

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K02920

研究課題名（和文）並列プログラミングのための反転授業向け学習支援ツールの研究

研究課題名（英文）Research on learning support tools for flipped classrooms for parallel programming

研究代表者

若谷 彰良（Wakatani, Akiyoshi）

甲南大学・知能情報学部・教授

研究者番号：60330403

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：並列プログラミングの学習においては、一般のプログラミング言語と同様に、大量の例題を用いた演習による学習が有効である。本研究では、CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACCの各並列プログラミングツール向け学習ツールからなるwebアプリケーションスイートを作成し、それぞれのツールに対して音声付き電子教材及び演習ツールを日英両方の言語で作成した。演習ツールはPHP言語を用いて問題を自動生成するようにしており、実運用により本webアプリケーションスイートの有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

並列コンピュータの一般化に伴い並列プログラミングの需要は高まっている。一方、反転学習の普及に伴うその事前学習の教材としてだけでなく、2019年に始まったcovid-19の影響等から、プログラミング言語の学習に対しても自学教材の必要性は顕著になってきている。本研究はそのような社会的要請に対応した自学教材を作成する試みの一つであり、プログラミング言語学習における演習問題の重要性に着目した実用的な研究である。代表的な6個の並列プログラミングツールに対して日英両言語で構築したwebアプリケーションスイートはそのような自学教材の試作としての高い価値がある。

研究成果の概要（英文）：In learning parallel programming, as with general programming languages, learning through a large number of exercises is effective. In this study, we created a web application suite consisting of learning tools for CUDA, OpenMP, POSIX thread, MPI, AVX, and OpenACC parallel programming tools, and created electronic learning materials with audio and practice tools for each tool in both Japanese and English. The exercise tools are designed to automatically generate exercises using the PHP language, and the effectiveness of this web application suite was confirmed through practical use.

研究分野：並列プログラミング

キーワード：MOOC 自動生成 反転学習 自習 PHP言語

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

半導体技術の進展とともにプロセッサ内に実装できるトランジスタ数は飛躍的に増加し、並列コンピュータが一般的になったが、並列プログラミング環境を利用した並列プログラミングは、初学者には統語論的及び意味論的な困難を生じさせ、学習が難しいものである。

一方で、MOOC (Massive Open Online Courses)を用いた反転授業が大学教育において注目を浴びているが、プログラミング技術の習得には、実際のプログラム作成を通じた実際の学習が不可欠であるので、演習問題を用いた効果的な自学学習教材の開発は喫緊の課題となっていた。

### 2. 研究の目的

初学者が学ぶ上で様々な困難がある並列プログラミングに対して、統語論的理解及び意味論的理解を向上するために、それらの力を涵養するような3種類のプログラミング演習問題を自動的に生成するシステムを開発することを目標とし、以下の問題点を解決することを目的とする。

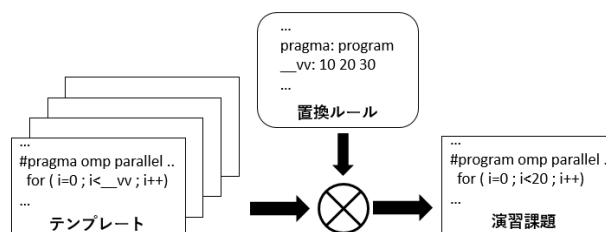
- ・現在未着手である様々な並列プログラミング環境に向けた学習システムの構築を行う。

- ・本学習システムでは、統語論的理解及び意味論的理解を向上するための、デバッグ能力及びプログラム解読能力の向上に資する演習課題とともに、それらに対する予備的な能力開発として穴埋め問題を用いた統合的な例題の3種類のプログラミング例題を自動生成するツールを提案する。

- ・本学習システムに対する実証実験を通して、教育的効果を明らかにし、次世代の学習システムを模索する。

### 3. 研究の方法

研究代表者らによって開発されたC言語に対するシステム[文献1]をベースに、右図のように示すように、並列プログラミング環境に適合したテンプレートを用意し、多様な例題を生成できるように実行時に置換ルールによる置き換えを行い、学習効果を高められる演習課題を自動生成するツールを作成する。



対象とする並列プログラミングツールは、代表的なツールであるCUDA, OpenMP, OpenACC, POSIX thread, MPI, AVXを取り上げ、それぞれの演習ツールと音声付き電子教材を作成し、実運用において教育効果を確かめる。

[1] Akiyoshi Wakatani and Toshiyuki Maeda, "Evaluation of software education using auto-generated exercises," Proc. of 19th IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE 2016), pp. 732-735, 2016.

### 4. 研究成果

2018年度から2023年度の研究成果を以下に述べる。

#### (1) 2018年度

並列プログラミングのためのフレームワークとして、共有メモリ型並列システム向けのツールであるOpenMPプログラミング、及びプロセッサ内蔵のSIMD演算器のためのプログラミング手法の一つであるAVXプログラミングに対して、学習コンテンツの作成およびプログラミング演習の例題となるwebツールを作成した。この中でwebツールとしては、穴埋め問題、デバック問題、プログラム出力推定問題の3種類に加え、後述するように、少し大きめの穴埋め問題を実装し、疑似的な反転授業形式で、一部の検証を行った。

検証においては、通常の講義形式の場合と、その講義と同じ時間で自習教材を用いて学習する疑似的な反転授業を用いて講義を行う場合とで、課題の完成度を比較したが、両者には大きな差はなかった。よって、本方式を実際の反転授業で用いることにより、講義時間の短縮もしくは講義時間内でさらに応用問題を解くことができるなど、学習効果の改善が可能となる。

さらに、プログラミングスタイルの全体像を理解させるための演習問題として、新たなwebツールを考案し、実装した。これは、キーワードなどを穴埋めするだけでなく、1行分のプログラムを実装させるものである。これまでも穴埋め問題はキーワードを埋める程度の比較的軽いものであり、プログラムの全体を意識しなくても解答可能なものであったが、今回のツールは1行分の追加となるので、プログラムの流れを意識して記述することが必要となり、学習者のプログラミング理解を助けることが期待でき、並列プログラミング学習におけるプログラミング演習の強化を図ることができるものである。

#### (2) 2019年度

並列プログラミングのためのフレームワークとして、分散メモリ型並列システム向けの並列化ツールである MPI プログラミング、及び NVIDIA 社製グラフィックプロセッサ (GPU) のためのプログラミング手法の一つである CUDA プログラミングに対して、学習コンテンツの作成およびプログラミング演習の例題となる web ツールを作成した。MPI の実装には、サーバ内に、OpenMPI をインストールし、問題の自動生成及び問題の採点の際に、サーバ内で実行するところで実現した。なお、MPI の実行はプロセス数を指定する必要があり、学習者の理解のしやすさ及びシステムの安定度などを勘案し、4 プロセスに固定することにした。

MPI 及び CUDA に対する web ツールとしては、単語レベルの穴埋め問題、文レベルの穴埋め問題、デバッグ問題、プログラム出力推定問題を実装し、疑似的な反転授業形式で、MPI のプログラミング教育において、一部の検証を行った。

MPI プログラミング教育に対する本ツールの効果の検証においては、疑似的な反転授業形式で学習した後に、理解度確認テスト 1 を行い、その後、web ツールを用いたプログラミング演習を行い、理解度確認テスト 2 を行った。結果を比較すると、テスト 2 の方が 10%程度の点数の増加が見られ、web ツールを用いることの優位性の検証が、一定程度確認できた。

### ( 3 ) 2020 年度

CUDA と並んで GPU プログラミングに用いられる OpenACC を用いた並列プログラミングに対して、学習コンテンツの作成およびプログラミング演習の例題となる web ツールを作成した。OpenACC は、OpenMP 同様に、プラグマを既存言語に付加するだけで並列プログラムが生成できるものであるが、タスクの分散だけでなくホストとデバイス間のデータ移動のコードも自動的に追加されるので、ユーザにとってデータ移動の削減などの最適化が難しく、プログラム作成は容易になるものの、性能を上げることが困難である。よってこの部分を初学者に理解してもらうことは重要になる。

OpenACC の web ツールを完成したことにより、当初予定していた、並列プログラミングの代表的なツールである、CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACC の学習ツールからなる web アプリケーションスイートが完成したことになる。また、今回の OpenACC の web ツールでは、前述の最適化の部分の学習にも対応し、プログラム作成の学習だけでなく、最適化の一部も意識したものであるとしている。評価に関しては、web ツールの動作確認を行い、実際の学習を用いた被験者実験については、実験手段の準備を行った。

### ( 4 ) 2021 年度

CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACC の各並列プログラミングツール向け学習ツールからなる web アプリケーションスイートに対し、音声付き電子教材に日本語版に加え英語版を追加実装した。プログラミング演習の例題の web ツールは、日本語及び英語のいずれでも実行できるように作成しているため、これで、web アプリケーションが日英のバイリンガル対応となり、日本だけでなく、ほぼ全世界の学習者に対する環境が整ったことになる。

また、COVID-19 の影響により、被験者の数は少数にとどまっているが、今回開発している web アプリケーションツールに対し、評価実験を一部実施し、その学習効果を計測しており、例題の web ツールにより、並列プログラミングのそれぞれに対し、理解度が深まっている傾向が確認されている。しかし、一部のツールにおいては、演習問題に偏りがあり、十分な学習効果があがっていないものがあるので、引き続き、内容の更新および改良が必要であることが分かった。

さらに、AVX および MPI の学習用 web アプリケーションに対するこれまでの研究成果を、並列プログラミングの教育に関する国際会議である EduPar で公表し、研究結果の公開に努めた。

### ( 5 ) 2022 年度

CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACC の各並列プログラミングツール向け学習ツールからなる web アプリケーションスイートに対し、音声付き電子教材の日本語版及び英語版を推敲し、完成度を高めた。プログラミング演習の例題の web ツールは、日本語及び英語のいずれでも実行できるように作成しており、COVID-19 の影響により、被験者の数は少数にとどまっているが、反転学習を用いた実際の学部の実験系講義において運用評価を行ない、有効性を確認した。

さらに、並列プログラミング教育の追加実装を検討するために、GPU ベースマシンを用いた量子アニーリング実行をするための Python 言語を用いたプログラミング環境と、FPGA による高速化 (アクセラレーション) を行うための OpenCL を用いたプログラミング環境を構築し、その基礎的な評価を行った。量子アニーリングでは巡回セールスマン問題やナップサック問題による予備評価で、制約条件が複雑なケースでは古典的解法より性能向上が見られた。また、FPGA アクセラレーションでは基本的な行列計算での並列化効果を確認した。

### ( 6 ) 2023 年度

CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACC の各並列プログラミングツール向け学習ツールからなる web アプリケーションスイートに対し、音声付き電子教材の日本語版及び英語版を改良し、完成度を高めた上で、実験を実施した。本アプリケーションスイートにおける演習問題は、プログラムデバッグ問題、出力推定問題と 2 種類の穴埋め問題からなり、音声付き電子教材

で得た知識の固定化を図るものであるが、MPI に対する穴埋め問題における実験において、MPI におけるプロセス ID(ランク)の計算は複雑なものなので、知識の固定化に関しては一定レベルにとどまったものの、全体的にはその効果が確認できた。

また、並列プログラミング学習に対する新たなシステムのための基礎実験として、LLM(大規模言語モデル) のひとつである OpenAI の API を用いて、エラーを含む C 言語のプログラムとエラーメッセージを LLM に入力として取り込み、適切な助言を出力するバーチャル TA (Teaching Assistant) システムを初心者レベルの学習者向けに試作し、その適確性を評価した。プログラミングエラーの中で、構文エラーと意味エラーについては概ね適確な助言が生成されており、学習者にとって自力で問題解決するのに十分であるが、論理エラーに対しては、いくつかのケースで一般的な説明に終始する程度の助言だけであったが、適確な助言を生成できている場合もあり、全般的には提案システムの有効性は確認できた。

以上のように、COVID-19 による研究活動の遅滞が発生したものの、2018 年度から 2018 年度にかけて、並列プログラミングの代表的なツールである、CUDA、OpenMP、POSIX thread、MPI、AVX、OpenACC に対して、音声付き電子教材と演習問題を自動生成される演習ツールからなる学習ツールを、web アプリケーションスイートとして完成させただけでなく、対応言語として日本語と英語のバイリンガルなものに改良し、実運用にてその教育効果を確認した。また、並列プログラミング対象を広げるために量子アニーリングのプログラミングの基礎実験や、新たな学習システムの基礎検討として、生成 AI を用いたプログラミング助言システムの試作も行った。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 若谷彰良	4. 巻 15
2. 論文標題 組合せ最適化問題に対する量子アニーリング方式の試用と考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 甲南大学紀要 知能情報学編	6. 最初と最後の頁 37-44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良	4. 巻 15
2. 論文標題 高位合成によるFPGAアクセラレータの試用と考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 甲南大学紀要 知能情報学編	6. 最初と最後の頁 83-90
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良, 前田利之	4. 巻 13
2. 論文標題 並列プログラミング教育のための 自学用Web アプリケーションスイートの試作	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 87-102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良	4. 巻 13
2. 論文標題 Incremental auto-tuning を用いたOpenCLのhybrid 並列化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 103-110
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良	4. 巻 12
2. 論文標題 GPU内蔵プロセッサにおけるhybrid並列のOn-the-fly自動チューニングの評価	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良, 浅見啓汰, 濱口昌寿	4. 巻 12
2. 論文標題 スマートスピーカ を利用した脳トレーニングアプリの試作	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 159-166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良	4. 巻 11
2. 論文標題 反転授業を用いた並列プログラミング教育	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 189-199
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良, 中谷秋栄	4. 巻 16
2. 論文標題 再帰関数を含むアプリケーションに対するOpenCLのハイブリッド並列	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 若谷彰良, 前田利之	4. 巻 16
2. 論文標題 生成AI を用いたC言語プログラミング学習のための助言システムの試作	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 甲南大学紀要知能情報学編	6. 最初と最後の頁 7-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 A. Wakatani and T. Maeda
2. 発表標題 Evaluation of Web-based tools for beginners in AVX and MPI parallel programming education
3. 学会等名 EduPar-21: 11th NSF/TCPP Workshop on Parallel and Distributed Computing Education (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Maeda and M. Yajima and A. Wakatani
2. 発表標題 Numerical Expression Treatment for Pseudo Natural Programming Language
3. 学会等名 The 2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Wakatani
2. 発表標題 Evaluation of on-the-fly auto-tuning of hybrid parallelization on processors with integrated graphics
3. 学会等名 4th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Maeda, C. Mitsuyasu and A.Wakatani
2 . 発表標題 Sports Skill Analysis for Motion Data Focused On Frequency
3 . 学会等名 23rd International Conference on Image Processing, Computer Vision, & Pattern Recognition (IPCV'19) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Maeda, M. Yajima and A.Wakatani
2 . 発表標題 Pseudo Natural Language Programming Environment for College Education
3 . 学会等名 8th Annual Hawaii International Conference on Education (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 A.Wakatani and T. Maeda
2 . 発表標題 WEB-BASED TOOLS FOR EDUCATION OF SHARED-MEMORY PARALLEL PROGRAMMING AND ITS APPLICATION TO FLIPPED CLASSROOM
3 . 学会等名 16th ICTEL 2019 International Conference on Teaching, Education & Learning (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Akiyoshi Wakatani, Toshiyuki Maeda
2 . 発表標題 Flip Teaching Approach of Education of AVX Programming using Web Applications
3 . 学会等名 17th Annual Hawaii International Conference of Education (国際学会)
4 . 発表年 2019年



1. 発表者名 Akiyoshi Wakatani
2. 発表標題 Hybrid Parallel Approach of Splitting-Up Conjugate Gradient Method for Distributed Memory Multicomputers
3. 学会等名 Future of Information and Communications Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akiyoshi Wakatani
2. 発表標題 Effectiveness of Hybrid Parallelization of Splitting-Up Conjugate Gradient Method on Supercomputers
3. 学会等名 10th International Conference on Engineering Computational Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Maeda, Yae Fukushige, Masumi Yajima, Akiyoshi Wakatani
2. 発表標題 Multi-Language Pseudo Natural Language Programming Environment for Beginners
3. 学会等名 World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications (ED-MEDIA 2018 (国際学会))
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiyuki Maeda, Masumi Yajima, Akiyoshi Wakatani
2. 発表標題 Frequency-based Skill Analysis for Motion Pictures
3. 学会等名 12th France-Japan and 10th Europe-Asia Congress on Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Wakatani and T. Maeda
2. 発表標題 Auto-generation of programming exercises for education of MPI and AVX parallel programming
3. 学会等名 17th annual International Conference of Education, Research and Innovation (INTED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiyuki Maeda, Masumi Yajima, Akiyoshi Wakatani
2. 発表標題 Improvement and Evaluation of Pseudo Natural Programming Language
3. 学会等名 19th International Conference on Frontiers in Education: Computer Science & Computer Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Wakatani
2. 発表標題 Incremental auto-tuning for hybrid parallelization using OpenCL
3. 学会等名 12th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IEEE IDAACS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Wakatani and T. Maeda
2. 発表標題 Prototype of a self-study web application suite for parallel programming education
3. 学会等名 18th annual International Conference of Education, Research and Innovation (INTED 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	前田 利之  (Maeda Toshiyuki)  (70320041)	阪南大学・総合情報学部・教授   (34425)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------