

ペア・プログラミング演習における ペア編成最適化手法の提案

田中頼人[†]

プログラミング演習時の協調学習の形態として、2人1組で作業を行う「ペア・プログラミング」がしばしば用いられる。この方式は先行事例の中で有効性が示されているが、学習者間の学力差を意識したペア編成の方法については未だに議論の途上である。本稿では「ペア内部の学力差」「複数のペアの間の学力差」を共に指標として扱うペア編成の組合せ最適化手法を提案する。最適化にはニューラルコンピューティングのアルゴリズムを用い、試作したシステムを大学初年次教育のプログラミング入門科目に適用して実践を行った。

A Proposal of Pair Formation Optimization Technique in Pair Programming Exercises

YORIHITO TANAKA[†]

At programming exercises, we often use a method of collaborative learning in pairs called "pair programming". Effectiveness of this method has been shown in the preceding examples, but the question of how to organize pairs being aware of differences of academic abilities among students is still open. In this paper, we propose a combinatorial optimization method of pair formation treating as indicators both "academic ability difference in paired learners" and "difference among pairs". We developed a prototype system using an optimization algorithm of neural computing, and practiced applying the system to introductory programming courses at a university.

1. はじめに

協調作業によるプログラミングの一形態として、2人のプログラマが1台のコンピュータに向かって作業を行う「ペア・プログラミング」がある。2人の中で入力装置を操作しプログラムを実装する人をドライバ、その様子を見ながらチェックや助言を行う人はナビゲータと呼ばれる。2つの役割を適宜入れ替えながら作業を進めることにより、問題への解決時間を短縮する効果が期待できる[1]。

このペア・プログラミングは学習現場でも導入されている。特に入門段階での演習に適用することで、初学者が躓く箇所を議論で解消すること、2人の目で精察することでプログラムの質を向上させることができる。これらの効用については実証実験によって有効性が確認されている[2][3]。また、演習の教室内ではプログラミングの経験や技術に関して学習者間の差が存在し、ペアによってそれらの差を解消することが学生の意欲向上につながるという報告もある[4]。

しかし、学習者間の学力の差異を前提とした具体的なペア編成の方法については、未だ確立されたとは言い難い。学力の差のみに着目する場合、これまでの議論の対象は「ペア内部での学力の差を大きくするか、小さくするか」であり、そのいずれの立場を取ったとしても、教室内で幅広く分布する学力の間での均衡を図るペア編成とはならない。

本稿では、学習者のペア内部の学力差とペア間の学力差を同時に指標として扱える組合せ最適化の手法を提案する。

2. ペアの編成方針

ペア・プログラミングのみならず、一般的にペアによる協調作業においては学力の差を大きくする編成が好ましいとされる。大矢ら[5]は情報基礎教育のペア編成において、学力差の大きいペアほど学習効果が高い傾向があることを示した。熊谷ら[6]はペア・プログラミングの実践に基づき、学力差の大きさが学習の効率向上に寄与したとしている。Jacobsら[7]は協調学習に関し「より勤勉な生徒がよい手本となる」「よくできる生徒が学力の低い生徒を手助けするので、よりいっそうの助け合いが起こる」と述べている。

その一方で、池島ら[8]は学力差が大きい場合にペア学習の意欲が下がり人間関係に影響を及ぼしかねないと報告しており、大矢ら[9]は「極端に差があるメンバー構成」によって必ずしも学習効果が生起しないケースがあり得る、としている。また、教室内全体の均衡に関し、Barkleyら[10]は「成績の高い学生同士のやりとりが十分にはできなくなり、学問的な刺激が少なくなる」という面を示している。

以上のように、ペア内の学力差を大きくすることは利点、欠点の両面が想定できるため、本研究では「学力差は大きくするが、それを唯一の指標とせず、他の指標と組合せる」という立場を取る。また学力差の大きさを優先して教室内全体のペア編成を行う場合「学力上位群と下位群に分け、1つ目のペアは上位群の中の最上位の者と下位群の中の最上位の者、2つ目のペアは上位群の中の2番目に上位の者と

[†]早稲田大学教育学部
Waseda University, School of Education
yori@sfc.keio.ac.jp

下位群の中の2番目に上位の者」とする方針が考えられるが、これはペア内部の学力差を全てのペアにおいてほぼ均一にできる一方で、ペア間の差が大きい構成となってしまう。ペア間の大きな差を作ることは、内田らの主張する「差の解消による学生の意欲向上」の指向に反する。

ここまでの条件を考慮し、本稿の提案方式では

1. ペア内部の学力の差を、教室全体として大きくする
2. ペア内部の学力差のばらつきを、教室全体として小さくする
3. ペア内部の学力の和のばらつきを、教室全体として小さくする

の3つを制約として与え、これらを同時に満たすような組合せ最適化を行うものとする。

3. 提案方式

3.1 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークの主な用途は機械学習、自己組織化、組合せ最適化である。本研究では学習者のペア編成を支援するために、組合せ最適化の手法を用いる。組合せ最適化のためのニューラルネットワークモデルは Hopfield が提案したもの[11]と、それを拡張した武藤らのモデル[12]が知られており、本研究では武藤らの手法を用いる。

ニューラルネットワークではニューロンと重み付きシナプスを構成要素とする。1つのニューロンからの出力がシナプスを經由して他のニューロンに伝達される処理の繰り返しにより、問題の制約条件を満たすようにエネルギー関数が最小化され、組合せ最適化問題を解くことができる。特にニューロン同士の間のシナプス結合を階層化せず、任意に決めることができるものをリカレント型ニューラルネットワークと呼ぶ。リカレント型ニューラルネットワークで最適化が可能である、すなわち解に向けて収束することの証明は武藤らによって行われている[13]。

リカレント型ニューラルネットワークによる問題解決の手順は、

1. 問題の状態をニューロンの配列に見立てた「ニューラル表現」で表す
2. ニューロンの状態を変化させ問題の制約条件を満たすための「動作式」を設計する
3. 乱数を用いてニューロンの状態を初期化する
4. 動作式により、各ニューロンの状態更新を繰り返す
5. 全体のエネルギーが最適値であれば、処理を終了させる

となる。

3.2 問題のニューラル表現

本研究では、演習中の教室に学習者が n 人いるものとし、学習者同士の組合せの状態を $n \times n$ の行列で表すものとする。 i 番目の学習者と j 番目の学習者を組ませることを

$V_{ij} = 1$, 組ませないことを $V_{ij} = 0$ とすれば、全ての組合せの状態を表現できる。表1は6人の学習者の間のペア編成を行った結果の、ある状態を示す。また、本研究では学習者の学力データを表2のように表す。表2では1番目の学習者の学力を30、4番目の学習者の学力は45である。学力の値としては、学習者に解答させた試験の結果を用いる。

	1	2	3	4	5	6
1	0	0	0	0	1	0
2	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	1	0	0

表1 ペア編成のニューラル表現(行列 V)

1	2	3	4	5	6
30	90	75	45	60	15

表2 学習者の学力

提案方式ではペア内部の学力の和、および差に着目するため、ニューラル表現では学力の和の行列 S と差の行列 D も用意する。表3と表4は、表2の学力データに基づいて行列 S と行列 D をそれぞれ示したものである。表3では2番目の学習者と4番目の学習者を組ませた際の学力の和 S_{24} は135、表4では2番目の学習者と4番目の学習者を組ませた際の学力の差 D_{24} は45である。

	1	2	3	4	5	6
1	60	120	105	75	90	45
2	120	180	165	135	150	105
3	105	165	150	120	135	90
4	75	135	120	90	105	60
5	90	150	135	105	120	75
6	45	105	90	60	75	30

表3 学力の和の行列(行列 S)

	1	2	3	4	5	6
1	0	60	45	15	30	15
2	60	0	15	45	30	75
3	45	15	0	30	15	60
4	15	45	30	0	15	30
5	30	30	15	15	0	45
6	15	75	60	30	45	0

表 4 学力の差の行列(行列 D)

3.3 動作式の設計

ニューラル表現を基に、最適化のための動作式の設計を行う。提案方式では学習者間の学力の差、および和に着目するとともに、教室内の全てのペア間のバランスを考慮するため、最適化問題の制約条件を以下のように与える。

制約 1. ある演習の時間内において、一人の学習者は他の一人の学習者のみと組む

制約 2. 一つのペア内において、学習者間の学力の差をなるべく大きくする

制約 3. 「ペア内の学力の差」のばらつきを、教室全体でなるべく小さくする

制約 4. 「ペア内の学力の和」のばらつきを、教室全体でなるべく小さくする

制約 3 を満たすために、「学習者 i と学習者 j を組ませた時の学力の差」から「教室全体における、ペア内の学力の差」の平均までの距離を関数 $v_diff(i,j)$ として表すと

$$v_diff(i,j) = abs(D_{ij} - \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n D_{ab} V_{ab}}{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n V_{ab}})$$

となる。同様に、制約 4 を満たすために学習者 i と学習者 j を組ませた時の学力の和」から「教室全体における、ペア内の学力の和」の平均までの距離を関数 $v_sum(i,j)$ として表すと

$$v_sum(i,j) = abs(S_{ij} - \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n S_{ab} V_{ab}}{\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n V_{ab}})$$

となる。 $v_diff(i,j)$ および $v_sum(i,j)$ と合わせ、同時に制約 2 も満たす場合、学習者 i と学習者 j を組ませる時の矛盾値 R_{ij} を定義すると

$$R_{ij} = \frac{v_diff(i,j) + v_sum(i,j)}{D_{ij} V_{ij}}$$

のように表せる。最適化の過程のニューロンの状態を表すために、先の行列 V と同一の大きさの行列 U を用意し、学習者 i と学習者 j の組の好ましさを程度を U_{ij} とする。この行列 U の状態を一次のオイラー法 $U(t+1) = U(t) + dU(t+1)$ にて更新する場合、矛盾値 R_{ij} をなるべく低くするために、 U の増分を

$$\frac{dU_{ij}}{dt} = -R_{ij} V_{ij}$$

として表す。これがリカレントニューラルネットワークを用いて最適化を行うための動作式である。制約条件 1 を満たすためには、行列 V の各々の行と列の中でただ一つのニューロンの値のみを 1 にするため、条件付マキシマムニューロンによる更新を行う。図 1 は、行列 U 中の全てのニューロンの中で最も値の大きいニューロンを発火させ、該当する行と列の他のニューロンが発火できないように処理を行う流れを示す。

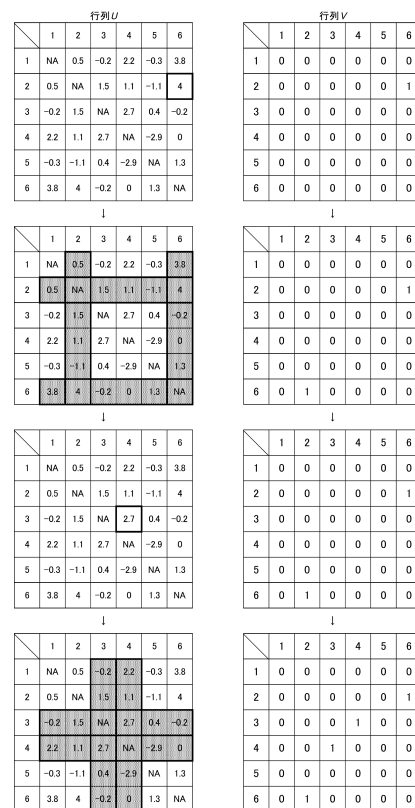


図 1 条件付マキシマムニューロンの動作

3.4 評価関数

制約を満たすように最適化を行う際の評価の基準として、エネルギー E を次のように定義する。

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} V_{ij}$$

これは行列内のすべての矛盾値の中での、実際に学習者間の組が成立した箇所のみ合計値である。E の値が小さいほど、優れたペア編成結果を出力できたと見なすことができる。

4. 試験運用

提案方式によるペア編成最適化システムを実装し、大学初年次向けのプログラミング入門科目において試験運用を行った。運用は予備実験、本実験の2フェーズに分け、両者はいずれも独立した半期の科目を対象とした。なお本稿執筆時点では本実験が完了していないため、本実験に関しては実験計画と評価方針のみを示す。

4.1 予備実験

慶應義塾大学湘南藤沢キャンパス科目「論理思考とプログラミング」内で行い、履修者は21名であった。プログラミングの経験や知識は一切仮定しない。1回を2コマ連続(180分)、計14回で構成し、第1回はオリエンテーションによる概要説明、第2回ではペア・プログラミングの方法と意義を伝え、近くに着座していた学習者同士でのペア作業を行った。第3回から第7回まではランダムなペア編成による演習、第7回時間中には中間試験を行い、その得点を学習者の学力データとして記録した。第8回から12回までは本稿提案方式による最適化を行い、第13回から14回までは任意テーマによる最終課題の制作と発表会を行った。

最終回に実験のディブリーフィングと質問紙調査を行い、最適化の概要を学習者に伝えた上で「演習で2人組となる相手を自分たちで決めたいですか?」という設問に対しては「毎回自分たちで決めたい」が1名、「なるべく自分たちで決めつつ、たまには組む相手を講師から指定してほしい」が5名、「毎回、組む相手を指定してほしい」が10名という結果が得られた。提案方式に基づいた最適化を行い、ペアの相手を講師から指定することに学習者は概ね好意的だと捉えることができる。

予備実験の目的は

- 最適化システムの導入がプログラミング演習の進行に混乱をもたらさないこと
- 最適化システムの導入とペアの指定が学習者に抵抗なく受け入れられること

の2点であるため、学習上の効果の検証は予備実験の段階では行っていない。学習上の効果に関しては、次に述べる本実験で確認を行う。

4.2 本実験

本実験は予備実験と同一の大学、および科目の中で進めている。本実験の目的は最適化処理の有無による学習上の効果の差異を確認することだが、学習者の数が十分とはいえないため実験群と統制群を設定した比較対照実験とはせず、単一主体実験計画法の一つであるA-B-A-Bデザインを採用した。ランダムなペア編成によるベースラインの測定

(A)の後に最適化による介入(B)を行い、介入を除去(A)した後に再度介入を行う(B)。各回の演習内容の違いによる影響を取り除くため、ベースライン(A)と介入(B)のそれぞれを演習2回分(2週間分)で構成した。

学力データは毎回の演習の最後に行う小テストによって取得し、介入の有無による効果の違いは小テストに付随する満足度調査(5段階のリッカート尺度)によって判断する。

5. おわりに

本稿では「ペア内部の学力差」「複数のペアの間の学力差」を共に指標として扱うペア編成最適化手法の提案を行った。ニューラルコンピューティングの最適化アルゴリズムを用い、試作したシステムを大学初年次向けプログラミング科目に適用して試験運用を進めている。今後は本実験の結果集計により提案方式の効果を明らかにし、さらに実験者と教育実験者を異にした追試を行いたい。提案方式では並列アルゴリズムを用いたため学習者数の増加に対する計算時間の増加を抑える効果も期待できる。これを検証することにより、MOOC(massive open online course)のような大規模学習環境への対応を図ることが、本研究の次の課題である。

参考文献

- 1) 平井佑樹, 井上智雄: ペアプログラミング学習における会話と問題解決の関係, 電子情報通信学会技術研究報告, 111(190), pp.61-66 (2011).
- 2) Williams, Laurie A. and Kessler, Robert R.: "Experimenting with Industry's "Pair-Programming" Model in the Computer Science Classroom", *Journal on Computer Science Education*, Vol. 11, Number 1, pp.7-20 (2001).
- 3) Charlie McDowell, Linda Werner, Heather Bullock, and Julian Fernald: "The effects of pair-programming on performance in an introductory programming course", *SIGCSE Bull.*, Vol. 34, Issue 1, pp.38-42 (2002).
- 4) 内田健, 清水哲也, 吉村晋: 創造実習科目でのグループリーダーを育成するためのプロジェクト活動におけるペアプログラミング導入に関する検討, *サレジオ工業高等専門学校研究紀要*, Vol. 37, pp.61-65 (2011).
- 5) 大矢芳彦, 内田君子: 情報基礎教育におけるペア学習の試みとその組み合わせ指標に関する基礎研究, *名古屋外国語大学外国語学部紀要*, Volume 36, pp.223-241 (2009).
- 6) 熊谷英紀, 山田敬三, 田中充, 佐々木淳: ペアプログラミング手法を活用したプログラミング教育方法の提案, *情報処理学会第71回全国大会講演論文集*, pp.335-336 (2009).
- 7) Gorge M. Jacobs, Michael A. Power, Loh Wan Inn: *The Teacher's Sourcebook for Cooperative Learning*, Corwin Press (2002).
- 8) 池島徳大, 福井 淳也: ピア・サポートを活かした協同学習, *奈良教育大学教職大学院研究紀要「学校教育実践研究」*, Vol. 4, pp.55-60 (2012).
- 9) 大矢芳彦, 内田君子: 大学の情報基礎教育におけるペア学習の有効性とその問題点, *名古屋外国語大学外国語学部紀要*, Vol. 34, pp.267-288 (2008).
- 10) E.F. Barkley, K.P. Cross, & C.H. Major: *Collaborative Learning Techniques: A handbook for college faculty*, John Wiley & Sons, Inc. (2005).
- 11) Hopfield, J.J.: Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 79 (8), pp.2554-8 (1982).
- 12) 武藤佳恭: *ニューラルネットワーク*, 産業図書 (1996).
- 13) 武藤佳恭: *ニューラルコンピューティング*, コロナ社 (1996)