのためには、前章で用いた因果関係以外の、多面的な関連情報を必要とする。関連情報は、各述語に対してさまざまな情報を付与したデータベースの形で用意すればよい。そして、そのデータベースに対して適切な検索要求を発することにより、新述語にふさわしい述語をデータベースの中から選び出せばよい。これらの有用な情報は、ドメインに依存する。身体スキルの場合、身体構造、可観測性、可制御性がキーになる。身体スキルを扱う論理プログラムに記述する情報は、(1)観測可能なもの、(2)制御可能なもの、(3)スキルに関連する定性的な知識に現れる要素、などから構成するのが妥当である。

(1)は計測機器を使った実験や、演技者以外の第三者(コーチなど)による観測からもたらされるものを含むが、最も重要なのは特に演技者本人が演技中に動的に確かめられる種類のものである。演技のパフ

パフォーマンスを評価する情報と同時に、演技を行った時の体感情報も重要である。前者のパフォーマンス評価情報としては、スポーツでいえば自分の体の全体や部分やボールなどの時空間上での運動が理想的か、器楽でいえば音程・音色・音量や他の演奏者とのタイミングが理想的か、といったことが考えられる。後者は、地面や道具からの反力や摩擦力や、振り子運動・鞭運動の結果として体幹や四肢から直に感じられる感覚である。前者は後者に比べてパフォーマンスを明確に示してくれるのに対し、後者はより制御によりそった情報である。

(2)は厳密に言えば脳を含んだ運動指令に関係する神経系統全体の問題である。これを粗く考え、まずは「このように体を動かそう」という意図のレベルでとらえることとする。「脇を締めておこう」とか「親指と他の指で挟む力を加減して弓を制御しよう」といったような、演技過程を通じて、または特定の段階で意識的に注意を喚起して実行しようとするものとしておく。

(3)は科学的な知識、経験的な知識の双方に現れるさまざまな要素であり、(1)の観測情報と(2)の制御要素とを様々な状態で結びつける。医学、解剖学、運動心理学、力学を含む諸科学、特に生体力学の知識は身体の構造やそれを用いた運動の構成について、一般に成立する知識を与える。「関節の大きなトルク」や「上腕の強いインピーダンス」は、科学の知見をプログラムに取り込むために必要になる。一方、個々の演技者の体は細かい部分で異なっているので、特定のパフォーマンスを得る最良の方法がすべての人に共通するというにはならない。パフォーマンスと体感情報との関連、パフォーマンスと意図との関連における経験は固有の知識であり、力の入れ具合やタイミングの連続的な調整のみならず、時には方略そのものの定性的な見直しが必要になる。

新述語も身体スキルに関連するため、3つに大別される情報のいずれかであり、達成しようとする課題を表現したプログラムに未出現の情報と仮定する。たとえば、「力のモーメント」は各関節周りに、「(筋)強い活性化」は各筋肉群に出現しうることをデータベースに記録する。さらに、近接した体の部位は遠く隔たった部位よりも強く関連して機能することから候補を絞られるように、各部位の連なりを表現しておく。また、これらの関係の因果関係としての方向性に関する情報をも同時に用意しておく。

これらの情報をあらかじめ用意しておくことによって、得られた新述語の解釈を提供することが可能になる。

5 着眼点と関係性

我々は、着眼点の発見を発想推論の枠組みを使って行ったが、そこで重要な役割りを果たしたのが観測事象および因果関係である。観測事象自身も因果関係を表している。これは、新しいスキルの発見に付随する特性である。また、アブダクションのプログラム中に現れた制約自身、「直接の因果関係が成り立たない」という形で表現されている。

一方、メタ認知による着眼点の発見においても、関係性が重要な役割りを演じている。メタ認知に現れる言語表現は、他の対象と関連付けることによって、その重要性が測られ、注目すべき着眼点の発見につながると思われる。

そのような関係性の1つが因果関係であると考えられるが、その他にも種々の関係性が有用になってくるかもしれない。たとえば、脳神経系で言えば、反射的な動き自身、ある種の関係性と考えることが出来る。左腕の肘を急激に引き上げる動作は、反射的に右腕の肘の収縮をもたらす可能性があるが、これはチェロの演奏にとっては大変なマイナスになる[3]。これは、無意識的に引き起こされる関係性の例である。また、その逆に、ある点に着目することによって、新たな関係性を作り出すことが出来るかもしれない。

関係性に着目して、複合的な現象を記述し、そこからある種の結論を導き出す手法として、キーグラフ法[10]やベイジアンネットなどが知られている。

因果関係に基づくアブダクションの手法は、それらの手法と対比してその利害得失を考えるべきであるが、それらとの比較は新たな知見を得るのに有用かもしれない。しかしながら、論理に基づく方式以外に、新述語の導入につながる形式化はこれまでなされていないと思われる。この点は、我々の研究のオリジナリティを主張できるものと考えている。

因果関係についてもう1つ言えることは、それがメタ的な関係になっている点である。それはより具体的な関係、たとえば骨格での隣接関係や筋とそれが作用する骨との関係、力と動きの関係など、さまざまな関係を抽象化した関係と捉えることができる。

我々の例では、2章で述べたように、「関節のしなやかな動きは、その関節の一つ以上手前の関節を動かすにことよって実現する。すなわち、二つ以上手前の筋肉群を用いる。」という事実から、手首の柔軟な動きは上腕の活動が関係していることが分かり、そのことからさらに、上腕のインピーダンスの増加の必要性を導いているが、ここでどのようにして重要な着眼点であるインピーダンスが導き出されたかは、依然として不明である。この例は、因果関係以

外の関連性をも取り上げなければならないことを暗示している。

さらに、着眼点はその性質上、身体の動きの理解を促進する言葉でなければならない。これは、トレーナーがどのような指示をすれば学習者が理解できるのかという問題である。そのためには、日常的な動作に翻訳するために、動作のアナロジーや、メタ認知的な手法による表現力の強化が必要になると思われる。

6 おわりに

本稿では、発想推論に基づく着眼点の発見についての試みを報告した。とくに、チェロの演奏技法を例に取り、経験的に得られた（観測された）ルールを説明するために必要な隠れ着眼点および隠れルールをルール・アブダクションによって得る方法を示した。我々が採用したのは、SOL 導出法による SOLAR である。この発想推論システムにより、存在限量された論理式を仮説として求めることにより、着眼点および隠れルールが得られた。さらに、より既知の情報が少ない状況で、観測された経験的ルールを説明するために必要な新述語とそれに付随する複数のルールを同時に発見する方法を、同じ枠組みを使って実現した。さらに、得られた新述語の意味づけを行うための方法の提案を行った。

本稿で取り上げた例題では SOLAR による解は 93 であり、それほど多くはなかったが、より複雑な現実的な問題では、その解は膨大な数に上ると考えられる。ここでは取り上げなかった実際に観測された因果関係が複数ある例では、その数は 700 以上に上った。これらの中から意味のある解をどのように選択するのかは、今後解決を要する問題である。

本論文でメカニズムを提案したルール・アブダクションが、学習者（例えばスポーツ選手）のメタ認知を促進する（自分の身体を考えることを助ける）役目を担うことは十分想定できる。目的がメタ認知を促進することであるのであれば、必ずしも発想推論システムが最適解を求めて提示する必要はない。人間とのインターフェースを考えれば、むしろ、有力な候補を提示して、後はユーザーに考えさせる方がメタ認知を促進するとも考えられる。スポーツの現場で有能なコーチは、選手に考えさせるために必ずしも答えを与えない。700 以上という選択肢をユーザーに与えても情報爆発で役に立たないであろうから、有力候補に絞るところは何らかの方法で自動化しなければならないが、最後の判断は人間に任せるということでも構わない。

着眼点の発見は、スキルサイエンスにとって大変

重要な問題であり、我々のアプローチはその取っ掛かりに過ぎない。この取り組みを土台にして、その上にさらに研究を積み重ねていく必要がある。中でも重要なのは、経験的着眼点自身の発見の支援である。ここでの研究がうまく展開できたのは、経験的着眼点およびルールを与えたからである。この困難な問題に対して科学的なアプローチの可能性を示すことが出来たのは、このような問題設定を行ったからである。着眼点の発見の最も困難な問題は、依然として未解決のまま残されているといえよう。しかし、その問題に対しても、本アプローチは重要なヒントを提供していると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度国立情報学研究所共同研究「身体的メタ認知を促す即時フィードバックソフトウェアの開発」の助成による。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 古川康一編著, 植野, 諏訪他著: スキルサイエンス入門, 人工知能学会編, オーム社, 近刊
- [3] Kobayashi, I. and Furukawa, K.: Modeling physical skill discovery and diagnosis by abduction, 人工知能学会論文誌, Vol.23, No.3, pp. 127-140, (2008)
- [4] 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)
- [5] Masaki Suwa: A Cognitive Model of Acquiring Embodied Expertise Through Meta-cognitive Verbalization. *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 23(3), pp. 141-150, (2008)
- [6] Peirce, C.S. *Collected papers of Charles Sanders Peirce*. Vol.2, 1931--1958, Hartshorn et al. eds., Harvard University Press
- [7] 古川康一: スキルサイエンス, 人工知能学会誌, Vol.19, No.3, pp. 355-364, (2004)
- [8] K. Inoue: Linear Resolution for Consequence Finding, *Artificial Intelligence*, 56(2,3), pp. 301-353, (1992)
- [9] H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue: SOLAR: A Consequence Finding System for Advanced Reasoning, *Proc. TABLEAUX 2003*, LNCS Vol. 2796, pp.257-263, Springer (2003).
- [10] 大澤幸生, Nels E. Benson, 谷内田正彦: KeyGraph: 単語共起グラフの分割・統合によるキーワード抽出, 電子通信学会誌論文誌 J82-D1 No.2, pp.391-400 (1999)