

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25560067

研究課題名(和文) 高等教育に適した自学自習システムの開発

研究課題名(英文) Development of e-learning system for university students

研究代表者

篠原 歩 (SHINOHARA, Ayumi)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00226151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：タブレットPC，スマートフォンなどの携帯端末でも容易に利用可能な大学生向けのe-learningシステムの構築を目指し，オートマトン・言語理論を題材として，各種端末の利点を活かしたシステムのプロトタイプを作成した．正規言語の反復補題を理解しやすいよう対話的にユーザに提示するシステムや，オートマトンを題材としたパズルゲームを設計して実装した．また，これに関連した，入力に矛盾しない最小のオートマトンを求める問題の計算複雑さを解析した．

研究成果の概要(英文)：The goal of this project was to develop prototypes of e-learning system for university students, that is comfortably accessible from various mobile devices such as tablet PC and smartphones, mainly focused on the theory of automata and formal languages. We developed a system that interactively shows an essence of the pumping lemma for regular languages, and designed and implemented a puzzle game based on the behavior of finite automata. Moreover, we analyzed the computational complexity of finding minimum automaton that is consistent with given examples.

研究分野：情報科学

キーワード：言語理論 オートマトン e-learning 学習理論

1. 研究開始当初の背景

近年の計算機環境は大きく変化しており、特にタブレット PC やスマートフォンはこの数年で急激にユーザを増やしてきた。タブレット PC の普及を見越して、書籍の電子化も急速に進み、電子ブックの市場も拡大してきた。マルチメディアとしての電子ブックには紙媒体の本にはない様々な特長があることから、教科書の電子化も今後ますます進んでいくものと見込まれていた。事実、それを見越し、またその成長をうながすために例えば Apple 社からは電子ブック執筆のためのオーサリングツールが無償公開されており、既にワープロ文書を作成するのほとんど変わらない手間で epub 形式の電子ブックが出版できるようになっていた。申請者も、実際にこのオーサリングツールを使って電子ブックを作ってみた。また e-learning システムとして広く普及している moodle など、いくつか既存のものを教材の作成に利用してきた。その結果、これら既存のものは、適用範囲を限定すれば極めて高い完成度を持っていることがわかったが、申請者の担当する講義において大学生向きの本格的な教材として使用するには足りない部分があると感じた。そこで、それらを最新の技術を用いて克服しながら、より魅力的な自学自習教材となるシステムの基盤技術を開発したいという思いから本申請課題に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究課題は、タブレット PC、スマートフォンなどの携帯端末でも容易に利用可能な大学生向けの e-learning システムの構築を行うことを目的として定めた。

- (1) 具体的な題材として「オートマトン・言語理論」に焦点を絞り、初学者向きの教材の開発を第一義とする一方で、領域研究者にとっても有用に活用できるツールを各種の端末の利点を活かした形で提供することも目指す。
- (2) そのために必要な技術要素を整理し、計算機科学の問題としてその実現可能性を究明することもまた研究対象とする。具体的には、それぞれの要素技術に関わる計算量の解明や、それを効率よく実行するためのアルゴリズムとデータ構造の開発を併せて行う。
- (3) ゲーム性を大胆に取り入れ、楽しみながら取り組めるよう工夫を凝らす。例えば、練習問題に関しても、通常の本などのように固定されたものではなくて、電子教材であることを活かしてユーザの理解度に合わせて動的に問題を生成することなども検討する。ソーシャルネットワークとしての機能も導入することで、学習者のそれぞれの学習段階や役割に応じて有用に使

える学習システムの機能要件を検討する。

3. 研究の方法

- (1) 教材をデスクトップ PC やノート PC のみならず、タブレット PC やスマートフォンでも、それぞれの環境に適した操作感で使えるように開発していく必要がある。一つの解決策としては、システムをサーバーに構築し、各端末からブラウザでアクセスすることが考えられる。実現はこれが一番容易ではあるが、通学時などオフラインの状況では使用できないこと、また利用する度に通信が必要となることなどから、利便性を損ない、本システムの目指す方向には適合しないと判断した。一方、各種端末は OS の環境が異なることから開発環境も大きく異なり、それぞれを個別に開発するのは労力がかかりすぎる。そのため、まずこの作業に適した開発環境とプログラミング言語の調査を行った。

- (2) 正規言語に対する反復補題は、

「任意の正規言語 L に対して、ある整数 k が存在して、長さが k 以上の任意の文字列 $w \in L$ に対して、次の条件を満たす文字列 x, y, z が存在する：

【条件】 $w = xyz$ かつ、任意の非負整数 i に対して $xy^iz \in L$ が成り立つ」

と記述されるもので、言語の非正規性を証明するために極めて有用であるが、初学者にとって理解しにくい課題である。難しさの主要原因の一つは全称 \forall と存在 \exists が入れ子構造になっていることにある。この理解を助けるための仕組みを考え、対話的なシステムとして実装した。

- (3) 上記の反復補題は、ほとんどのオートマトン・言語理論の教科書に登場するが、練習問題があまり多くなく、また記述方法もまちまちであることから、学習者はなかなか理解した感じが得られないようである。そこで、オートマトン・言語理論に関する和文、英文の教科書を網羅的に調査し、反復補題に関する設問を統一的な記述で整理し直した。
- (4) 有限オートマトンは、入力として与えられた文字列を受理するものと受理しないものに分類する判定器とみなすことができる。この逆に、正負のラベルのついたデータ集合が入力として与えられたときに、それを正しく分類する規則を求める問題は、機械学習理論の基本的な問題の一つである。このことを直感的に伝えられるよう、学習問題を実時間アクションパズルゲームとして表現することにし、そのプロトタイプを実装した。また、計算学習理論の観点から、このパズルを解くために必要な計算量の解析に取り組んだ。

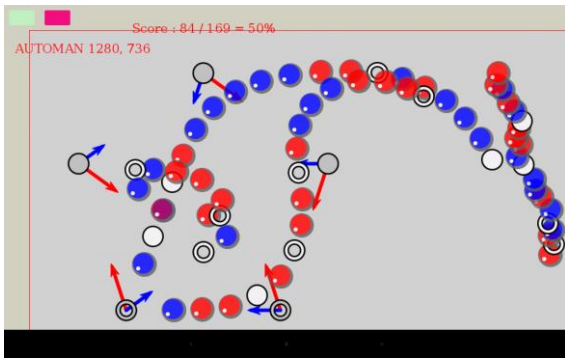


図 1. Android 版のスクリーンショット

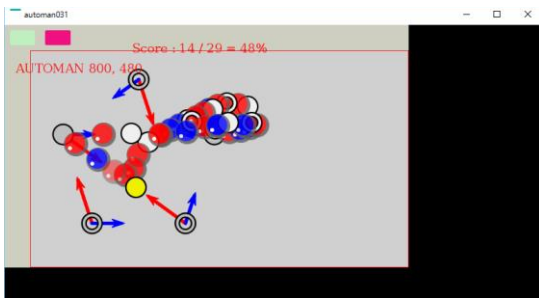


図 2. Windows 版

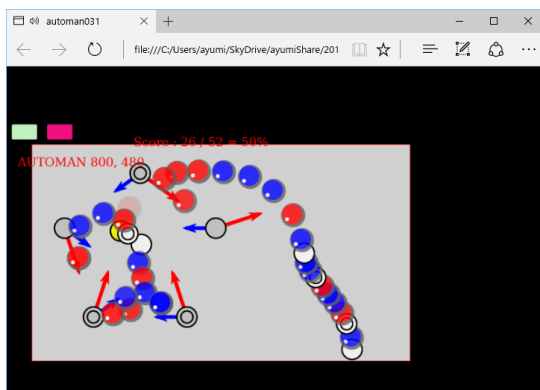


図 3. ブラウザ用 html5 版

4. 研究成果

(1) まず、JavaScript と html5 を用いてシステムのプロトタイプを作成し、それぞれの環境で動作確認を行った。続いて、これをオフラインで動作させるために、html5 を用いたクロスプラットフォーム開発のツールをいくつか試してみたが、この時点では、古い機種の上では十分な速度を得られず（特に Android 版）、それぞれの環境用にビルドする必要性を認識した。そこで各種のツールを試用して検討した結果、現時点ではプログラム言語 Haxe を採用するのが適切であると判断した。これを用いると同一ソースファイルから、各種ブラウザで利用できる html5 のみならず、Windows ネイティブ版、MacOS ネイティブ版、Linux 版、Android 版、iOS 版と、広く流通し用いられているほとんどの PC、タブレット、スマートフォン環境に対応できることがわかった。またアニメーションの速度

や音声データの再生も含めて、十分なレスポンスが得られることも確認できた。そこで、後述のオートマトンの最小化問題に基づいた簡単なパズルゲームを創作し、プログラム言語 Haxe を用いて試作システムを実装した（図 1、図 2、図 3 にその一部のスクリーンショットを示す）。そして Windows, Mac, Linux, Android, iOS それぞれの環境のもとで違和感なく操作できることを確認した。

(2) 正規言語の反復補題に潜む全称 \forall と存在 \exists の入れ子構造は、例えば詰め将棋に擬えて、提示された局面が「詰み」であることを先手と後手で交互に可能な手を指してみると納得しやすい。後手が詰みを回避しようとするような手を指したとしても、先手がそれに応じてうまく攻め続ければ必ず詰んでしまう、という状況がこの論理の入れ子構造に対応する。そこで、反復補題を用いた言語の非正規性の証明においても、対話的にこの論証を積み重ねる部分をユーザに提示するシステムのプロトタイプを、JavaScript を用いて作成した（図 4）。これは先行研究として Java 言語で記述された言語理論の学習システム JFLAP でも用いられている手法である。JFLAP の利用には実行ファイルのダウンロードとインストールが必要であるが、我々は JavaScript で実装しており、ユーザは好きなブラウザでそのまま実行を行うことができる。また、練習問題を容易に追加するよう設計した。この一連の研究過程において、詰め将棋と同種の性質をもつ 2 プレイヤの完全情報ゲームとして一般化三並べを一般化した問題の解析にも取り組んだ。既存研究を、一手で置ける石の個数や盤面を換えてさらに一般化し、それぞれの場合における勝敗を理論的に解析した。この問題は、ルールそのものが詰め将棋に比べてずっと簡単であることから、将棋の駒の動かし方をよく知らない学習者に対して、この論理構造を理解する上で有用である。

(3) 反復補題は重要な課題であるが、学習者にとっては丁寧な解答付きの「問題集」がないため、なかなか自分が理解したという実感を得にくい。そこで現時点で入手できるすべての和文および英文のオートマトン・言語理論に関する教科書から、反復補題の例題を調べ上げ、統一的な表現でまとめ直した。これを web システム上に出版を引用しながら記述することで、学習者は多くの問題に取り組むことができるようになった。面白いことに、反復補題を用いた証明は、異なる問題の証明に全く同じ文言が使えることがある。この面白さにも気づいてもらいたいため、問題集と解答集をリンク構造で表すことにした。問題集と解答集を注意深く観察していけば、このこと

をより深く理解できるようになっている。

(4) 計算学習理論の観点から、与えられた例に矛盾しない最小の決定性有限オートマトンを求める問題の解析に取り組んだ。これは最小無矛盾問題として知られ、確率的近似学習(PAC 学習)の多項式時間学習可能性と密接に関連しており、一般の入力について NP 困難であり、また近似も難しいことが既に知られている。我々はこの問題に対して、入力のすべての文字列がある文字列の接頭辞になっている場合についての解析を行い、アルファベットサイズが 2 以上ならばこの制限の元でも NP 困難であり、また近似も同様に困難であることを証明した。一方、アルファベットサイズが 1 のときは多項式時間で効率よく解けることも示した。上記のパズルゲームはこの困難性を利用しており、答えをひらめけば、あるいは答えを見ればすぐに納得はいくが、答えを探すことそのものはなかなか難しい。これらの話題も計算量理論への導入として効果的に用いることができると考えている。

(5) オートマトンや正規表現、正規文法など、形式言語理論の中で用いられるさまざまな表現やその操作に関する基本アルゴリズムをライブラリとして整理した。このことにより、非決定性オートマトンから決定性オートマトンへの変換、オートマトンの最小化、正規表現とオートマトンとの間の相互変換などが容易に行えるようになった。

(6) 上記のライブラリを用いながら、初学者が正規表現とオートマトンの関係を理解するときに用いる例題を、あらかじめ生成して固定されたものに限ることなく、動的に生成しながら、理解度に適応させながら提示する仕組みを作った。またその際に用いる問題の難易度の指標についての検討を行った。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Diptarama, Kazuyuki Narisawa, and Ayumi Shinohara, Drawing Strategies for Generalized Tic-Tac-Toe (p, q), AIP Conf. Proc, 査読有, 1705 巻, 2016 年, 1-8
DOI: 10.1063/1.4940269

[学会発表] (計 7 件)

①ディプタラマ, 石黒裕也, 成澤和志, 篠原歩, ジョーダンチャールズ, QBF ソルバを用いた一般化三並べの拡張の勝敗判定, 第 20 回ゲームプログラミングワークショップ 2015, 2015 年 11 月 8 日, 長野

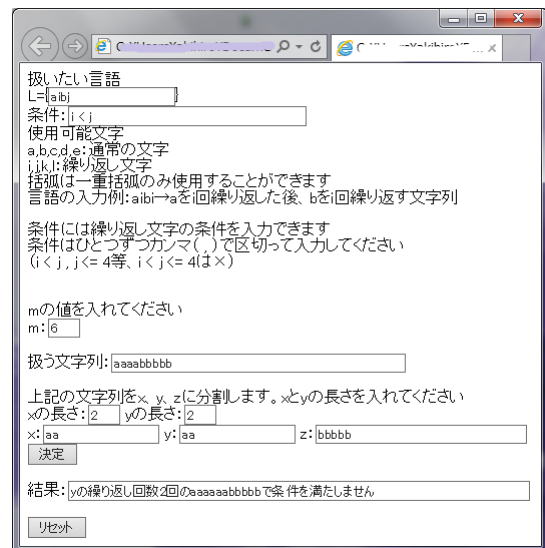


図 4. 反復補題の理解を助ける対話的なシステム

②石黒裕也, ディプタラマ, 成澤和志, 篠原歩, トーラス盤面における一般化三並べの解析, 第 20 回ゲームプログラミングワークショップ 2015, 2015 年 11 月 8 日, 長野

③Ayumi Shinohara, A note on minimum consistent DFA from prefix samples, ELC Workshop on Learning Theory and Complexity, 2014 年 9 月 16 日, 京都

④ Kazuya Yaguchi, Naoki Kobayashi, Ayumi Shinohara, Efficient Algorithm and Coding for Higher-Order Compression, Data Compression Conference 2014, 2014 年 3 月 27 日, ソルトレイクシティ(アメリカ)

⑤上埜 かおり, 下菌 真一, 成澤 和志, 篠原歩, 接頭辞集合に対する決定性有限オートマトンの最小無矛盾問題について, 電子情報通信学会コンピュータシミュレーション研究会, 2013 年 12 月 21 日, 沖縄

⑥大井 雄介, 成澤 和志, 篠原 歩, オンライン文字列辞典の試作, 夏の LA シンポジウム, 2013 年 7 月 17 日, 福岡

⑦ Kaori Ueno, Shinichi Shimozone, Kazuyuki Narisawa, Ayumi Shinohara, On the hardness of approximating the minimum consistent DFA from prefix samples, ICALP 2013 Satellite Workshop on Learning Theory and Complexity, 2013 年 7 月 7 日, リガ (ラトビア)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠原 歩 (SHINOHARA, AYUMI)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 00226151