

規則発想推論を用いたスキル獲得支援における領域知識を利用した仮説の選択

Hypothesis Selection using Domain Theory in Rule Abductive Support for Skills

小林郁夫^{1*} 古川康一²
Ikuo Kobayashi¹ Koichi Furukawa²

¹ 慶応義塾大学 SFC 研究所

¹ SFC Institute, Keio University

² 慶応義塾大学 政策・メディア研究科

² School of Media and Governance, Keio University

Abstract:

In skill science framework, We have studied for supporting of performer – mainly cello player – with employing logical computation systems. In one hand, we suggested to derive hypotheses representing possible ways to given certain performance tasks using an Abductive Logic Programming (ALP) system. On the other hand, we suggested method called rule abduction, which find possible rules explaining observed ‘knacks’ as reasonable performing method. There remain many things those must be solved. For example, we should show some directions to select better hypotheses from derived by ALP or rule abduction. In this article, we deal with further problems. When novel rules are abduced by rule abduction, some of them would have undefined nodes those should be given some adequate meaning. We build 2 databases for cello playing domain which can provide information for aiding decision of meaning of such nodes by the performer. Using the same databases, we try selecting hypotheses derived by our existing system.

1 はじめに

我々は、スキルサイエンス研究の一環として、チェロの演奏の支援について考えてきた。そこでは、演技者本人=演奏者に対する支援または演技の指導に当たるコーチ=指導者をユーザと考えている。

我々は、発想論理プログラミング (ALP) システムを用いた支援手法を提案した [KobFur 08]。そこでは、一定の実現したい演技タスクについて、演技者の身体および演技にかかわる知識を演技者ないし指導者が論理プログラムとして記述し、そのプログラムに登場するあらかじめ定めた命題の部分集合として可能なモデルを候補仮説、すなわち、あり得るタスクの実現方法として、ALP システム PrologICA [RayKak 06] に提案させた。この際、MIC [UenFurBai 00] と呼ぶ制約的な知識が仮説の絞り込みに重要な役割を果たすことが [KobFur 08] で示された。

上述の方法は、ユーザがシステムに与えた論理プログラムについて、そこに登場する命題の真偽のみをシステムに提案させるものである。一方 [FurKobInoSuw 09] において、我々は与えたプログラムに含まれない新たなルールを機械的に導出する手法についても提案した。我々は、この方法をルールアブダクションと呼んでいる。

これら 2 つの手法は、それぞれ発想推論 (アブダクション) に基づいている。いずれの手法でも、タスクを実現するための技法の候補となる仮説が導出された点で、演技への支援が実現できた。しかしながら、双方の場合において、重要な選択問題が残る。PrologICA による候補仮説の提案では、解決案として複数の仮説が出た場合に、どれをより望ましいものとして選び出すかという問題がある。他方ルールアブダクションにおいては、導出された仮説候補たる節型ルールの中で有用なものを選択することもさることながら、ルールに新しい未定義のノード (以下、空隙ノード) が現れた場合の解釈の問題が残る。

本稿では、上述のルールアブダクションによって求めた空隙ノードの可能な解釈を別に構築した領域知識

*連絡先：慶応義塾大学 SFC 研究所
〒 242-8520 神奈川県藤沢市遠藤 5322
E-mail: ikuokoba@sfc.keio.ac.jp

ベースから引き出す方法について述べる。

2 SOLAR を用いたルールの発見

SOLAR [NabIwaIno 03] では、一階述語論理の標準節形式で与えられた観察と背景知識に矛盾しない、観察を満たす説明を発見することができる。説明は計算によって求められた帰結節の否定として求められる。帰結節の形式としては、使用する述語を制限することや、長さを制限することができ、求めたい説明に効率的にアプローチできる。我々は、[FurKobInoSuw 09] において、SOLAR を用いて説明ルールを発想推論した。タスクの実現に関係する身体の動きについて背景知識としてあたえ、演奏者が一定のタスクを実現することに成功したときの観察を説明するルールを計算させた。

図 1 に SOLAR に与えられた節集合を示す。背景知識と観測の表現は、因果関係に基づく形をとっており、 $connected(X, Y)$ という述語は Y が X の直接の原因であると認めていることを、 $caused(X, Y)$ という述語は Y から X への因果関係の連鎖を認めることを記述している。 X や Y で示される項には、タスクの実現に関係する過程がノードとして入る。たとえば、「脇を締める」という運動や、「弓の返しがスムーズになる」というパフォーマンスがそれに当たる。この例は、チェロの弓を引く右腕を体幹に引き付ける（すなわち、脇をしめる）ことで運弓のパフォーマンスが改善される、という演奏者自身の経験を観測とし、これに既知の知識を背景知識として加え、これらから観測についての説明を引き出そうとするものである。

o1 では説明したい観測を記述している。節 b1, b2 で因果関係をみとめるメタレベルのルールを記述し、b3 から b5 で対象レベルの知識を記述している。このうち b4 は、「スムーズな弓返し」と「安定した弓の動き」が同時に実現したとき必ず「コマに近いところでの運弓」が実現するという知識を表現している。b3 から b5 は脇を締めることを 3 つのノードで表現される目標タスクの実現の直接的な原因として認めていないことを示している、この問題を解決することがルール・アブダクションを実行する目的となっている。

ここから、52 の帰結節が可能な結果として引き出された。その中のひとつが以下のようなものである。

```
sol1: [-connected(stable_bow_movement, _0),
       -connected(_0, keep_arm_close),
       -connected(flexible_wrist, _0)]
```

これを説明として用いることのできるルールの形にすると、以下ようになる。

```
sol1a: connected(stable_bow_movement, X0).
sol1b: connected(X0, keep_arm_close).
sol1c: connected(flexible_wrist, X0).
```

```
o1: [-caused(inc_sound, keep_arm_close)]
b1: [+caused(_0, _1), -connected(_0, _1)]
b2: [+caused(_0, _1), -connected(_0, _2),
     -caused(_2, _1)]
b3: [+connected(inc_sound,
               bow_close_to_the_bridge)]
b4: [+connected(bow_close_to_the_bridge,
               smooth_bow_direction_change),
     +connected(bow_close_to_the_bridge,
               stable_bow_movement)]
b5: [+connected(smooth_bow_direction_change,
               flexible_wrist)]
b6: [-connected(inc_sound, keep_arm_close)]
b7: [-connected(stable_bow_movement,
               keep_arm_close)]
b8: [-connected(smooth_bow_direction_change,
               keep_arm_close)]
```

図 1: ルールアブダクションの問題事例

この説明は、うまくいった演奏の経験を説明する候補になりえる。脇を締めることが $X0$ というノードで示される何らかの過程を招き、安定した弓の動きおよび手首の柔軟を実現することを示している。これらと図 1 に示された背景知識をあわせることで、脇を締めることが音を大きくすることの説明ができる。ところが、このノード $X0$ (以下、空隙ノード) には解釈があたえられていない。こういったノードにどのような解釈を与えればよいのかについて、候補を絞ることを考えてみたい。

3 提案手法

本稿の研究は、空隙ノードに与えるのに適切と思われる解釈を見つける方法を提案するものである。この目的のために、候補となる概念を含んだデータベースを持つことが有用と考える。ここでは、第 1 節で述べた PrologICA によるスキル支援のために記述した論理プログラムの背景知識をデータベースに記述する情報の根拠として用いることにする。これは、既存の知識を正しいと信じるのであれば、それに存在論的に近いルールが因果関係として有効ではないかと期待するためである。

3.1 分類された命題を用いたルールのデータベース

1 節で述べた PrologICA によるシステムを使ったスキル発達支援では、5 つの課題プログラムに計 45 個の

命題論理の Horn 節ルールが使われている。これらルールには、制約型である MIC 6 個を含め、チェロの演奏に関する知識が記述されており、51 個の命題語彙が使われている。これらの命題が表現する対象は、SOLAR システムにおける caused 述語および connected 述語の項、すなわち因果グラフのノードが表現する対象に相当する。ルール節は、たとえば以下のような形をしている。

```
pr1: rapidPositionShift :-
    addAbdOfShoulder, addAbdOfElbow.
mic1: ic :- stretchArm, activeShoulderMscls,
    not violate_aSM.
```

pr1 は頭部に 1 つの命題が現れるポジティブルールの例、mic1 は MIC と呼ぶ制約型ルールの例である。mic1 の頭部の ic は対象世界で意味をもつ命題ではなく、その節が一貫性制約であることを示しているのみであり、ic を取り除けば一般的な prolog プログラムにおける否定節と同様の表現となる。

pr1 の本体部にある 2 つの命題は、演奏者の体の部分の動きをあらわしており、同一の種類と考えられる。このように、対象世界の存在論的観点から 51 の命題を 11 分類し、個々のルール節に含まれる組み合わせを検討した。

ポジティブルールに関しては、本体部の各命題と頭部の命題との因果関係を考える。表 1 にこの結果をまとめる。pr1 においては、addAbdOfShoulder と addAbdOfElbow がそれぞれ rapidPositionShift に対して因果関係を持っていると考え、「運動 左手タスク」の関係が 2 組確認できる。

一方、MIC に関しては、本体部に登場する各命題間の関係を考える。mic1 では、stretchArm が「運動」、activeShoulderMscls が「筋活性」、violate_aSM が「MIC 違反」に分類されているので、「運動」「筋活性」、「運動」「MIC 違反」、「筋活性」「MIC 違反」それぞれ各 1 組を確認できる。表 2 にこの結果をまとめる。

3.2 身体部位の近接性データベース

各命題分類は、筋活性なら「位置する体の部位」と「活性の度合い」、運動なら「停止/並進運動/関節周りの運動の別」「運動する部位」「回転方向(回転軸)」「運動の速さ」など、それぞれ固有の属性の組をもっている。これらの属性のうち、身体の部位を特定するものが、運動、柔軟、インピーダンス、慣性モーメント、筋活性、意識の 6 分類に存在している。登場する部位は近接性についての情報に着眼する形でデータベース化できる。

(頭部命題)	(本体部命題)									
	bw	mv	lh	fx	bwfx	pf	imp	im	ma	conc
bw:運弓	6	2		1	1	5				
mv:運動		5	1				2		6	1
lh:左手タスク		5	2							
fx:柔軟				1					6	
bwfx:運弓と柔軟				1						
pf:パフォーマンス		1	1			1				
imp:インピーダンス										2
im:慣性モーメント		1								
ma:筋活性										
conc:意識										

表 1: 背景知識のポジティブルールにおける頭部命題と本体部命題のペアリング

	mv	ma	vl	im	pf	bw
mv:運動	1	2	1	1		
ma:筋活性	2		1			
vl:MIC 違反	1	1				
im:慣性モーメント	1					
pf:パフォーマンス						1
bw:運弓					1	

表 2: MIC における拮抗関係

近接性の記述に使用する関係性は「隣接」「部分」の 2 種とし、それぞれ 2 項関係とした。たとえば、「右上腕筋強活性化」の身体部位は「右上腕」、「右肘柔軟上下動」のは「右肘」、「右腕伸展」のは「右腕」であり、「右上腕」と「右肘」は隣接関係、これらそれぞれと「右腕」とは部分関係である。

3.3 適切な仮説の選択

データベースを利用することで、アブダクションシステムによって提案された諸仮説について、既存の理論においてよく現れたタイプのルールであるかという基準による評価が可能になる。ここで考える基準は、「既存の理論において利用されているタイプの因果関係のみを使用することができる」という基準である。この「タイプ」の意味するところは、前々項でデータベースにまとめた論理プログラムにおける本体部と頭部の命題のペアリングである。すなわち、1 の各要素がルールのタイプに相当する。数字の入っていないセルのタイプのルールは利用しないということである。

前の節で述べたように、この問題に対しては、52 の仮説がアブダクションシステムによって示された。このうち、以下に示すひとつの解について実地にあてはめて説明する。

```
sol2: [-connected(
    smooth_bow_direction_change,
    _0),
    -connected(_0,_1),
    -connected(_1,keep_arm_close),
    -connected(stable_bow_movement,
    smooth_bow_direction_change)]
```

これを説明として用いることのできるルールの形にすると、以下ようになる。

```
sol2a: connected(
    smooth_bow_direction_change,
    X0).
sol2b: connected(X0,X1).
sol2c: connected(X1,keep_arm_close).
sol2d: connected(stable_bow_movement,
    smooth_bow_direction_change).
```

sol2で表わされる説明には、因果の経路として sol2d, sol2a, sol2b, sol2c によって表わされる経路 *pass_{2dabc}* が現れている。空隙ノード X0, X1 を埋めることのできる組合せとしては、以下の6通りがある。

<X0, X1> =: <運動, 運動>, <運弓, 運動>, <運弓, 運弓>, <パフォーマンス, 運動>, <パフォーマンス, 左手タスク>, <パフォーマンス, パフォーマンス>.

これらの各命題分類選択について、命題分類によるルールデータベースを用いて点数を与えることが考えられる。<X0, X1> = <運動, 運動>とした場合について考える。stable_bow_movement, smooth_bow_direction_change, keep_arm_close の命題分類は、それぞれ、「運弓」、「運弓」、「運動」なので、表1の各要素をあてはめると、sol2d:6, sol2a:2, sol2b:5, sol2c:5となる。これらを足し合わせて、因果の弧の数(sol2は4つを含んでいる)で割ると、 $18/4 = 4.5$ となる。sol2への命題割り当ての他の可能性についてみると、5, 4.75, 4.25, 4.25, 3.25であり、最も既得の規則群と親和性が高いのは、5点の割り当て <X0, X1> = <運弓, 運動>。ということになる。

同様に、他の解についても空隙ノードへの命題分類の割り当てのうえ、得点の計算が可能であるので、この方法で解を順位づけることが可能になる。

ここで、別の解について試みる。sol1で表わされる説明には、因果の経路として sol1a と sol1b によって表わされる経路 *pass_{1ab}* と、sol1c と sol1b によって表わされる経路 *pass_{1cb}* の2本が存在している。いま、*pass_{1ab}* に着目すると、X0を埋めることのできる命題の分類として「運弓」「運動」「パフォーマンス」の3種があることがわかる一方、*pass_{1cb}* に着目すると、X0を埋めることのできる命題分類が存在しない。

今回の基準では、sol1のように点数が与えられない

解が存在するが、これらがすべて最下位に並ぶことになるのは今後の検討課題である。

3.4 空隙ノードの意味の推測

表1は、個々のルールを特徴づけて分類しており、既存の知識を系統だてている。sol1aからsol1cで表わされる説明では、keep_arm_closeという「運動」分類の命題からノードX0が結果し、さらにそこから「運弓」および「柔軟」分類の2つのノードが結果している。表1に示した、既に知識として使用しているルールと同種のものだけをルールとして承認することとすると、X0に割り当て可能な分類はないことがわかる。そこで条件を緩和し、X0を経由する因果の経路2つのうち、1つでも成立するものを探すことにする。keep_arm_closeからflexible_wristに至る経路では、割り当て可能な命題分類は存在しないが、stable_bow_movementに至る経路では以下のような3通りの割り当てがありえる。

X0 =: 運弓, 運動, パフォーマンス.

さらに前項の近接性データベースに基づいて、身体部位を推測することが考えられる。keep_arm_closeの身体部位は「右腕」である。一方、stable_bow_movementは運弓分類であり、身体部位の属性を持たないが、「右手先」に割り当てることとする。さらに、flexible_wristの身体部位は「右手首」である。「右手先」、「右手首」は「右腕」の部分であるので、隣接関係にはない。そこで、keep_arm_closeの身体部位属性も、「右腕」からその任意の部分に下げることとする。候補としては「右肩」から「右手先」まで、7種類の部位が挙げられる。これらに対して、ルールの本体部と頭部が近接するようにX0に身体部位を割り当てる。

結果として、命題分類データベースと身体部位近接性データベースの両方の知識から導かれる空隙ノードの意味解釈は、

X0 =: 運弓, 運動 (右手先), 運動 (右指付け根),
運動 (右手首), 運動 (右前腕), 運動 (右肘),
運動 (右上腕), 運動 (右肩), パフォーマンス

の9通りとなる。これに当てはまる解釈としては、たとえば、「右肘固定」などが考えられる。

4 おわりに

本稿では、我々の既存の研究におけるスキルルールの導出について、既存の理論との親和性の基づく仮説の蓋然性、および空隙ノードの解釈の観点から進展を試みた。前節で最終的に例示した説明は、われわれが本来期

待している解釈とはかなり違ったものになってしまっている。直感的には、上腕における筋の活性や同じく上腕のインピーダンスの高まりなどによる補完的説明が突き止められることが望ましいと考えられる。

このためには、命題の各分類の性質をより精緻にすることが課題としてあげられる。たとえば、運弓や左手タスクのようなタスクを表す命題分類においては、属性を追求しきれなかった。各命題の性質を検めることは、この領域の知識を洗いなおすことにつながる。これに関しては、演奏者としてチェロの演奏を実際に行いながらの検証が不可欠と考える。

客観的な説明を求めることを期待するのではなく、あくまでユーザ本人にとって有用な支援環境であることが重要となる。そのためには、特に演奏者の主観に基づいた命題の規定があくまで重要となる。本稿でとりあげた問題は、ややもすると人体という機構についての客観的な立場からの立論とプログラム語彙の規定に偏る危険があり、演奏者として実際に感じることのできる感覚を概念として使用する必要がある。

この点を踏まえ、演奏者としての主観に立脚しながら、既存の概念の再構成を行っていく必要がある。本稿で命題に繰り込まれている概念をあえて括りだしたことは、命題間に因果ルール上での結合関係だけでなく、存在論的な意味的關係を持ち込む意味合いがある。この存在論の援用が、単なるコーチによる客観的観測にとどまらず、演奏者本人の考察を通じ、演奏中にも概念の再検討を行うためのよりどころとなっていくことが重要である。共通する部分の多い概念を同類として認識することは、認知の効率も高め、実時間での対応が必要な身体技能の向上には欠かせない点であると考えられる。

参考文献

- [FurKobInoSuw 09] 古川康一, 小林郁夫, 井上克巳, 諏訪正樹: 発想推論に基づく着眼点の発見. 身体知研究会, 2009.
- [KobFur 08] Kobayashi, I., Furukawa, K.: 'Modeling Physical Skill Discovery and Diagnosis by Abduction', 人工知能学会論文誌, Vol.23, No.3, 2008.
- [NabIwaIno 03] 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.
- [RayKak 06] Ray, O., Kakas, A.: 'ProLogICA: a practical system for Abductive Logic Programming', Proceedings of the 11th Non Monotonic Reasoning Workshop, pp.304-314, 2006.

[UenFurBai 00] Ueno, K., Furukawa, K., Bain, M.: 'Motor Skill as Dynamic Constraint Satisfaction', Electronic Transactions on Artificial Intelligence, Vol.4, Section B, pp.83-96, 2000.