

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26870270

研究課題名(和文)木およびグラフ変換における問合せ保存の自動検証

研究課題名(英文)Verification of query preservation for tree and graph transformations

研究代表者

橋本 健二 (Hashimoto, Kenji)

名古屋大学・情報学研究科・助教

研究者番号：90548447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：木やグラフ構造データにおける問合せ保存性の検証可能性について調査し自動検証技術を開発することを目指した。本研究では、木構造データに対する変換に対して、2種類の問合せクラスに対する問合せ保存性の判定問題の計算量クラスの上界や下界を与えた。また、非線形な木変換における問合せ保存性について検討し、問合せ保存と類似した確定性について非線形な木変換における決定可能な十分条件を与えた。さらに、非決定性変換における問合せ保存性について検討し2種類の定義を与えた。そして、それぞれの定義について決定可能となる変換や問合せクラスもしくは決定可能な十分条件を与えた。

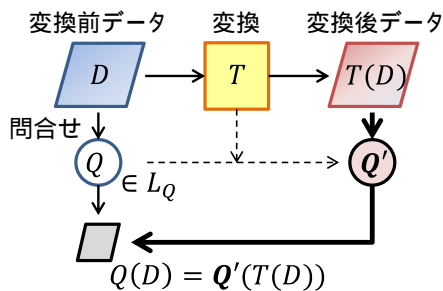
研究成果の概要(英文)：This research aims to investigate the decidability of query preservation for tree and graph transformations. In this work, we first examined the computational complexity of deciding the query preservation problem for some classes of tree transformations and queries. We also studied the query preservation of non-linear tree transformations and gave a decidable sufficient condition of determinacy, a property closely related to query preservation. We provided some notions of query preservation for non-deterministic tree transformations, and we offered some decidability results on the properties for non-deterministic ones.

研究分野：情報学基礎

キーワード：問合せ保存性 木変換器 木オートマトン

### 1. 研究開始当初の背景

データ変換における情報保存の概念として問合せ保存が知られている。問合せ保存とは、変換前データに対する問合せの結果が、同等なクラスの問合せによって変換後データから引き出せることをいう。形式的には、"変換  $T$  が問合せ  $Q$  を保存する"とは次のように定義される(下図):  $Q$  と同じ問合せクラス  $L_Q$  に属する問合せ  $Q'$  が存在して、任意の変換前データ  $D$  に対して、 $D$  に対する  $Q$  の結果が  $D$  を  $T$  で変換した結果  $T(D)$  に対する  $Q'$  の結果と一致する。



$$T \text{ が } Q \text{ を保存} \Leftrightarrow \exists Q' \in L_Q, Q = Q' \circ T$$

変換後データから変換前データを"完全に"復元できることを求める可逆性といった性質と比べて、問合せ保存は、状況に応じて適切に問合せの集合を指定することで、必要な情報だけを保存することを要求する柔軟な制約となりうる。それゆえ、問合せ保存の検証はデータ変換の情報保存性に関する重要な問題の1つである。しかしながら、可逆性と同様に、変換  $T$  が問合せ  $Q$  を保存するかどうかの判定問題は一般には決定不能である。そのため、どのようなデータ(関係DBやXML等)を対象にどのような変換・問合せを許すときに、問合せ保存が決定可能になるか及び変換後データに対する問合せ  $Q'$  が構成可能になるかについての考察が行われている。

研究代表者らはこれまでに、XML文書のような木構造データを対象とし、木変換器と木オートマトンで表現される変換・問合せクラスにおいて、問合せ保存が決定可能であることと変換後の木に対する等価な問合せの構成法を示した。その後、Benediktらによって、問合せクラスを拡張しても問合せ保存が決定可能であることが証明された。しかしながら、決定可能性が示している木構造変換のクラスは基礎的なクラスであり、問合せ保存が決定不能と知られている変換クラスとは変換能力においてギャップがある。そのため、そのギャップの間にある、より現実的な能力をもつ変換クラスのもとで、問合せ保存が自動検証可能であるかどうかを明らかにする必要がある。

グラフ構造データにおいては、Regular path queryなどの、頂点を抽出するタイプの問合せ

セクラスを対象に、問合せ間の関係として定義された、問合せ保存と同等の性質の解析について研究が行われている。一方で、ノードの抽出ではなく新たなグラフに変換するというタイプの言語としてUnCALなどの変換言語が知られているが、研究代表者が知る限り、抽出や整形が行える強力なグラフ変換のクラスを対象とした問合せ保存の自動検証可能性についてはまだ検討されていない。

### 2. 研究の目的

(1) 木構造データに対する問合せには大きく分けて2種類存在する。木構造データから木構造データを求めるもの(以降、木問合せ)と、木構造データから頂点の組集合を抽出するもの(以降、頂点問合せ)である。XML文書においては、前者はXSLTなどの変換言語が該当し、後者はXPathなどの言語が相当する。本研究課題では、2種類の問合せタイプ各々について以下の2つを行う。

背景で述べた通り、問合せ保存が決定可能あるいは決定不能と分かっている変換クラスの間には大きなギャップが存在する。本研究課題では、XSLTの部分クラスだがXMLデータの木構造変換を表現するのに現実的に十分な能力をもつと言われるクラス、たとえば第二階述語論理(MSO)で定義可能な木変換クラスやマクロ木変換器、それらの部分クラスに対して、問合せ保存の決定可能性を明らかにする。

問合せ保存の判定だけでなく、問合せ保存を満たすときに木変換および変換前データに対する問合せから変換後データに対する等価な問合せを構成するアルゴリズムを提案し、計算量評価も行う。

(2) 木からグラフに拡張して、問合せ保存の自動検証の可能性について考察を行う。

変換・問合せクラスの基本的な性質および判定問題の調査: まず、問合せ保存の検証に関わると思われるものを中心に、変換や問合せに対する基本性質(合成に関する閉包性など)や基本的な判定問題(単射性や関数性など)の決定可能性(および決定可能な場合は計算量の上下界)の調査・究明を行う。一般に、変換等に関連する静的解析問題を、何の制約もなしにグラフに拡張すると決定不能になることが多い。そのため、決定可能となるために十分であり得るだけ現実的な制約を検討する。対象とするグラフ変換モデルとしてはUnCALを、問合せモデルにはUnQL、SPARQLグラフパターンやregular path queryなど複数のモデルを想定する。

木構造データを対象とする場合と同様に、問合せ保存が決定可能である変換と問

合せのなるべく広いクラスを見つけることを目的とする。加えて、変換後データに対する等価な問合せの構成法の提案および計算量の上下界の究明を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 問合せ保存性の計算量解析

変換が決定性線形トップダウン木変換器、問合せが木オートマトンの実行に基づく頂点問合せのクラスである場合と、変換・問合せが拡張線形ボトムアップ木変換器と通常のボトムアップ木変換器のクラスでそれぞれ表現される場合のそれぞれについて、問合せ保存性を判定するアルゴリズムの計算量解析を行った。また、後者のクラスでの我々の問合せ保存判定法の計算量を改善するため、そのアルゴリズム中で行われている拡張ボトムアップ木変換器(XBOT)の関数性判定法の改良について検討した。

#### (2) 非線形な木変換における確定性の十分条件の検討

問合せ保存と同様の性質として、確定性(Determinacy)が存在する。問合せ保存との違いは、変換後の問合せのクラスについての制約がない点である。非線形な木変換における問合せ保存の決定可能性について検討を始めるために、まず非線形な木変換における確定性の決定可能な十分条件について検討を行った。

#### (3) 非決定性木変換における問合せ保存性

これまでに知られている問合せ保存性は変換および問合せが決定性関数であることを前提としていたが、変換が非決定性変換であることも許すように問合せ保存性の定義を拡張した。そして、新たに定義した性質の決定可能性について検討を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 問合せ保存性の計算量解析

(雑誌論文) 変換が決定性線形トップダウン木変換器、問合せが木オートマトンの実行に基づく頂点問合せのクラスである場合について、問合せ保存性の判定問題が2-EXPTIMEに属すること、EXPTIME困難であることを示した。また、問合せ結果が固定の自然数  $n$  について頂点の  $n$ -組の集合である場合、問合せ保存性の判定問題がEXPTIME完全であることを示した。また、変換後の問合せの構成は決定性多項式時間で可能であることも示している。

(雑誌論文) 変換・問合せが拡張線形ボトムアップ木変換器と通常のボトムアップ木変換器のクラスでそれぞれ表現される場合において、問合せ保存性が非決定性指数関数時間で決定可能であることを示した。その証明の中で、拡張ボトムアップ木変換器(XBOT)というクラスの関数性判定問題が非決定性多項式時間で決定可能であるこ

とを示している。その後、XBOTの関数性判定については、その線形なサブクラスにおいて決定性多項式時間で判定可能であることを示し(学会発表) また一般のXBOTのクラスに対して多項式時間可解を保ったまま判定アルゴリズムを拡張できる見通しを得た。さらに広いマルチボトムアップ木変換器のクラスにおける関数性の決定可能性についての調査も行った(学会発表)。一般のマルチボトムアップ木変換器においても関数性が決定可能であるという予想はしていたが、その証明は与えられておらずその時間計算量についても不明であった。Engelfrietの木代入に関する性質を木の組の代入に関するものに拡張することで、マルチボトムアップ木変換器の線形な部分クラスにおける関数性の決定可能性を示した。一般のマルチボトムアップ木変換器における決定可能性の調査は今後の課題だが、同様のアプローチで証明可能であると予想している。

#### (2) 非線形な変換における確定性の十分条件(学会発表)

決定性拡張トップダウン木変換器で表現される変換および先読み付き決定性トップダウン木変換器で表現される問合せに対して確定性が決定可能となるための十分条件を提案した。さらに、複製が各変換経路で高々1回しか行われれないという制限を与えたクラスに変換が属している場合に、この十分条件が決定可能であることを合わせて示した。

#### (3) 非決定性変換の問合せ保存の決定可能性(雑誌論文, 学会発表)

問合せ保存性の定義を、変換が非決定性変換であることも許すように拡張した。具体的には、非決定性変換における問合せ性として全称保存性と存在保存性という2つの定義を与えた。全称保存性とは、入力木に対する問合せの結果を、同じ入力木に対して変換によって得られる任意の出力木から、同等の問合せ能力によって一意に得ることが可能であることを意味する。それに対して、存在保存性とは、変換によって得られる出力木のうち最低1本からは、入力木に対する問合せ結果を復元できることを意味する。これらの性質の決定可能性について調査を行った。まず、変換が先読み付き拡張線形トップダウン木変換器の合成で与えられ、問合せが決定性単項2階木変換器(DMSOT)で与えられる場合に、問合せ全称保存性が決定可能であることを証明した。また、問合せ存在保存性については十分条件を与え、その十分条件が決定可能であるような変換と問合せのクラスを示した。さらに、問合せが非決定性関数である場合も考慮した問合せ保存の定義とその決定可能性についても検討を行った。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Kazuki Miyahara, Kenji Hashimoto, Hiroyuki Seki, "Query rewriting for nondeterministic tree transducers," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E99-D, No.6, pp.1410-1419, 2016, 査読有.

Kenji Hashimoto, Ryuta Sawada, Yasunori Ishihara, Hiroyuki Seki and Toru Fujiwara, "Determinacy and Subsumption of Single-valued Bottom-up Tree Transducers," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E99-D, No.3, pp.575-587, 2016, 査読有.

Kazuki Miyahara, Kenji Hashimoto, and Hiroyuki Seki, "Node Query Preservation for Deterministic Linear Top-Down Tree Transducers," IEICE Transactions on Information and Systems, Vol.E98-D, No.3, pp.512-523, 2015, 査読有.

[学会発表](計5件)

田端 浩明, 橋本 健二, "線形マルチボトムアップ木変換器の関数性の決定可能性," 第118回情報処理学会・プログラミング研究会, 2018.

石原 鷹, 橋本 健二, 関 浩之, "非線形トップダウン木変換器において問合せ保存が決定可能であるための十分条件," 電子情報通信学会技術報告 SS2016-78, Vol.116, No.512, pp.109-114, 2017.

Kenji Hashimoto, "Determinacy and Query Preservation of Tree Transducers," The 4<sup>th</sup> International Workshop on Trends in Tree Automata and Tree Transducers (TTATT 2016), 2016, 招待講演.

宮原 一喜, 橋本 健二, 関 浩之, "非決定性木変換器における問合せ保存," 第18回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ, ポスター発表, 2016.

石原 鷹, 橋本 健二, 関 浩之, 酒井 正彦, "拡張線形ボトムアップ木変換器の関数性の多項式時間判定," 第104回情報処理学会・プログラミング研究会, 2015.

(2)研究分担者  
該当なし

(3)連携研究者  
該当なし

(4)研究協力者  
該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

橋本 健二 (HASHIMOTO Kenji)  
名古屋大学・情報学研究科・助教  
研究者番号: 90548447