

アダプティブ e-ラーニングのための図形問題の類似度算出法

A Similarity Calculation Method of Geometric Problems for Adaptive e-Learning

多田 舜一^{1*} 白山 晋¹
Shunichi Tada¹ Susumu Shirayama¹

¹ 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

¹ Department of Systems Innovation, Faculty of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: In recent years, attention has been paid to adaptive e-learning, a learning method that uses educational big data to flexibly change the learning content according to the learner's proficiency. In this research, we proposed an overview of an adaptive e-learning system that focuses on the solution procedure that means what kind of knowledges and operations the learner used to solve the problem. As for the method of construction, we implemented the figure problem of arithmetic as an example. In the proposed system, more detailed support for learners can be expected compared to the conventional method.

1 序論

1.1 背景

現在、日本政府が提唱している「Society 5.0」の一環として、EdTech による教育改革が推進されている [1]. EdTech とは、「Education (教育)」と「Technology (技術)」の融合を意味する造語であり、「教育における AI、ビッグデータ等の様々な新しいテクノロジーを活用したあらゆる取組」と定義されている. EdTech による教育改革の推進の中で、すぐにでも着手すべき課題としてアダプティブラーニングが挙げられている. 文献 [2] によれば、アダプティブラーニングとは、「学習者の要求や知識、好みなどの要素に基づき、適切なコンテンツを適切な方法・タイミングで提供する教育手法」であり、学習者が電子端末を用いて行う学習 (e-ラーニング) におけるサービスの一種である. このため、アダプティブラーニングはアダプティブ e-ラーニングと呼ばれることも多い.

既存のアダプティブ e-ラーニングサービスでは、コンテンツの提供方法に関して様々な課題がある. 例えば、Truong は、2004 年から 2014 年までのアダプティブ e-ラーニングに関する研究のレビューを行った中で、学習スタイルがアダプティブ e-ラーニングにおいて重要な役割を担っていると提唱している [3]. Truong によれば、多くのアダプティブ e-ラーニングに関する研究で Felder と Silverman によるモデル [4] を利用して

いるが、このモデルでは、学習スタイルを 4 軸 (Active - Reflective, Sensing - Intuitive, Visual - Verbal, Sequential - Global) それぞれの傾向を算出することで決定している. しかし、このモデルは学習分野に依存しない個人の学習行動の傾向について分類しているに過ぎず、このモデルに基づいたアダプティブ e-ラーニングサービスでは、各学習コンテンツをどう解いたかや、どのような間違い方をしたかなど、学習行動中における学習分野特有のパラメータについて考慮できていない. 加えて、Barr らは、既存の LMS (Learning Management System) に基づいた学習環境に加え、LRS (Learning Record Store) を活用することで、学習者の分析や学習者へのサポートなどを、学習行動中にリアルタイムに行えると主張しているが [5]、アダプティブ e-ラーニングサービスに LRS を活用する研究はまだ発展途上にある. また、学習分野特有のパラメータを考慮したアダプティブ e-ラーニングに関する研究として、那須野らは (株) リクルートマーケティングパートナーズとの共同研究を行っている [6]. この共同研究の中で、大規模オンライン講座アプリ「受験サプリ」(現「スタディサプリ」 [7]) の数学教材における各講義の依存関係について、まず学習指導要領を参考に系統 (単元) 間の依存関係をネットワーク化して表現し、各講義の所属系統を講義名や使用教材から判断することで各講義間の依存関係を決定している. さらに、学習者の動画視聴や問題解答などの学習ログを深層学習を用いて解析し、学習者が次に取り組む問題の正誤を高い精度で予測している [8]. しかし、この手法では、那須野らが指定した系統を最小単位としているため、講義内のどこでつ

*連絡先: 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: tada-shunichi513@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

まずいたかを考慮できておらず、また、膨大な量の各講義を全て手入力力で分類しており、導入への障害となる。

以上を踏まえ、既存のアダプティブ e-ラーニングに関する研究及びアダプティブ e-ラーニングサービスにおいては、以下のような課題が挙げられる。

- 学習行動中の学習者に対するリアルタイムな分析・サポートに関する研究は発展途上にある
- 既存のアダプティブ e-ラーニングサービスでは、学習分野特有のパラメータを考慮した例は少ない
- 学習分野特有のパラメータを考慮した研究例でも、各システムを最小単位としているため、システム内より詳細なつまづきに対応できない
- 膨大な量の教材に対し、内容に応じた分類を全て手入力で行う必要があり、導入への障害となる

1.2 目的

本研究では、1.1 項の課題を踏まえ、以下に挙げる特徴を持つアダプティブ e-ラーニングシステムの開発を目指す。

- 学習者の学習行動中にリアルタイムに分析・サポートを行う
- 学習者の学習スタイルだけでなく、学習分野特有のパラメータとして、解答手順を考慮する
- 各教材を解答手順に基づいて自動で分類する

なお、本研究で提案するアダプティブ e-ラーニングシステムが対象とする学習者と学習内容、及び目的を表 1 に示す。

表 1: 本システムの対象

対象の学習者	中学校受験を控えた小学生
対象の学習形態	電子端末を使用した個人学習
対象の学習内容	算数の図形問題
学習の目的	中学受験で必要とされる図形問題の解答パターンの習熟

2 AL システムの設計

本節では、AL (Adaptive e-Learning) システムに要求される機能及びその検証のためのモデルを説明する。

2.1 学習環境のモデル化

一般に AL とは、学習者がコンピュータ端末やタブレット端末を用いて一人で学習する仕組みであるため、教授者が存在しない、いわゆる個人学習と呼ばれる学習形態である。文献 [9] で提案された、組織のモデル化のためのメタネットワークモデルを、複数人間が共存する教育形態に拡張し、個人学習におけるメタネットワークモデルを定義する。個人学習を構成する要素を表 2 に、また、その要素間の相互関係を表 3 に示す。

表 2: メタネットワークを構成する要素

種別	内容
人間	対象となる学習者 (個人)
スキル知識	解答に必要な知識・作業
リソース	解答行動中の手順や解答結果などの学習者の学習履歴
タスク	用意されている問題

2.2 AL システムに要求される機能

本研究で開発する AL システムの導入によって、前節で述べたモデル内において従来の個人学習からどのような変化を期待するかを考察し、そのために要求される機能を検討する。なお、従来の個人学習として、小学校で課された宿題を自宅で取り組むことを想定している。2.1 項で述べたモデルを構成する要素や要素間の相互関係について、AL システムの導入によって期待する変化を表 4 にまとめる。また、そのために要求される機能を表 5 に示す。これらの機能を満たすために必要な手法とその実装方法は、3 節で説明する。

3 AL システムの実装

本章では、3.2 節で述べた AL システムに要求される 3 つの機能を実現するために必要な手法を述べる。

3.1 機能①:問題情報・学習履歴の保持

問題情報を計算機上で扱える形式で表現した研究として、国立情報学研究所の新井らによる「東ロボくん」[10] や、岡本による「GEOMEX」[11] などがある。これらの研究に倣い、論理型プログラミング言語 Prolog [12] の事実と規則を用いてデータベースを作成し、問題情報及び学習履歴を表現する手法を提案する。データベースは以下の 5 種のデータで構成される。

表 3: メタネットワークを構成する要素間の関係

種別	スキル・知識	リソース	タスク
人間	知識・作業の習得状況	学習履歴の参照可否	学習者への出題内容
スキル・知識	知識・作業の依存関係	どの知識・作業を用いた学習履歴であるか	問題を解答するのに必要な知識・作業
リソース		学習履歴の時系列	どの問題に関する学習履歴であるか
タスク			問題を解く順序

表 4: AL システムによる個人学習の変化

変化	項目	従来の学習	アダプティブ e-ラーニング
変化①	リソース	ノートや問題集などの紙媒体	タブレットなどの電子端末
	タスク		
変化②	人間 - スキル・知識	学習者自身の理解度や進捗を自ら解答箇所を振り返ることで参照	過去の学習履歴から学習者の理解度や進捗を自動で可視化
	人間 - リソース		
変化③	人間 - タスク	取り組むべき問題と順序が指定されており、解答行動中にはサポートを得られない	学習者の理解度に応じて取り組むべき問題と順序が動的に変化し、解答行動中に必要に応じたサポートを行う
	タスク - タスク		

表 5: AL システムに要求される機能

変化	機能
変化①	計算機上で扱える表現形式で問題情報及び学習履歴を保持する【機能①】
変化②	解答に必要な作業の習得度、知識の理解度を数値化する【機能②】
変化③	作業の習得度、知識の理解度、問題を解答するのに必要な作業・知識から問題の優先度を変動させる【機能③】

- 各問題における図形構造のデータ
 図形を構成する部品として、点・線分・面の3つがある。また、部品間には様々な図形的な関係性がある。これらの部品・関係を計算機上で扱えるよう、Prologの述語を定義し、事実として記述した。それぞれの部品の記述方法を表6に、部品間の関係を表7にまとめる。
 この形式に従い、各問題の図形構造をPrologの事実として表現したデータを作成する。
- 各問題における設問条件のデータ
 各問題において設定されている長さや角度などの物理量を表8の命名規則に従いPrologの事実として表現し、また問題で問われている対象についてもPrologの事実として表現し、データを作成する。
- 作業及び知識のデータ
 図形問題を解くために必要な作業及び知識で構成されるデータである。補助線の引き方のパターンや面積を求める公式などが相当する。
- 知識推論による解答情報のデータ
 1. 2. 3. で作成したデータに基づいてPrologで知識推論を行い、問われている対象を求めるまでに使用した作業及び知識の組み合わせと、最終的に得られた解答を出力し、データを作成する。
- 学習履歴のデータ
 4. で説明した作業及び知識の組み合わせと得られた解答、その正否と合わせて出力し、データを作成する。
 これら5種のデータによって図1に示すようなネットワーク型のデータベースを構築する。このネットワーク構造を利用し、機能②、③を実現する。

表 6: 図形構造を構成する部品

部品	記述方法	内容
点	point(P, X, Y).	P : 点の名称 X : 点の x 座標 Y : 点の y 座標
線分	segment(L, P1, P2).	L : 線分の名称 P1, P2 : 線分の端点の名称 (辞書順に P1 ; P2)
多角形	polygon(Poly, Ps).	Poly : 多角形の名称 Ps : 多角形の頂点リスト
正多角形	regular_polygon (Poly, Ps).	Poly : 正多角形の名称 Ps : 正多角形の頂点リスト

表 7: 部品間の関係

部品 - 部品	記述方法	意味
点 - 点	reflect(P1, P2, P0).	点 P1 は点 P2 の点 P0 に対する対称点である
点 - 線分	on_line(P, L).	点 P は線分 L 上にある
点 - (正) 多角形	vertex(P, Poly).	点 P は多角形 Poly の頂点である
線分 - 線分	straight(L1, L2).	線分 L1 と線分 L2 は同一直線上にある
	parallel(L1, L2).	線分 L1 と線分 L2 は平行である
線分 - (正) 多角形	edge(L, Poly).	線分 L は多角形 Poly の辺である

表 8: 与えられている物理量

物理量	記述方法	意味
長さ	distance(P1, P2, Length).	点 P1 と点 P2 の間の距離は Length[cm] である
角度	angle(P1, O, P2, Angle).	線分 OP1 から線分 OP2 までの角は反時計回りに Angle[度] である
面積	area(Poly, Area).	多角形 Poly の面積は Area[cm ²] である
分数	value(Value, N, D).	Value の値は $\frac{N}{D}$ である

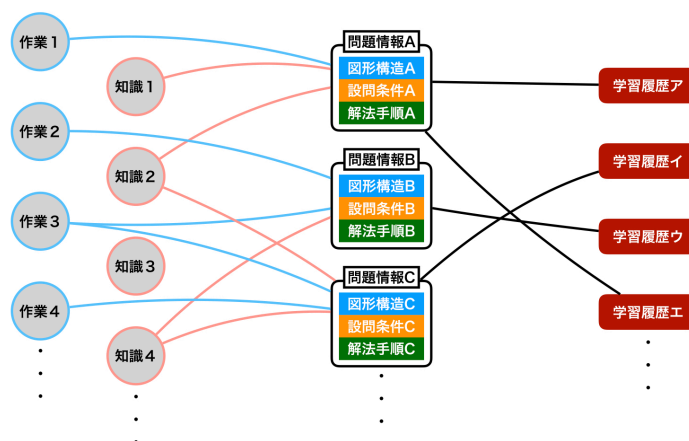


図 1: ネットワーク型データベースの概要図

4 類似度算出法

本節では、図形問題間の類似度を算出する方法を説明する。学習者に適切な出題・サポートを行うため、用意する問題群における各問題間の比較や、学習者が行った解答手順と正しい解法手順の比較は必要である。図形問題の解法手順は、前章で述べた個々の公理・公式・作業からなる有限個の重複順列として表現される。このような配列間の類似度を評価する代表的な手法として Levenshtein 距離と Needleman-Wunsch 法を説明する。Levenshtein 距離とはある文字列から他の文字列に変換する際に要する編集操作の回数である。ここでの編集操作は、文字の挿入・削除・置換であり、比較する文字列が似ている場合は文字列の変換に要する編集操作の回数は少なく、逆に比較する文字列が著しく異なる場合は変換に要する操作の回数は多くなるはずである。すなわち、Levenshtein 距離の大小が文字列間の類似性を表す。Levenshtein 距離と同様に文字列の類似度を算出する手法として、Needleman-Wunsch 法 (NW 法) がある。NW 法はアミノ酸の配列や DNA 分子配列間の共通部分の抽出法として開発され、バイオインフォマティクス分野では一般的な手法となっている。

5 エキスパートシステムによる解法の出力

エキスパートシステムによる計算実験についてまとめる。本研究では、自作した及び問題集の平面図形問題を 31 問用意し、前述した Prolog に基づくエキスパートシステムで解答の出力を試みた。全問題のうち、正しい解答は少ししか得られなかった。原因として、様々な理由が考えられる。そのうちの一つは、Prolog の推論を行う順序にかかわるものである。Prolog の推論では、ソースコードの上から参照を順番に行うため、参照されず、正しい結果に結びつかないことがあった。図 2 にエキスパートシステムで解けた問題を、図 3 にエキスパートシステムで解けなかった問題を示す。

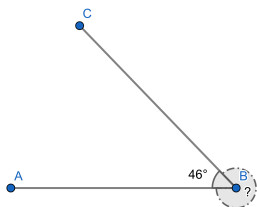


図 2: エキスパートシステムで解けた問題

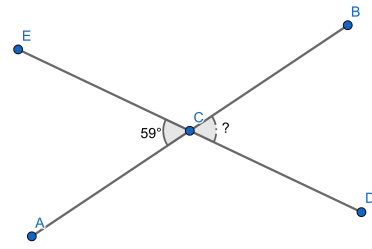
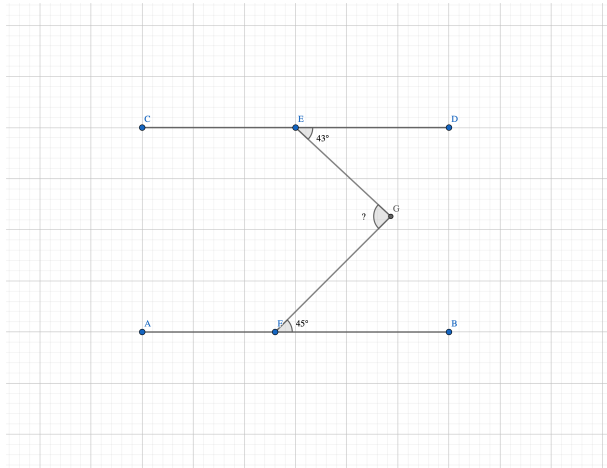


図 3: エキスパートシステムで解けなかった問題

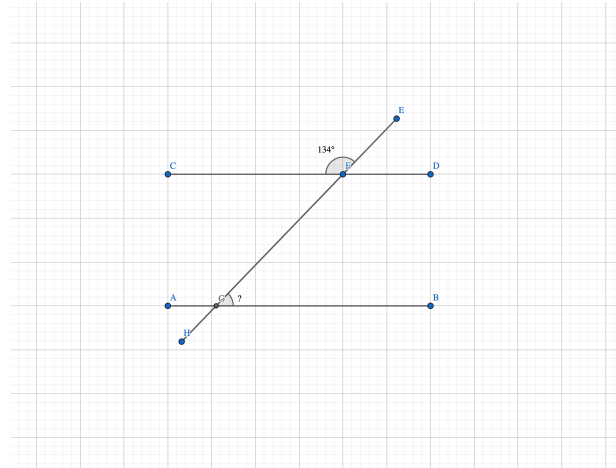
6 解法間の類似度算出

図 4 に示す問題群における解法に対し、Levenshtein 距離と NW 法による類似度算出を試みた。選択した問題について、Problem 1 と Problem 2 は錯角などの平行線に関わる作業を必要とし、Problem 3 と Problem 3 は正多角形や二等辺三角形を利用した作業を必要とするため、Problem 1 と Problem 2 の間、及び Problem 3 と Problem 4 の間で高い類似度を示すことを期待した。

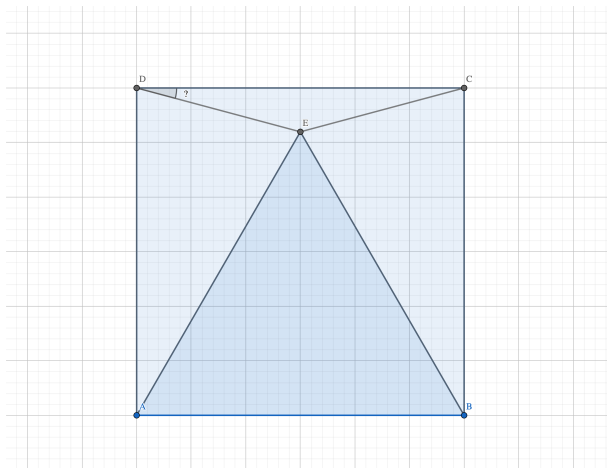
表 9 に Levenshtein 距離の計算結果を、表 10 に NW 法の計算結果を示す。Levenshtein 距離では、数値が小さいほど類似度が高く、NW 法では、数値が大きいほど類似度が高くなる。期待した通り、どちらの手法においても Problem 1 と Problem 2 の間と Problem 3 と Problem 4 の間で高い類似度が算出された。このことから、どちらの手法も問題間の類似度を解法に基づいて算出できることが示された。



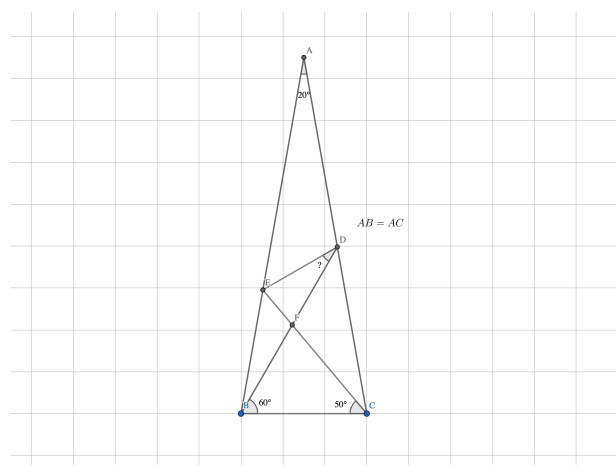
(a) Problem 1



(b) Problem 2



(c) Problem 3



(d) Problem 4

図 4: 類似度算出を行なった問題群

表 9: Levenshtein 距離の計算結果

	Problem 1	Problem 2	Problem 3	Problem 4
Problem 1		0.75	1.0	0.95
Problem 2			0.83	0.95
Problem 3				0.75
Problem 4				

表 10: NW 法の計算結果

	Problem 1	Problem 2	Problem 3	Problem 4
Problem 1		0.25	0	0.05
Problem 2			0.17	0.05
Problem 3				0.25
Problem 4				

7 結論

本研究のまとめと今後の課題について述べる。
本研究の成果は以下である。

- アダプティブ e-ラーニングシステムについて提案を行い、解答手順を考慮したシステムの全体像を示した。
- AL システムの導入に期待する環境の変化を考察することで、そのために要求される3つの機能を抽出した。
- データベースの概要を示し、そのうち図形構造の部分や知識・作業部分の実装を完了させた。
- 図形問題の類似度算出法について提案を行い、一部実験により確認した。

今後の課題として、

- エキスパートシステムの改良
- さらなる類似度算出法の実証実験の試行
- システム全体の完成へ向けた取り組み

が挙げられる。

参考文献

- [1] 文部科学省 新たな時代に対応するための EdTech を活用した教育改革推進プロジェクトチーム.: Society5.0 における EdTech を活用した教育ビジョンの策定に向けた方向性, http://www.mext.go.jp/b/menu/shingi/chukyo/chukyo3/002/siryo/_icsFiles/afiefieldfile/2018/06/20/1406021_18.pdf (2019/11/17 最終アクセス)
- [2] Shi, L., Cristea, A. I., Foss, J. G., Al Qudah, D., Qaffas, A.: A social personalized adaptive e-learning environment: a case study in Topolor, *IADIS Int. J. WWWInternet*, Vol. 11, No. 2 (2013)
- [3] Truong, H. M.: Integrating learning styles and adaptive e-learning system: Current developments, problems and opportunities, *Computers in human behavior*, Vol. 55, pp. 1185–1193 (2016)
- [4] Felder, R. M., Silverman, L. K.: Learning and teaching styles in engineering education, *Engineering education*, Vol. 78, No. 7, pp. 674–681 (1988)
- [5] Barr, A., Robson, R.: Missing Pieces: Infrastructure Requirements for Adaptive Instructional Systems, *Proceedings of the Workshop on Adaptive Instructional Systems at HCI International*, pp. 169–178 (2019)
- [6] 那須野薫, 萩原静蔵, 井上綾香, 伊藤岳人, 浜田貴之, 川上登福, 松尾豊.: 大規模オンライン講座における自己適応学習者に着目した学習項目の理解度予測, 人工知能学会全国大会論文集 第 29 回全国大会, pp. 1N25–1N25 (2015)
- [7] スタディサプリ, http://www.mext.go.jp/b/menu/shingi/chukyo/chukyo3/002/siryo/_icsFiles/afiefieldfile/2018/06/20/1406021_18.pdf (2019/11/17 最終アクセス)
- [8] 東京大学松尾研究室× BAI×リクルートマーケティングパートナーズ 共同研究. 学習者の「解けない問題」の予測に成功「つまづき予防」の実現へ: University of Tokyo Matsuo laboratory × BAI × recruit Marketing Partners joint research: Successful prediction of unsolvable problems of learners. Realization of preventing stumbling blocks., https://ring.education/research/recruit_tokyo-univ_matsuo-lab_bai_joint-research_20160915/ (2019 年 12 月 16 日 最終アクセス)
- [9] Carley, K. M., Pfeffer, J.: Dynamic network analysis (DNA) and ORA, *Advances in Design for Cross-Cultural Activities Part I*, pp. 265–274 (2012)
- [10] 新井紀子, 松崎拓也.: ロボットは東大に入れるか, 人工知能学会誌, Vol. 27, No. 5, pp. 463–469 (2012)
- [11] 岡本敏雄.: 知的 CAI 最近の動向: 初等幾何 CAI システム: GEOMEX, 情報処理, Vol. 29, No. 11, pp. 1301–1308 (1988)
- [12] Kowalski, R.: *Logic for problem solving*, Department of Computational Logic, Edinburgh University (1974)