

発想推論に基づく着眼点の発見 Discovering Knack by Abductive Reasoning

古川康一^{*1} 井上克巳^{*2} 小林郁夫^{*3} 諏訪正樹^{*4}
Koichi Furukawa Ikuo Kobayashi Katsumi Inoue Masaki Suwa

^{*1} 慶應義塾大学 Keio University ^{*2} 国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系
Principles of Informatics Research Division, National Institute of Informatics

^{*3} 慶應義塾大学 SFC研究所 SFC Research Institute, Keio University ^{*4} 慶應義塾大学 環境情報学部
Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

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 a problem of knack discovery as finding a key to accomplish hard performance tasks such as “increase sound volume” in playing the cello. We utilize an observed knack such as keeping the right arm close during bowing which is empirically known to achieve the given task. We use an abductive inference program called SOLAR to conduct new knack discovery. Especially, we point out the importance of existentially quantified logical formula to express hypotheses including logical variables representing missing knack 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測り知れない。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。しかしながら、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。それ以前はこの問題を解決できるような方法が見つからなかったが、この発見により十年来悩み続けてきた課題をついに克服することが出来た。また、このこと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[古川 05.09]。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[諏訪 04][Suwa08]、発想推論に基づくスキルの創造・診断支援[Kobayashi08]などである。これらの検討から、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存在することが明らかになった。

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着眼点の例である。ところで、この奏法が真に有用であるためには、その妥当性についての納得のいく説明が必要である。その説明を探していく過程で、より本質的な「隠れ着眼点」を発見するのがここでの目的である。

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[Peirce 58]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学的枠組みであり、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、フル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、補うべき仮説として存在限量された論理式を得ることが出来る。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。

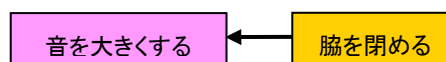


図2.1 観測された因果関係

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_bridge). そこでの弦の振動を維持するためには、次の 2 つが必要である: 1. 弓を安定させて動かさなければならない (stable_bow_move). 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_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). これらの因果関係を図示すると、図 2. 2 のような証明図で表現される。

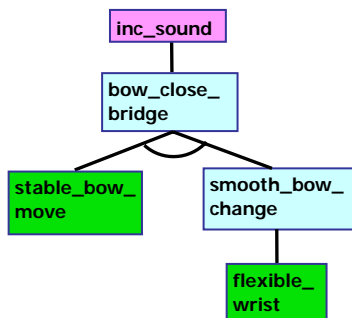


図2. 2 音を大きくするための弓と手首の動き

この図の下端にある二つのノードが同時に満たされれば、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、これら(手・手首と脇)の間の直接の因果関係を論じるのは無理がある。この事実、こ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、解剖学的にも手あるいは手首と脇の間には、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」[古川04]。この事実、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(uarm)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_uarm_impedance). ところで、都合のよいことに、この「上腕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つの下端ノードである stable_bow_move 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。本論文では、この推論図の完成を目指す、そのためには、新述語 increase_uarm_impedance を導入し、さらにそのノードと他のノードをつなぐ3つの因果リンクを見出さなければならない。

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、推論パスの空隙を埋める新述語である。経験的着眼点、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。

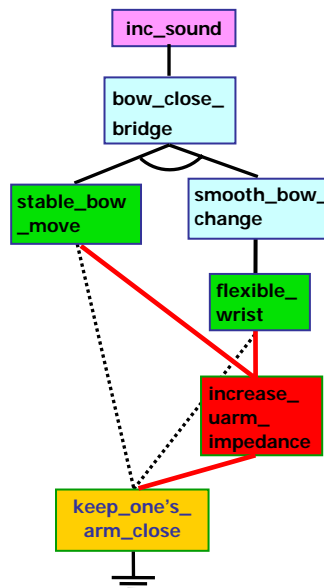


図2. 3 increase_uarm_impedanceノードの導入によって完結した推論パス。接地記号は対応ノードが事実として成り立っていることを示す。

3. 発想推論によるルールの見解

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 [Inoue92].

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フルの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 [Inoue92] があり、その実現システムに SOLAR [Nabeshima03] 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、帰納論理プログラミングにおいて**逆伴意(inverse entailment)**として知られた関係式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。

3.2 因果関係に基づく発想推論の形式化

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の目的となる。

因果連鎖を表現するために述語論理による形式化を行う。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:

$$\begin{aligned} caused(X,Y) &\leftarrow connected(X,Y). \\ caused(X,Y) &\leftarrow connected(X,Z) \wedge caused(Z,Y). \end{aligned}$$

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るならば、制約式として

$$\leftarrow connected(p,q).$$

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 $\neg connected(p,q)$ の節表現である)。

ここで注意を要するのは、 $connected$ あるいは $caused$ が含意関係のみならず、因果関係をも意味している、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 $connected(p,q)$ 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 新ノードの導入

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. 1):

$$\begin{aligned} caused(g, s). \\ caused(h, s). \\ \leftarrow connected(g, s). \\ \leftarrow connected(h, s). \end{aligned}$$

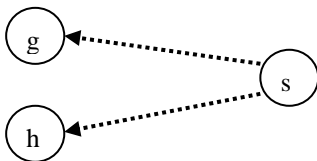


図3. 1 直接因果関係にない観測された関係

これらの観測を説明するために、 $connected$ を *abducible* 述語としたときのフル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。

$$\begin{aligned} \exists X. (&connected(g, X) \wedge connected(h, X) \\ &\wedge connected(X, s)). \end{aligned}$$

X は新述語に対応している(図3. 2)。ここで注目すべき点は、このような仮説を導入するためには、仮説言語をアトムだけでなく、このような存在限量式を許すように拡張しなければならない点である。我々が採用した仮説推論システム SOLAR は、3.1 節で定義したように、このような仮説を許している。

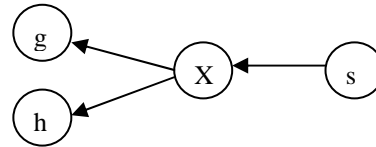


図3. 2 あるノード X を介した説明

別の解としては、複数のノードを介した仮説:

$$\begin{aligned} \exists X \exists Y. (&connected(g, X) \wedge connected(h, Y) \\ &\wedge connected(X, s) \wedge connected(Y, s)). \end{aligned}$$

も存在する。これは、 X と Y が別のノードである場合(図3. 3)やそれら同士が単一化する場合(図3. 2)などを含んでいる。

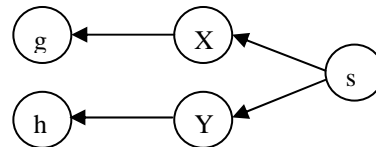


図3. 3 2つのノード X, Y を介した説明

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。

チェロの運弓動作におけ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:

$$connected(inc_sound, bow_close_bridge). \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} &connected(bow_close_bridge, stable_bow_move) \vee \\ &connected(bow_close_bridge, smooth_bow_change). \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$connected(smooth_bow_change, flexible_wrist). \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \leftarrow &connected(inc_sound, keep_arm_close). \\ \leftarrow &connected(stable_bow_move, keep_arm_close) \\ \leftarrow &connected(smooth_bow_change, keep_arm_close) \end{aligned}$$

ここで、(3.2)式はオブジェクトレベルでは含意式

$$bow_close_bridge \leftarrow stable_bow_move \wedge smooth_bow_change$$

に対応しているが、この式の導出過程を示す。

$$\begin{aligned} &bow_close_bridge \leftarrow stable_bow_move \wedge \\ &smooth_bow_change \\ = &bow_close_bridge \vee \neg stable_bow_move \vee \\ &\neg smooth_bow_change \\ = &bow_close_bridge \vee \neg stable_bow_move \\ &\vee bow_close_bridge \vee \neg smooth_bow_change \end{aligned}$$

$$= \text{bow_close_bridge} \leftarrow \text{stable_bow_move} \\ \vee \text{bow_close_bridge} \leftarrow \text{smooth_bow_change}$$

最後の式を `connected` で表現すると, (3.2)式が得られる.

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. SOLAR は, これらの観測事実を **G** として与えて, 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:

$$\exists X. (\text{connected}(\text{stable_bow_move}, X) \\ \wedge \text{connected}(\text{flexible_wrist}, X) \\ \wedge \text{connected}(X, \text{keep_arm_close})).$$

この論理式の X に `increase_uarm_impedance` を代入すれば, `increase_uarm_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_uarm_impedance` ノードから出ている3本の実線に対応している. ここで興味深いのは, メタレベルでは単に `connected` 述語のリテラルを要素とする仮説が得られているだけだが, それはオブジェクトレベルではルールに対応している点である. すなわち, ルールアブダクションが実現されている.

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52個の説明パターンを生成しており, 上の解はその中の一つである.

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, 次

$$\exists X. (\text{connected}(\text{stable_bow_move}, X) \\ \wedge \text{connected}(\text{flexible_wrist}, X) \\ \wedge \text{connected}(X, \text{keep_arm_close})).$$

を見れば分かるように, `stable_bow_move` 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 に何を代入すればよいのかはあらかじめ与えられてはいないが, `inc_uarm_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. これらの有用な情報は, ドメインに依存する. 身体スキルを扱う論理プログラムに記述される情報は, (1)姿勢などの観測可能なもの, (2)「脇を閉める」などの制御可能なもの, (3)スキルに関連する身体構造, などから構成するのが妥当である. 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. たとえば身体構造では, 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るように, 各部位の連なりを表現しておくことは有用である. 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とい.

これらの情報をあらかじめ用意しておくことによって, 得られた新述語の候補を列挙することが可能になると考えられる.

5. 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)因果関係を説明するために必要な隠れ着眼点を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, 着眼点を得られた.

本論文でメカニズムを提案した着眼点の発見方式が, 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. 多くの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. 導入された新述語の同定問題についても, ユーザーとのインタラクションを活用する道を探るアプローチも実現性が高いと思われる.

着眼点の発見を促進する実用システムの開発までの道程はまだ遠いが, 本研究によってその第一歩を踏み出すことができたと考えられる.

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

- [古川 05] 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)
- [古川 09] 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, (2009)
- [Kobayashi08] 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)
- [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)
- [Suwa08] 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)
- [Peirce58] Peirce, C.S. Collected papers of Charles Sanders Peirce. Vol.2, 1931--1958, Hartshorn et al. eds., Harvard University Press
- [古川 04] 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)
- [Inoue92] K. Inoue: Linear Resolution for Consequence Finding, *Artificial Intelligence*, 56(2,3), pp. 301-353, (1992)
- [Nabeshima03] 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).