

技能における適応型学習を目指した

ACT-R 援用知識検索過程シミュレーション

Simulation of Knowledge Retrieval Process Using ACT-R for Adaptive Learning in Skill Acquisition

野上 真[†]
Shin Nogami北島 宗雄[†]
Muneo Kitajima中平 勝子[†]
Katsuko T. Nakahira

1 はじめに

適応型学習は、多くの学習コンテンツと学習者の学習履歴を分析し、学習者個人に適した指導を提供する学習法である。

技能教育では指導者が学習者に対して指導者自身の経験をもとに学習者の理解度などを把握することで指導が行われる場合が多い。技能教育の支援方法として宋ら [4] のように熟達者の映像や指導方法の学習コンテンツの提供や、山下ら [5] のように実際の技能試験に対する成績によって実際に行う指導の最適化を目指す方法が行われている。しかし、これらの方法は特定の技能に対するアプローチとしては非常に効果的であるが、様々な技能に共通した適応型学習に向けたデータとして用いることが難しいと考えられる。技能の場面で適応型学習の実現を目指す際に課題となるのが、技能の多様性と個人差の理解である。技能の種別によって求められる要素は様々であり、定量的に分析することは難しい。そこで、技能教育に対する適応型学習の実現を目指すためのアプローチの一つとして、技能に対して人間の認知過程理解による個人差や習熟度の分析を提案する。本稿では、技能教育場面での適応型学習実現に向けた基礎研究として、技能の中でも楽器演奏をモデルとして、認知アーキテクチャの一種である ACT-R 理論を援用し、演奏の初期段階である読譜の際に起こる知識検索過程の個人差理解を目指したシミュレーションを行う。

本研究では、読譜は知覚・認知プロセスであり、実際の打鍵や運指練習などは含まないものとする。個人差となる要素として、保持している記憶、知覚した情報との一致度と減衰率、利用時の学習率や知識検索が成功するかの閾値などを設定し、読譜を「知覚情報から知識記憶の検索」行為としてプロダクションルールを設定しシミュレーションを行う。

2 シミュレーション設計

2.1 チャンク設計

本稿では、野上ら (2023) に基づき、4 分の 3 拍子、1 小節の長さの中で表現可能な複数符頭の組み合わせを知識チャンクとして定義し、その例を図 1 に示す。

利用可能チャンクは全 30 種となる。



(a) 知覚情報

フレーズ1
Isa 覚えているフレーズ
Note1 八分音符
Note2 八分音符
Note3 四分音符
Note4 四分音符
Note5 nil
Note6 nil
Name フレーズ1

(b) ACT-R 式知識チャンク表現

図 1 知識チャンク例

2.2 活性方程式

各チャンクの活性値は以下の活性方程式によって求められる [1][3].

$$A_i = B_i + \sum_j W_j S_{ji} \quad (1)$$

$$B_i = \beta + \ln \left(\sum_k t_k^{-d} \right) + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

$$S_{ji} = \ln R_{ji} \quad (3)$$

$$R_{ji} = \frac{\alpha \times R_{ji}^* + F(C_j) \times \frac{P_e(N_i|C_j)}{P_e(N_i)}}{\alpha + F(C_j)} \quad (4)$$

式中の基礎活性 B_i は過去の使用履歴が反映しチャンク活性の強化を、原始活性 W_j は知覚された情報に均等に配られる注意の大きさを、連合強度 S_{ji} は、知覚されたチャンクとその要素との間の結びつきを表す。

2.3 検索確率

知識検索を行う際に各チャンクの活性値をもとに検索する知識チャンクを決定するが、そのチャンク検索が成功する確率を以下の検索確率方程式によって求める。

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(A_i - \tau)/s}}; \quad s = \frac{\sqrt{3}\sigma}{\pi} \quad (5)$$

σ は基礎活性 B_i に発生する二種のノイズの標準偏差の値より求められる。この式における τ は閾値であり、 $A_i - \tau$ の値が大

[†] 長岡技術科学大学

Nagaoka University of Technology

きいほど検索が成功しやすくなる。本研究において、 τ は学習が進むごとに検索が容易になると考え、 τ が時間経過とともに減衰するとした。この時、 τ は初期値を学習中の活性値 A_i の最大値から最大値-(最大値-最小値)/ x まで直線的に減衰するものとする。 x はチャンクの複雑さ(符頭数)によって設定され、本実験では符頭数が 2 以下の時 $x = 32, 3$ の時 $x = 16, 4$ 以上の時は $x = 2$ のように設定する。

2.4 照合方程式

知識検索を行う際には知覚した情報と特徴が部分的に一致するチャンクが検索されやすくなる。この時、知覚情報と知識チャンクとの類似度は活性値 A_i からの減衰によって反映され、マッチスコア M_{ip} は以下の照合方程式によって求められる。

$$M_{ip} = A_i - D_{ip} \quad (6)$$

$$D_{ip} = p_k \times |Miss_{note}| + p_l \times |Miss_{pos}| + p_m \times |Miss_{set}| \quad (7)$$

本稿では減衰率 D_{ip} は式 7 によって定義し、その中で 3 種の類似度の要素を以下のように定義する。

- $Miss_{note}$ 知覚した情報と記憶内のチャンクの符頭数の差
- $Miss_{set}$ 知覚した情報と記憶内チャンクの組み合わせの一致度
- $Miss_{pos}$ 知覚したチャンクと記憶内チャンクの符頭位置の一致度

上記の 3 要素の発生割合は個人特性の一つとして変化する。

2.5 チャンク選択確率

照合方程式をもとに得られたマッチスコアによって利用する記憶チャンクは選択されるが、実際には確実に選択されるわけではなく、確率的に間違いが発生する。各チャンクが選択される確率は以下のチャンク選択確率方程式によって求められる

$$P_{choice} = \frac{e^{M_{ip}/t}}{\sum_j e^{M_{jp}/t}} \quad (8)$$

2.6 期待利得

知識検索の過程において、複数のプロダクションルールが同時に条件部を満たす場合がある。この時にはどのプロダクションを利用すべきかを経験によって判断している。この時にプロダクションの価値を決定する期待利得 E_g は次の期待利得方程式によって求められる。

$$E_g = PG - C \quad (9)$$

P はこのプロダクションが選択されたときの成功確率、 G はそのプロダクションのゴール価値、 C はプロダクション実行時にかかる時間である。この時のプロダクションの成功確率 P は各チャンクを選択したときのプロダクションの成功確率 q とプロダクションが成功したときの最終的なゴール成功確率 r の積で求められる。本研究内ではチャンク検索に成功したときにプロダクションが成功し、チャンク検索成功がゴールとなるため、

q は検索確率とチャンク選択確率の積、チャンク検索が成功したときに必ずゴールが達成されるため r は 1 となる。プロダクションにかけられるゴール価値 G は演奏時に自然に聞こえる範囲であると想定し、各楽曲の楽譜に記載されている BPM、拍子 $beat$ をもとに 1 小節にかけられる時間を設定する。チャンク検索時の C は MHP に基づき、知覚プロセッサ、認知プロセッサ、運動プロセッサのサイクル時間から設定する [2]。

2.7 楽曲設計

本実験では前述のフレーズパターンを利用し、複数のフレーズが登場する列を作成し、これを楽曲として扱う。楽曲の長さは 24 小節、拍子は 4 分の 3 拍子とし、全楽曲に共通する条件として、「曲中最後の小節(24 小節目)には楽曲の終止形として本実験内最長音である付点二分音符一つで構成されるフレーズ種を設定する」、「曲中に [八分音符、八分音符、四分音符、四分音符] の 4 符頭で構成されるフレーズ種が 1 回以上含まれる」を設ける。1 つ目の条件は楽典の初心的な法則として、楽曲の最後は調音をとる和音や単音によって終了するケースが多いからである。2 つ目の条件は条件の異なる楽曲間で結果比較を行うためである。作成楽曲に登場するフレーズ種は以下の条件を組み合わせて選択を行う。

- 登場フレーズ種数
- 登場音価種数
- フレーズ内の符頭数

上記条件に合わせて作成した楽曲は表 1 の組み合わせとなる。

この条件を満たすようにチャンクを選定し、終止形のチャンク以外の登場回数が楽曲内で均等になるように個数を設定、並び順はランダムになるように楽曲を作成した。また、本稿では共通して登場する「八分、八分、四分、四分」のチャンクをチャンク α 、終止形となる付点二分 1 つのチャンクをチャンク β とする。

2.8 パラメータ設定

本稿では特徴の異なる 3 種のグループを想定し、楽曲に対して BPM=80 のテンポで 5 回繰り返し練習する状況を想定し、知識検索の過程をシミュレーションする。

各グループについては、以下のように特徴を設定する。

- G_a 学習時の揺らぎが小さく、効果的に学習が進むグループ
- G_b 揺らぎが平均的に練習が進むグループ
- G_c 学習時の揺らぎが大きく、学習が進みにくいグループ

各グループのパラメータは表 2 のように設定する。

本実験では 4 分の 3 拍子、BPM=80 であるため、理想的なペースの時のゴール価値 G は 2.25(sec) となる。 G は全グループ共通の値をとり、最初はある程度時間をかけてよいものとし、1 回目は理想的な G の倍である 4.5 を Gt とし、5 回目の練習で $G = 2.25$ となるように曲線的に短くなるような条件を設定する。各練習回の G は表 3 のようになる。

また、検索時のコスト C は、MHP の知覚プロセッサの平均

表 1 作成楽曲

	A	B	C	D	E	F	G	H
登場フレーズ種数	8	8	4	4	8	8	3	4
フレーズ内の符頭数	1,2,3,4,5,6	1,3,4,5,6	1,3,4,5	1,3,4,5	1,3,4	1,3,4	1,4	1,4
登場音価種	5	3	5	3	4	3	4	3

表 2 実験パラメータ設定

発生位置	変数名	G_a	G_b	G_c
B_i	ε_1	0.3	0.5	0.7
	ε_2	0.3	0.5	0.7
	d	0.7	0.5	0.3
S_{ji}	α	0.05	0.005	0.0005
M_{ip}	ミスマッチの重み	0.01	0.025	0.05
期待利得	検索コスト C	0.17	0.17	0.17

表 3 各練習回時の G

練習回数	1	2	3	4	5
G	4.5	3.34	2.80	2.48	2.25

サイクル時間である 100(ms), チャンク検索にかかる時間を認知プロセッサの平均サイクル時間である 70(ms) の和を C とする.

3 実験結果

本稿では, 楽曲構成の大きく異なる楽曲 A,H の二種のから共通して登場するチャンクについての検索過程の結果は以下の通りであった.

楽曲 A は登場フレーズ種, 符頭数の種類, 音価種のすべての要素が最も多く最も複雑で難易度が高い楽曲であり, 対照的に楽曲 H はすべての要素が最も少なく簡単な楽曲として設計した. 本稿では各グループごとに 30 試行分のシミュレーションを行い, その平均値を各グループの結果とする. 共通して登場する「八分, 八分, 四分, 四分」のチャンクをチャンク α , 終止形となる付点二分 1 つのチャンクをチャンク β とする.

3.1 期待利得の変化

練習時の期待利得の時間変化の結果を図 2 に示す.

チャンク α, β ともに大きく上昇している箇所があり, その後減少するといった振る舞いを見せているがこれは利用されたことによって学習が進み, 期待利得が上昇, 利用されない期間があることで減衰すると捉えることができる.

同一チャンクを比較したとき, チャンク α は楽曲 H の期待利得が大きくなっている. これは楽曲毎の同一チャンクの登場回数によって差が出ており, 登場フレーズ種数が少なくチャンク α の登場回数が楽曲 H の方が多いことが影響していると考えられる. また, グループ間を比較したとき, 両楽曲ともに $G_a > G_b > G_c$ の順で期待利得の値, 値の変化が大きくなっている. これはグループごとのパラメータ設定が影響している

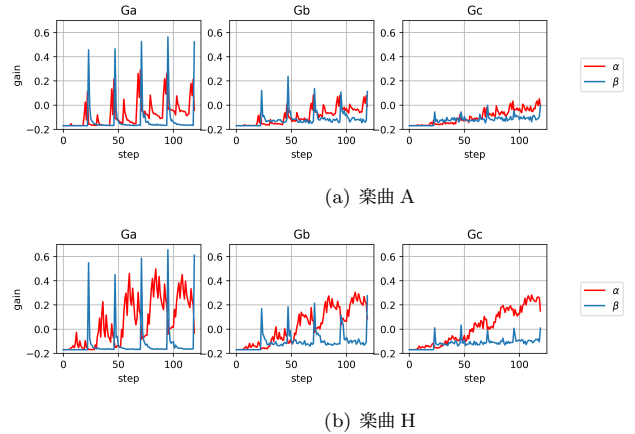


図 2 期待利得の時間変化

考えられる.

3.2 チャンク検索確率とチャンク選択確率の変化

期待利得は式 9 によって求められるが, 本研究では C が固定であり, G も練習が進むごとに小さくなるが練習の間では固定であるため, P によって大きく値が変化すると考えられる. P は各チャンクの検索成功確率とチャンク選択確率の積によって求められる. この二つの確率の変化を以下に示す.

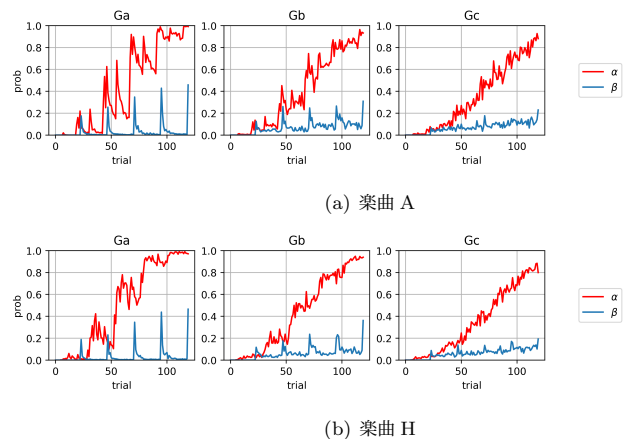


図 3 検索確率の時間変化

3.3 チャンク検索確率の変化

練習時の検索確率時間変化の結果を図 3 に示す. 検索確率はチャンク α は時間経過とともに 1 に近づいているが β の方は低い値を維持している. これは τ の値の減衰率の差が大きく影響していると考えられる. チャンク β は符頭数が 1 であり, τ

の減衰率が極めて小さいことから、活性値 A_i よりも閾値 τ の方が大きい状態が続き、検索が成功しづらくなっている。一方でチャンク α は符頭数が 4 であり、 τ の減衰がチャンク β に比較して大きくなっている。さらに登場回数も多いことから、活性値 A_i も上昇していることから検索確率が高くなっている。グループ G_a と G_c を比較したときにチャンク α, β ともに G_a の方が上昇、減衰の幅が大きくなっている。これは活性方程式のうち、基礎活性 B_i の要素である減衰率 d が大きく影響していると考えられる。 d によって利用していない時間での減衰が決まるため、減衰率の大きい G_a では利用されてから次に利用されるまでの間で大きく検索確率が下がっている。

3.4 チャンク選択確率の変化

チャンク選択確率の結果を図 4 に示す。

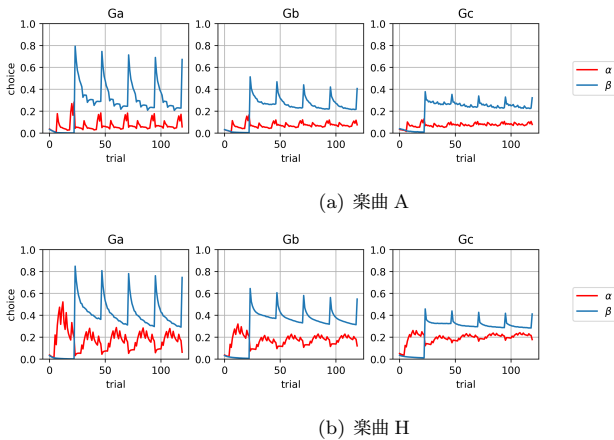


図 4 チャンク選択確率の時間変化

チャンク選択確率は検索確率や期待利得とは異なり、チャンク β の方が高くなっている。

これは式 8 よりマッチスコア M_{ip} が影響していると考えられる。 M_{ip} は活性値から一致度に応じて減衰したものであるがこの活性値は利用回数とチャンクの複雑さによって大きく変化する。本研究内ではチャンクの複雑さは特に符頭数の差であり、その差によって原始活性 W_j の値が大きく変化する。また付点二分音符はチャンク β のみに登場する音価であり、連合強度 S_{ji} も大きくなる。それと比較した場合チャンク α の構成音価は八分、四分の二種類であり、他の多くのチャンクにも登場するため、個々の知覚情報に対する S_{ji} が強化されにくくなっている。これらの影響により、登場回数の少ないチャンク β であってもチャンク α や他のチャンクよりも M_{ip} が大きくなり、選択確率が高くなったと考えられる。

3.5 楽曲正答率の変化

各ステップにおいて最も期待利得が高かったチャンクを選択したと仮定し、そのチャンクが実際の楽曲と一致していた時を正解とする。この時の各練習回の正解数を表 4 に示す。

楽曲 A では正解数が練習回が進むごとに正解数が減少傾向にあり、一方で楽曲 H では G_a のみではあるが正解数の上昇が見られる。これは楽曲難易度の差、特に同一チャンク種の登場

表 4 楽曲 A 各練習時正解チャンク数

		練習回	1	2	3	4	5
楽曲 A	G_a		20	20	18	17	16
	G_b		16	16	16	13	10
	G_c		15	10	12	13	11
楽曲 H	G_a		16	20	19	20	20
	G_b		12	14	9	9	13
	G_c		11	8	8	8	8

回数が影響していると考えられ、楽曲 H は G_a に対しては学習が促進可能な楽曲であると考えられる。また、 P に関連する検索確率や選択確率の強化が不足している、またはチャンク検索にかけられる時間である G が正解を得るには不足していると考えられる。

4 まとめと今後の課題

本稿では、技能における読譜の認知過程再現を目指し、ACT-R 援用シミュレーションを行い、知覚された情報から記憶チャンクの検索プロダクション実行する際の期待利得を検索確率方程式や期待利得方程式により求め、様々な要素をパラメータとして結果を考察した。結果として、期待利得までの計算が可能であり、記憶の減衰率、記憶検索の閾値が大きく個人差要素として大きく関わっており、時間コストや楽曲難易度の外部要素に影響することが分かった。今後の課題として、打鍵や運指の時間コストまで含めたプロダクションでの知識検索過程の再現、間違いを含めた演奏過程の再現を目指していく。

謝辞

本研究の一部は科研費 JSPS(22K02840 , 代表:新潟経営大学・落合純) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] John R. Anderson and Christian J. Lebiere. *The Atomic Components of Thought (English Edition)*. Psychology Press, Kindle 版, 1 2014.
- [2] Stuart K. Card, Thomas P. Moran, and Allen Newell. *The Psychology of Human-Computer Interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1983.
- [3] 野上真, 中平勝子, 北島宗雄. 知識の個人差を取り入れた認知シミュレーションによる読譜時エラーの系統化. *FIT2023*, 2023.
- [4] 宗陽一郎, 江部宏典, 檜崎博司, 中村英夫. Ict を活用した技術・技能教育支援システムの開発. 自動制御連合講演会講演論文集, Vol. 49, pp. 609-609, 2006.
- [5] 山下龍生, 菊池拓男. 効率的な熟練技能の訓練計画選定における最適化問題の適用について. *工学教育*, Vol. 68, No. 1, pp. 58-62, 2020.