

令和 3 年 6 月 27 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00321

研究課題名（和文）グラフ構造の分布情報とグラフ項の論理プログラムによる形式グラフ言語学習理論の研究

研究課題名（英文）Studies on computational learning theory of formal graph systems by graph structure distribution

研究代表者

正代 隆義（Takayoshi, Shoudai）

福岡工業大学・情報工学部・教授

研究者番号：50226304

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：形式グラフ体系(Formal Graph System, FGS)とは、グラフパターンを項とする論理プログラムである。本研究課題では、質問学習モデルを用いて、形式グラフ体系が定義するグラフ言語の多項式時間学習可能性を議論した。プリミティブ形式順序木体系(pFOTS)とは、ラベル付き順序木言語を定義する形式グラフ体系である。これは順序木言語の背景知識の表現に適している。本研究課題では、pFOTSによる順序木言語のクラスが質問学習モデルにより学習可能となる背景知識の条件を示した。さらに、正則パターン言語のクラスを質問学習モデル上で同定する線形時間学習アルゴリズムを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、計算論的学習理論における主要な学習モデルのうちAngluin(1988)の質問学習モデルを機械学習アルゴリズム設計と解析のためのベースとした。質問学習モデルは質問を用いた学習の数学モデルであり、巨大なデータベースから特徴的なパターンを質問を手段として抽出するためのデータマイニングのモデルとみることができる。質問学習モデルでは、仮説に関する質問に答える教師(オラクル)に対する質問回数により計算の複雑さが評価される。効率の良い学習アルゴリズムを質問学習モデル上で提案した本研究結果はグラフ構造データに対する理論的かつ実用的な機械学習技術の基盤となる。

研究成果の概要（英文）：Formal graph system (FGS) is a logic program that deals with graph-structured patterns as the terms of first-order predicate logic. In this research, we have studied the polynomial-time learnability of formal graph systems in the frameworks of the query-learning model. Based on an FGS, we introduce a primitive formal ordered tree system (pFOTS) as a formal system defining labeled ordered tree languages. A logic program is well-known to be suitable to represent background knowledge. In this research, we give a query learning algorithm of a target tree language defined by a pFOTS, which uses a polynomial number of queries. Moreover, we show that the class of languages of regular patterns is identifiable from one positive example using a linear number of membership queries with respect to the length of the positive example. This is a fundamental result toward an efficient query-learning algorithm for formal graph languages.

研究分野：計算機科学

キーワード：計算論的学習理論 質問学習 帰納推論 機械学習 形式グラフ体系 形式グラフ言語 グラフパターン グラフアルゴリズム

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

薬理学の分野では化学化合物の分子構造を解明するために、原子を頂点、原子間の化学結合を辺としたグラフ(これを化学化合物グラフと呼ぶ)のデータマイニングが行われている。また、社会学におけるソーシャルネットワークの解析や、ウェブページ間のリンク構造を表すウェブグラフを利用したウェブコミュニティの抽出など、グラフとして表現したデータを直接扱うこと、及びその技術の開発が盛んに行われてきている。このようないわゆるグラフマイニングにおける主要な課題のひとつが、グラフデータに頻出する部分グラフを抽出する頻出部分グラフマイニングと呼ばれるアルゴリズム技術であり、gSpan [Yan and Han, 2002]、AGM [Inokuchi et al., 2000]、Gaston [Nijssen and Kok, 2004]、FSG [Kuramochi and Karypis, 2001]などがある。頻出部分グラフマイニングは、グラフデータに頻出するローカルな共通性を抽出するものである。このようなグラフデータを扱う計算問題の中には、一般のグラフを対象とした場合、探索すべき解の個数が組合せ爆発を起こして天文学的数字になるという厄介な問題点を持つものがある。実際、一般のグラフを扱う頻出部分グラフマイニングもそのひとつである。そのような組合せ爆発を避けるためのアプローチとして、Horváth ら(2010)はグラフ理論でよく知られている外平面的グラフクラスに着目し、効率的な頻出連結部分グラフマイニングアルゴリズムを提案した。一方、形式言語学習理論の研究では、文脈自由言語の学習に関して、近年、語句の分布情報を利用する「分布学習」と総称される方法論が成果を挙げている。Clark と Yoshinaka(2014)は、文脈自由言語を超える複雑な文法形式にも分布学習が一般的な方法で拡張できることを示し、さらに正例のみから高精度高確度の確率的アルゴリズムを提案した。

こうしたグラフマイニングと形式言語学習理論の一連の研究の中で、我々は、項木パターンと呼ばれる順序木構造を持ったグラフパターンを導入し、計算論的学習理論における主要な学習モデルである正例からの帰納推論と質問学習において、与えられた順序木データベースから項木パターンを学習する多項式時間アルゴリズムを提案した。グラフデータベースから魅力的な構造的知識を効率良く発見するために大きな役割を担うのがグラフパターンのデザインである。我々は基本的なグラフパターンとして、超辺置換(Hyperedge Replacement)によるグラフパターン「項グラフパターン」と辺縮約(Edge Contraction)によるグラフパターン「グラフ縮約パターン」を提案し、そのグラフ言語に関する多項式時間機械学習可能性を議論した。本研究課題ではこのようなパターンをまとめてグラフ項と呼ぶ。

我々は、[Yamasaki et al., 2009]において外平面的グラフクラスに基づく項グラフパターンを定義し、計算論的学習理論の観点から、効率の良い機械学習アルゴリズムを提案した。項グラフパターンは、複数の頻出部分グラフがどのように配置されているか等のグローバルな構造を表現することが出来るグラフパターンである。さらにその研究の中で、ブロック保存型外平面的グラフパターン(BPO グラフパターン)と呼ばれる項グラフパターンを導入し、そのパターンによるグラフマイニングアルゴリズムを提案して、薬理学における化学化合物データベースである NCI データベース(<https://cactus.nci.nih.gov/download/nci/>)から効率良くパターンを発見することに成功した。BPO グラフパターンは変数構造を持つグラフパターンである。BPO グラフパターンはいくつかの部分グラフ(ブロック)の繋がりを超辺置換により表現したものであり、部分グラフよりも真に表現力が大きい。

2. 研究の目的

これまでの研究では、主としてグラフ理論的グラフクラスに基づく形式グラフ言語の多項式時間機械学習可能性を解明することを目標としていた。一方、本研究課題では、グラフ構造の分布情報とグラフ項の論理プログラムを用いる形式グラフ言語学習理論の構築を目的とした。それによって、グラフ理論的グラフクラスに囚われない新しいグラフマイニングシステムのための基盤技術確立を目指した。また、計算論的学習理論における質問学習モデルを用いて学習アルゴリズムの高速化を行うための基盤技術の確立を目指した。

3. 研究の方法

本論文では、形式グラフ体系(Formal Graph System, FGS)により設計されたグラフパターンクラスの多項式時間学習可能性について議論する。形式グラフ体系は、Uchida ら[3]によって導入されたグラフを対象とする一種の論理プログラムである。形式グラフ体系によって生成される言語を形式グラフ体系言語と呼ぶ。木、順序木、外平面的グラフのクラスは形式グラフ体系言語である。このことから、形式グラフ体系を用いることで今までのグラフパターン設計手法を統一的に扱うことができる。それに加えて、形式グラフ体系の論理プログラムのな特徴を用いることで、多項式時間学習可能な形式グラフ体系言語クラスを明らかにすることが期待できる。論理プログラムの機械学習に関する限界は、我々のグラフパターンクラスにも同じかそれ以上に重要な問題となる。これには、グラフパターンクラス空間の効率の良い探索手法の確立が不可欠である。

計算論的学習理論は、ある概念を学習することが本質的にどれほどの計算時間やメモリなどの計算資源を必要とするかという問題を数学的に研究する分野である。このような問題を扱う理論の枠組として、PAC 学習(Probably Approximately Correctly Learning)がある。これは、学習ア

ルゴリズムの出す仮説に誤差を許しており、たとえ目標とする概念と完全には一致しなくても、そのようなことが稀にしか起こらないのであれば、それを良い仮説とみなす。多項式時間 PAC 学習可能な言語クラスとして、基本形式体系(Elementary Formal System, EFS)言語のサブクラスがある。基本形式体系は、形式グラフ体系がグラフを直接扱うことに対して、文字列を直接扱うことができる一種の論理プログラムである。基本形式体系は、PAC 学習モデルによる結果以外にも、帰納推論モデル、質問学習モデルによる学習可能性に関する結果があり、計算論的学習理論と馴染みが深い。

本研究課題では、計算論的学習モデルのうち質問学習モデルに着目する。質問学習モデルは質問を用いた学習の数学モデルである[1]。また、質問学習モデルは巨大なデータベースから特徴的なパターンを抽出するデータマイニングのモデルとしてみることもできる。これは高精度で学習が完了した学習済みモデルの内部を明らかにするための数学モデルとも考えることもできる。質問学習モデルでは、仮説に関する質問に答える教師(オラクル)を用いて目標とする仮説を計算する(図 1)。目標とする仮説を求める際に用いる質問の回数により学習アルゴリズムの計算量が評価される。この質問学習モデルにおいて、本研究課題では形式グラフ体系のクラスである順序木言語のプリミティブ形式体系の質問学習可能性を議論した。また、形式グラフ体系言語に対する質問学習の基盤を確立するために、正則パターン言語のクラスに対する線形時間質問学習可能性を議論した。

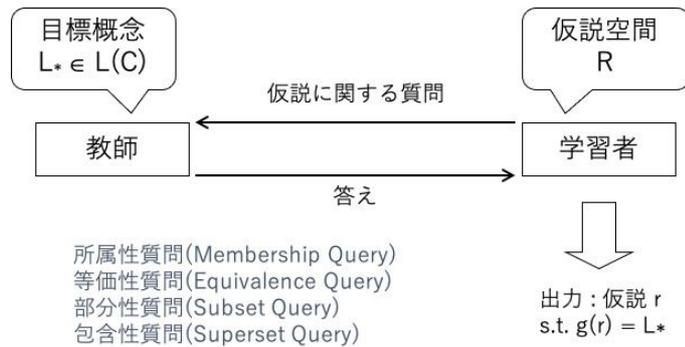


図 1 Angluin の質問学習モデル[1]

4. 研究成果

(1) 順序木言語の形式体系に対する線形時間質問学習アルゴリズム

順序木言語のプリミティブ形式体系(primitive Formal Ordered Tree System, pFOTS)とは、本研究課題で提案された形式グラフ体系の一種である。pFOTS はラベル付き順序木言語を定義する形式体系であり、1 階述語論理の項の代わりに項木パターンを用いた論理プログラミングシステムである。pFOTS プログラムは、確定節であるグラフ書き換えルールの有限集合として定義される。そのため、pFOTS プログラムは順序木言語の背景知識の表現に適している。本研究課題では、pFOTS プログラムによる背景知識 Γ と 1 つのグラフ書き換えルールで定義される順序木言語のクラスが 1 つの正例と多項式回の所属性質問を用いた質問学習モデルにより学習可能となる背景知識 Γ の条件を示した。

Σ と Λ を有限アルファベット、 X を無限アルファベットとする。 X の要素を変数ラベルと呼ぶ。 $(\Sigma \cup \Lambda) \cap X = \emptyset$ が成り立つとする。 Σ に含まれる記号を頂点ラベルとし、 $\Lambda \cup X$ に含まれる記号を辺ラベルとするラベル付き順序木を、 $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターンと呼ぶ。変数ラベルを持つ辺を変数と呼ぶ。 $t = (V_t, E_t)$ を、 V_t を頂点集合、 E_t を辺集合とする $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターンとする。 $x \in X$ に対して、 x を変数ラベルとする t の変数の個数を $o(t, x)$ で表す。 $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -線形順序頂木パターン $t = (V_t, E_t)$ とは、任意の $x \in X$ に対して、 $o(t, x) \leq 1$ となる $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターンである。特に、変数を持たない $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターン、すなわち $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序頂木パターンを $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木と呼ぶ。 $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木全体集合を $OT_{\Sigma, \Lambda}$ で表す。2 つの頂点と 1 つの変数から成る $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターンはプリミティブであるという。

f と g を少なくとも 2 つの頂点を持つ $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターンとする。 $\sigma = [u, v]$ を g の異なる頂点の対とする。 $x \in X$ に対して形式 $x := [g, \sigma]$ を $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ 上の束縛と呼ぶ。束縛 $x := [g, \sigma]$ を f に適用して得られる $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターン $f\{x := [g, \sigma]\}$ を次のような操作により得られる $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -

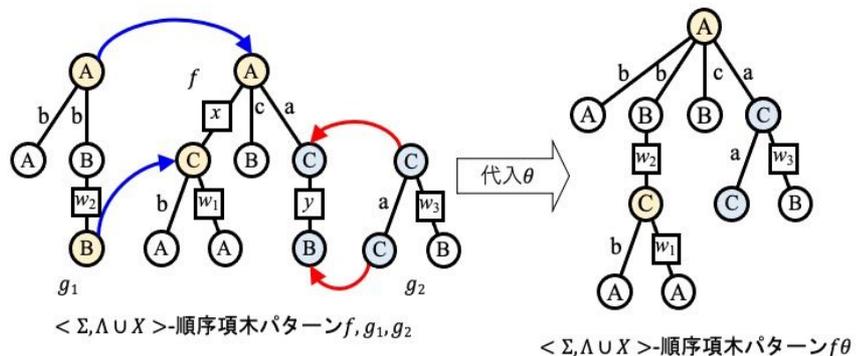


図 2 順序頂木パターンへの代入

る。代入とは束縛の有限集合 θ である。 $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序頂木パターン f に対して代入を適用した

とき、代入に含まれる束縛を全て同時に f へ適用して得られる $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -順序項木パターン $f\theta$ が得られる(図 2)。

1 引数述語記号を p, q, p_1, q_1, \dots などで表す。 Π を1引数述語記号の集合とする。1引数述語記号 $p \in \Pi$ と $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -線形順序項木 t からなる表現 $p(t)$ をアトムと呼ぶ。 A, B_1, \dots, B_m をアトムとする($m \geq 0$)。 $\langle \Pi, \Lambda \cup X \rangle$ 上のグラフ書き換えルール(graph rewriting rule)とは、 $A \leftarrow B_1, \dots, B_m$ という形式の確定節である。以後、グラフ書き換えルールを単にルールと呼ぶ。 A をヘッド、 B_1, \dots, B_m をボディと呼ぶ。 $m = 0$ のときのルールをファクトと呼ぶ。ルール $p(t) \leftarrow q_1(f_1), \dots, q_m(f_m)$ は次の条件(i)-(iii)を満たすとき、プリミティブであるという:

- (i) $m \geq 1$ のとき、 f_i ($1 \leq i \leq m$)はプリミティブな $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -線形順序項木パターンである、
- (ii) $m = 0$ のとき、 t は頂点数2の $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木である、

(iii) 任意の変数ラベル $x \in X$ に対して、 $o(f_1, x) + \dots + o(f_m, x) = 1$ となる必要十分条件は $o(t, x) = 1$ である。

プリミティブなルールの有限集合をプリミティブ形式体系(pFOTS)プログラムと呼ぶ(図 3 に例をあげる)。 $\langle \Pi, \Lambda \cup X \rangle$ 上の pFOTS プログラム Γ と $p \in \Pi$ に対して、 $L(\Gamma, p) = \{g \in OT_{\Sigma, \Lambda} \mid p(g)$ は Γ のルールと代入、モーダスポネンスを使って証明可能なアトム $\}$ と定める。

Γ を $\langle \Pi, \Lambda \cup X \rangle$ 上の pFOTS プログラムとし、背景知識とみなす。学習アルゴリズムには事前に Γ が与えられる。 $\Pi^h(\Gamma)$ を Γ に含まれるルールのヘッドに現れる述語記号全体とし、 $\Pi^b(\Gamma)$ を Γ に含まれるルールのボディに現れる述語記号全体とする。さらに、 $\Pi(\Gamma) = \Pi^h(\Gamma) \cup \Pi^b(\Gamma)$ と定める。 $\Pi \setminus \Pi(\Gamma)$ の述語記号 r に対して、 $pGRR(\Gamma, r)$ は $\Pi^h(\{\alpha\}) = \{r\}$ かつ $\Pi^b(\{\alpha\}) \subseteq \Pi^h(\Gamma)$ となるプリミティブなルール α の全体集合を表す。

言語クラス $\{L(\Gamma \cup \{\alpha\}, r) \mid \alpha \in pGRR(\Gamma, r)\}$ の学習可能性について考える。学習モデルとして Angluin(1988)によって提唱された質問学習モデルを用いる。ルール α^* を $pGRR(\Gamma, r)$ の目標ルールとする。 $L(\Gamma \cup \{\alpha^*\}, r)$ に含まれる $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木を正例と呼ぶ。学習アルゴリズムはオラクルを用いて目標ルール α^* に関する情報を獲得することが可能である。所属性質問のためのオラクルとは、 $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木 t を入力し、 t が正例ならば yes を返し、それ以外ならば no を返すオラクルである。 Γ を $\langle \Pi, \Lambda \cup X \rangle$ 上の pFOTS プログラムとする。 a を Λ の辺ラベルとする。 $P(a)$ は a を辺ラベルとして持つファクトの述語記号の集合と定める。任意の述語記号 $p \in \Pi(\Gamma)$ に対して、 $P(a_1) \cap P(a_2) = \{p\}$ となる相異なる辺ラベル a_1, a_2 が存在するとき、 Γ は条件 1 を満たすという。 Γ に含まれるファクト以外のルールのヘッドに現れる $\langle \Sigma, \Lambda \cup X \rangle$ -線形順序項木パターンの集合を $H(\Gamma)$ とする。次の定理が本研究の主結果である。

定理 1: $|\Lambda| \geq 2$ とする。 Γ を、 $|\Pi(\Gamma)| = 1$ となる pFOTS プログラム、または $|\Pi(\Gamma)| \geq 2$ で条件 1 を満たす pFOTS プログラムとする。 $r \in \Pi \setminus \Pi(\Gamma)$ の述語記号とする。正例となる $\langle \Sigma, \Lambda \rangle$ -順序木 t が与えられたとき、 $pGRR(\Gamma, r)$ の目標ルールを $O(N^2)$ 回の所属性質問を用いて同定可能である。ただし、 N は t の辺の個数を表す。

(2) 正則パターン言語族に対する線形時間質問学習アルゴリズム

質問学習モデルにおいて、正則パターン言語のクラスは、1つの正例から正例の長さの多項式回数の所属性質問を用いて質問学習可能であることが知られている[2]。本研究では、1つの正例と正例の長さの線形回数の所属性質問を用いて正則パターン言語のクラスを同定する質問学習アルゴリズムを提案した。これは正則パターン言語のクラスに対する最適な質問学習アルゴリズムであり、そのアルゴリズムのアイデアは他の記号列上の言語だけでなく順序木言語、さらにグラフ言語へも適用が期待できる研究成果である。

定数記号と互いに異なる変数記号とからなる記号列を正則パターンという。正則パターン π に対して、すべての変数記号を定数記号列で置き換える操作(θ で表す)を π に対して適用して得られる全ての記号列($\theta(\pi)$ で表す)の集合を π の正則パターン言語といい、 $L(\pi)$ で表す。例えば、 $\pi = axabya$ は定数記号 a, b と変数記号 x, y とからなる正則パターンであり、 π の正則パターン言語は

$$L(\pi) = \{w \mid w = \theta(\pi) \text{ となる操作 } \theta \text{ が存在する}\} = \{aaabaa, ababaa, aaabba, ababba, \dots\}$$

である。記号列 w の長さを $|w|$ で表す。自然数 i, j ($1 \leq i \leq j \leq |w|$)に対し、 w の i 番目の記号を $w[i]$ で、 w の i 番目から j 番目までの部分記号列 $w[i]w[i+1] \dots w[j]$ を $w[i:j]$ で表す。

質問学習モデルでは、学習アルゴリズムはオラクルへ質問することで目標言語 L_π に対する情報を獲得する。本研究でも、研究成果(1)と同様に、記号列 w をオラクルに与えたとき、 w が L_π に属する(つまり w は正例である)ならばオラクルから yes が返り、それ以外なら no が返ってくる所属性質問を用いる。正則パターン言語族に対する学習アルゴリズムを図 4 に示す。アルゴリズム 1 は位置 i を1から $|w|$ までカウントアップしながら、所属性質問を用いて与えられた記号列より

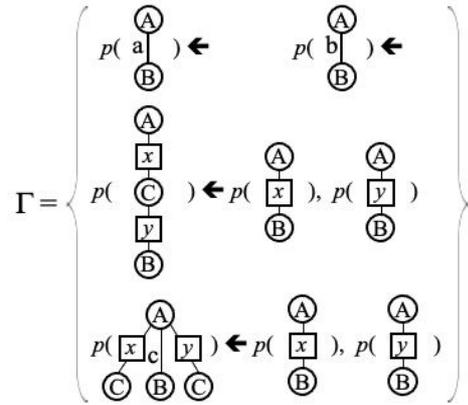


図 3 プリミティブ形式体系の例

短い正例を生成する手続き *ShrinkString* と i 番目の文字変数記号か定数記号を決定する手続き *IdentifyVariables* を実行して、次の 2 条件を満たす正例 w を更新していく:

(i) $\theta_i(\pi[1:i]) = w[1:i]$ かつ $\theta_i(\pi) = w$ となる操作 θ_i が存在する、

(ii) $i < j \leq |w|$ となる自然数 j に対して、 $\theta_j(\pi[1:i]) = w[1:j]$ かつ $\theta_j(\pi) = w$ となる操作 θ_j は存在しない。

位置 i を順に増加させながら、所属性質問を用いてこの 2 条件を満たすことをチェックしながら正例 w を短くしていくため、所属性質問の回数を線形に抑えられる。現在、同様の質問学習設定で、順序木パターン言語のクラスに対する質問学習アルゴリズムを開発中である。次の定理が本研究の主結果である。

定理 2: L_* を目標である正則パターン言語とする。アルゴリズム 1 (図 4) は 1 つの正例 w と $O(|w|)$ 回の所属性質問を用いて $L(\pi) = L_*$ となる正則パターン π を出力する。

アルゴリズム 1:

入力: 正例 $w \in L_*$

出力: $L(\pi) = L_*$ となる正則パターン π

$i := 1, k := 0, vSet := \emptyset;$

while $i \leq |w|$ **do**

$w := ShrinkString(w, i, k);$

$k := IdentifyVariables(w, i, k);$

if $k \neq 0$ **and** $k \notin vSet$ **then**

$vSet := vSet \cup \{k\}$

$i := i + 1;$

end while

$\pi := w;$

for all $i \in vSet$ **do**

π の i 番目の定数記号を変数記号 x_i に置き換える;

end for

output $\pi;$

図 4 正則パターン言語族の質問学習アルゴリズム

(3) ワイルドカード付きブロック保存型外平面的グラフパターンの進化的獲得

ブロック保存型外平面的グラフパターン(Block Preserving Outerplanar graph pattern, BPO-グラフパターン[4])を構造的特徴表現とする。本研究では、正例と負例の外平面的グラフから、ブロック木パターンに対する遺伝的プログラミングを用いて特徴的な BPO-グラフパターンを獲得する進化的手法を議論した。遺伝的プログラミング(Genetic Programming, GP)とは遺伝的アルゴリズムの遺伝子型を木構造のような構造的表現を扱えるように拡張した進化的手法である。ブロック木パターンとは BPO-グラフパターンの木表現である。ワイルドカード付き BPO-グラフパターンとは、頂点ラベルのワイルドカード(任意の頂点ラベルとマッチする)と辺ラベルのワイルドカード(任意の辺ラベルとマッチする)を持つように表現を拡張した BPO-グラフパターンである(図 5)。複合的ワイルドカード付き BPO-グラフパターンとは、ワイルドカード付き BPO-グラフパターンの集合である。

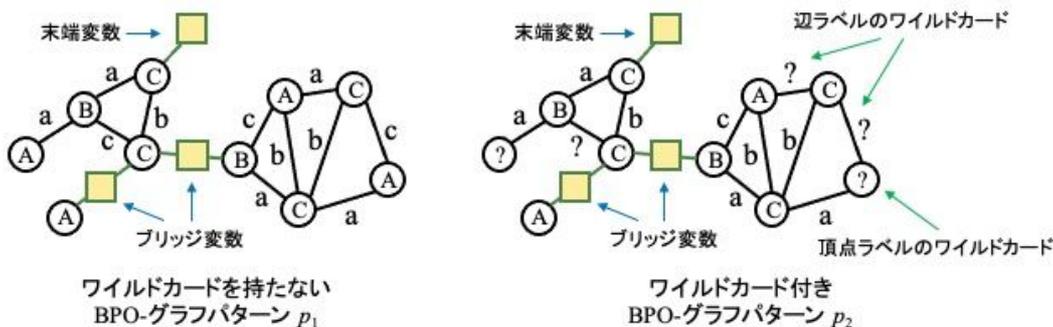


図 5 ワイルドカード付き BPO グラフパターン

本研究では、遺伝的プログラミングを拡張した二段階構造の進化的学習により、正例から抽出したラベル情報を利用して特徴的な複合的ワイルドカード付き BPO-グラフパターンを個体として獲得する手法を提案した。NCI データベースから入手した外平面的グラフとみなせるデータから正例と負例を選択して本手法を適用した結果、提案手法は単一ワイルドカード付き BPO-グラフパターンを獲得する従来手法よりも、早い段階で特徴的なワイルドカード付き BPO-グラフパターンに収束することがわかった。

引用文献

1. D. Angluin: Queries and concept learning, *Machine Learning*, 2(4), pp.319-342 (1988)
2. S. Matsumoto and A. Shinohara: Learning pattern languages using queries, In Proc. EuroCOLT '97, LNAI 1208, Springer, pp.185-197 (1997)
3. T. Uchida et al.: Parallel algorithms for refutation tree problem on formal graph systems, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, E78-D(2), pp. 99-112 (1995)
4. H. Yamasaki et al.: Learning Block-Preserving Graph Patterns and Its Application to Data Mining, *Machine Learning*, 76, pp. 137-173 (2009)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 Satoshi MATSUMOTO, Tomoyuki UCHIDA, Takayoshi SHOUDAI, Yusuke SUZUKI, Tetsuhiro MIYAHARA	4. 巻 E103.D
2. 論文標題 An Efficient Learning Algorithm for Regular Pattern Languages Using One Positive Example and a Linear Number of Membership Queries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 526 - 539
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2019FCP0009	査読の有無 有
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 Yusuke Suzuki, Tetsuhiro Miyahara, Takayoshi Shoudai, Tomoyuki Uchida, Satoshi Matsumoto, Tetsuji Kuboyama	4. 巻 12
2. 論文標題 Enumeration of Maximally Frequent Ordered Tree Patterns with Height-Constrained Variables for Trees	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IP SJ Transactions on Mathematical Modeling and Its Applications	6. 最初と最後の頁 78 - 88
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 有
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 UCHIDA Tomoyuki, MATSUMOTO Satoshi, SHOUDAI Takayoshi, SUZUKI Yusuke, MIYAHARA Tetsuhiro	4. 巻 E102.D
2. 論文標題 Exact Learning of Primitive Formal Systems Defining Labeled Ordered Tree Languages via Queries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 470 ~ 482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018FCP0011	査読の有無 有
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 Matsumoto Satoshi, Uchida Tomoyuki, Shoudai Takayoshi, Suzuki Yusuke, Miyahara Tetsuhiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Exact Learning of Regular Pattern Languages from One Positive Example Using a Linear Number of Membership Queries	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS) 2019	6. 最初と最後の頁 204 ~ 209
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 有
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 Tokuhara Fumiya, Miyahara Tetsuhiro, Kuboyama Tetsuji, Suzuki Yusuke, Uchida Tomoyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Acquisition of characteristic sets of block preserving outerplanar graph patterns by a two-stage evolutionary learning method for graph pattern sets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Computational Intelligence Studies	6. 最初と最後の頁 270 ~ 288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1504/IJCISTUDIES.2018.096191	査読の有無 有
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 Yamagata Yuuki, Tokuhara Fumiya, Inaba Yuito, Muratani Kouki, Miyahara Tetsuhiro, Suzuki Yusuke, Uchida Tomoyuki, Kuboyama Tetsuji	4. 巻 -
2. 論文標題 Evolutionary Learning of Multiple TTSP Graph Structured Patterns from Positive and Negative TTSP Graph Data: Its Graph Pattern Display System and Performance Evaluation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of The 22nd Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems (IES 2018)	6. 最初と最後の頁 120 ~ 127
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 有
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 SHOUDAI Takayoshi, MIYAHARA Tetsuhiro, UCHIDA Tomoyuki, MATSUMOTO Satoshi, SUZUKI Yusuke	4. 巻 E101.A
2. 論文標題 An Efficient Pattern Matching Algorithm for Unordered Term Tree Patterns of Bounded Dimension	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1344 ~ 1354
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E101.A.1344	査読の有無 有
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 Tomoyuki Uchida, Satoshi Matsumoto, Takayoshi Shoudai, Yusuke Suzuki, Tetsuhiro Miyahara	4. 巻 2085
2. 論文標題 Learning of Primitive Formal Systems Defining Labelled Ordered Tree Languages via Queries	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 CEUR Workshop Proceedings	6. 最初と最後の頁 61 - 66
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 有
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 Takayoshi Shoudai, Yuta Yoshimura, Yusuke Suzuki, Tomoyuki Uchida, Tetsuhiro Miyahara	4. 巻 E101-D(3)
2. 論文標題 Polynomial Time Learnability of Graph Pattern Languages Defined by Cographs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 582 - 592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2017FCP0005	査読の有無 有
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 Fumiya Tokuhara, Tetsuhiro Miyahara, Tetsuji Kuboyama, Yusuke Suzuki, Tomoyuki Uchida	4. 巻 -
2. 論文標題 Acquisition of Multiple Block Preserving Outerplanar Graph Patterns by an Evolutionary Method for Graph Pattern Sets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 2017 IEEE 10th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA)	6. 最初と最後の頁 191 - 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IWCIA.2017.8203583	査読の有無 有
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 -

〔学会発表〕 計17件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 酒井 笑理, 鈴木 祐介, 内田 智之, 宮原 哲浩
2. 発表標題 1変数項木パターンに対するマッチングアルゴリズムの改良
3. 学会等名 情報処理学会第182回アルゴリズム研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 哲志, 鈴木 祐介, 正代 隆義, 内田 智之, 宮原 哲浩
2. 発表標題 1つの正例と線形回数の所属性質問により学習可能な順序木言語族の部分クラスについて
3. 学会等名 第25回情報・統計科学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 轟 翰, 内田 智之, 宮原 哲浩, 鈴木 祐介
2. 発表標題 学習済み深層学習モデルに対する木パターンによる説明可能表現とその抽出手法の提案
3. 学会等名 2020 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川崎 有馬, 宮原 哲浩, 山縣 佑貴, 徳原 史也, 鈴木 祐介, 内田 智之, 久保山 哲二
2. 発表標題 進化的学習による複合的なワイルドカード付きTTSPグラフパターンの獲得
3. 学会等名 2020 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 徳原 史也, 沖永 志帆, 宮原 哲浩, 鈴木 祐介, 久保山 哲二, 内田 智之
2. 発表標題 ラベル情報を利用した進化的学習による複合的なワイルドカード付きブロック保存型外平面的グラフパターンの獲得
3. 学会等名 2020年度 人工知能学会全国大会 (第34回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fumiya Tokuhara, Shiho Okinaga, Tetsuhiro Miyahara, Yusuke Suzuki, Tetsuji Kuboyama, Tomoyuki Uchida
2. 発表標題 Using Label Information in a Genetic Programming Based Method for Acquiring Block Preserving Outerplanar Graph Patterns with Wildcards
3. 学会等名 2019 IEEE 11th International Workshop on Computational Intelligence and Applications (IWCIA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 哲志, 正代 隆義, 内田 智之, 鈴木 祐介, 宮原 哲浩
2. 発表標題 A Learning Algorithm for Erasing Regular Pattern Languages Using One Positive Example and a Linear Number of Membership Queries
3. 学会等名 情報処理学会第174回アルゴリズム研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 正代 隆義
2. 発表標題 線形回数の所属性質問と1つの正例を用いた正則パターン言語の質問学習
3. 学会等名 第17回論理と計算セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳原 史也, 沖永 志帆, 宮原 哲浩, 鈴木 祐介, 久保山 哲二, 内田 智之
2. 発表標題 ワイルドカード付きブロック保存型外平面的グラフパターンの進化的獲得におけるラベル情報の利用
3. 学会等名 2019 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沖永 志帆, 徳原 史也, 宮原 哲浩, 鈴木 祐介, 久保山 哲二, 内田 智之
2. 発表標題 遺伝的プログラミングによるワイルドカード付きブロック保存型外平面的グラフパターンの獲得
3. 学会等名 2019年度人工知能学会全国大会 (第33回)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 哲志、内田 智之、正代 隆義、鈴木 祐介、宮原 哲浩
2. 発表標題 線形回数の所属性質問と1つの正例による正則パターン言語族に対する質問学習アルゴリズム
3. 学会等名 2019年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本 哲志、正代 隆義、内田 智之、鈴木 祐介、宮原 哲浩
2. 発表標題 正則パターン言語族に対する1つの正例と線形回数の所属性質問による学習アルゴリズム
3. 学会等名 第23回情報・統計科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳原 史也、宮原 哲浩、久保山 哲二、鈴木 祐介、内田 智之
2. 発表標題 外平面的グラフのクラスタリングによる複合的なブロック保存型外平面的グラフパターンの進化的獲得
3. 学会等名 2018年度人工知能学会全国大会（第32回）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松本 哲志、内田 智之、正代 隆義、鈴木 祐介、宮原 哲浩
2. 発表標題 順序木言語のプリミティブ形式体系に対する1つの正例と所属性質問による学習アルゴリズム
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鈴木 祐介, 宮原 哲浩, 正代 隆義, 内田 智之, 松本 哲志, 久保山 哲二
2. 発表標題 Enumeration of Maximally Frequent Ordered Tree Patterns with Height-Constrained Variables for Trees
3. 学会等名 情報処理学会第117回数理モデル化と問題解決研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoyuki Uchida, Satoshi Matsumoto, Takayoshi Shoudai, Yusuke Suzuki, and Tetsuhiro Miyahara
2. 発表標題 Learning of Primitive Formal Systems Defining Labeled Ordered Tree Languages via Queries
3. 学会等名 2017年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 正代 隆義, 内田 智之, 松本 哲志, 鈴木 祐介, 宮原 哲浩
2. 発表標題 順序木言語に対するプリミティブ形式体系の質問学習アルゴリズム
3. 学会等名 第22回情報・統計科学シンポジウム
4. 発表年 2017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	内田 智之 (Uchida Tomoyuki) (70264934)	広島市立大学・情報科学研究科・准教授 (25403)	

6. 研究組織（つづき）

	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	宮原 哲浩 (Tetsuhiro Miyahara) (90209932)	広島市立大学・情報科学研究科・准教授 (25403)	

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