

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330096

研究課題名(和文) 相互運用可能な双方向グラフ変換に関する研究

研究課題名(英文) A Study on interoperable bidirectional graph transformations

研究代表者

日高 宗一郎 (HIDAKA, Soichiro)

法政大学・情報科学部・教授

研究者番号：70321578

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)：データの相互変換は情報システムにおける重要な操作であるが、双方向変換は、その変換をこえて双方向に更新を伝播させることができる。本研究は、双方向変換の(1)他の枠組への組み込み、(2)他のシステムと対等で相補的な統合、(3)双方向変換システム自身への他のシステムの組み込みに必要な相互運用性という三つの相互運用性を通して、扱うグラフの表現力の向上、変換の性能や能力の向上等を目指し、単方向変換の部分翻訳に基づく部分双方向化の枠組、枝間の順序の導入による記述能力の向上、双方向変換のモジュール性につながる変換の加法性の提案などの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：Data transformation plays an important role in various information systems. Bidirectional transformations are a mechanism to propagate updates bidirectionally over such transformation. This project aims at enhancing interoperability of bidirectional transformations by (1) embedding in other systems, (2) complementary integration with other systems and (3) embedding other systems into bidirectional transformation systems themselves, to achieve expressive power of graph data model, performance and expressive power of transformations. We have proposed partial bidirectionalization framework through partial translation, bidirectionalization of ordered graphs, additivity of transformation for modularity of transformations, among other things.

研究分野：プログラミング言語, プログラム変換, 双方向変換, グラフ変換

キーワード：双方向変換 グラフ変換 相互運用性 加法性 モジュール性

1. 研究開始当初の背景

情報処理における問い合わせ処理などは、変換元(データベース)から変換先(ビュー)への変換と捉えられる。こうした変換は必要部分の抽出や整形を伴うため、データの更新は変換先で行う方が容易であるが、更新を変換元へ伝播させる方法は自明ではない。双方向変換は、この伝播を担う重要な技術であり、データベースの他分散データ、文書間の相互同期の文脈などでも研究されているが、本研究ではグラフの双方向変換を対象とする。グラフは、従来の双方向変換の研究で対象とされてきた表や文字列、木等を更に一般化したものであり、様々な実体の間の関連を直接表現できるなど汎用性が高い反面、合流や循環を含むため扱いが困難である。研究代表者等は、関数プログラミングのアプローチに基づき、その利点(副作用がなく合成に基づくシンプルなセマンティクスを持つこと)を生かして、既存のグラフ問い合わせ言語 UnQL(引用文献[1])に双方向の意味を付与することでグラフ変換の双方向化に成功した。しかし、この研究の流れの中で、変換処理速度、双方向変換として満たすべき性質、記述能力、受容する更新の種類について、強化の余地があり、更に順変換に対してプログラム解析手法を適用することで、逆変換の更新の影響範囲が見積もれる等、有用な情報の抽出が見込まれることが明らかになってきた。ユーザインターフェースに関しても、その向上は事例検証の効率化をもたらし、研究そのものを加速する相乗的な効果をもたらすことが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、申請者等が提案してきたグラフ双方向変換の枠組の理論、実装面に関して上記の強化を行い、応用範囲を拡大するために、(1) 関数型双方向変換言語の言語仕様、意味、双方向記述能力、(2) 双方向変換プログラムの静的、実行時解析、(3) 言語処理系の実装、最適化(性能、利便性の向上)、評価の三つの課題に取り組み、グラフ双方向変換に適した言語のあるべき姿、その言語でどのような解析と最適化等のための情報が抽出可能か、また実装でどのような性能、利便性の向上が得られるかを明らかにする。

関数プログラミングは、変換全体が一つの式で表現され、部分式間の関係も明瞭で、プログラム変換に基づく融合変換等の最適化が容易である等、形式的な扱いに適した優れた枠組である。引用文献[2][3]の研究は、こうした関数プログラミングによる言語的アプローチとしては世界初である。既存の方式と比して、双方向変換に適した性質を保った大きな双方向変換の合成に適しているという特色がある。

ソフトウェア工学への応用も期待され、特にモデル駆動ソフトウェア開発は本研究の最も期待される新しい応用のひとつである。設計から実際に動作する命令列への具体化の過程では様々な中間生成物が生じるが、最終生成物がそのまま製品化されることは稀であり、テスト中に見つかるバグ等の修正が設計の上流過程にうまく反映できることが切望されている。グラフは中間生成物(=モデル)の表現に適しており、このような逆方向への更新の伝搬を担う技術の基盤となる。本研究はこのようなソフトウェア開発工程の高度化にも寄与し、社会基盤を担うソフトウェアの開発を支える重要な役割が期待される。

3. 研究の方法

本研究は以下の三つの柱を中心に進める。

(1) 言語仕様、意味、双方向記述能力

双方向計算に於いて、その記述言語の仕様により、順変換および逆変換の能力が決定される。申請者はこれまでグラフデータベース問い合わせ言語 UnQL(引用文献[1])およびそのグラフ代数の双方向化に基づく双方向計算の研究で成果を挙げているが、本研究ではその記述能力やデータモデル等の設計レベルでの強化を図る。

(2) 静的、実行時解析

一般のプログラミング言語同様、双方向計算用言語にも様々な静的動的解析の機会がある。これ等の解析で可能となる最適化やその他のユーザにもたらされる付加価値(影響範囲解析、変換先の更新可能性の明確化等)を明らかにする。

(3) 実装、最適化(性能、利便性の向上)、評価

大規模な集合データ用のストレージのライブラリを利用する等の実装の強化の他、トレース情報の削減、順変換の融合変換による最適化、漸進的な変更伝搬の導入(incrementalization)等の最適化に取り組む。

4. 研究成果

(1) 言語仕様、意味、双方向記述能力

あらゆる応用、変換、機構との相互運用の可能な双方向変換に向けたグラフや変換の記述能力の向上、特に順序の導入や順序つき/なしの枝の混在の扱いについて、順序の有無に共通して必要となる機構を明確化した。具体的には、ベースとしているグラフ変換言語についてソース・ターゲットグラフ、その間の変換プログラム中の言語要素間を結びつけるトレース情報の、ノードと枝、変換連鎖に対応した設計とそれを用いた追跡方式、逆変換におけるビュー上の編集操作の伝搬、ビュー更新による制御フロー(条件分岐)変更の検出、ビュー上で同じソース枝に由来する枝の解析方法を設計した。このことにより、双方向変換であることの条件である双方向

性（振る舞いの良さ）の達成条件をより明確にした。この成果は一般に困難とされている逆変換の振舞いの予測も容易にする[7]。

更に、順序を導入して枝の入れ替えなどの記述能力を付加した構造再帰について、枝毎の変換からノード単位の変換に視点を移すことにより構造再帰内でのモジュール構造を明確にした。また、逆方向解釈において、順序なしグラフの双方向変換における追跡情報に関する成果を融合させた定式化を行い、先行研究との対応付けを強化した[5]。

その他の記述能力向上については、これまで特にSQL風構文糖レベルで不可能だった変換内での新たな循環の生成の手法を考案し、静的に循環中の経路の長さの種類が固定されるといった限界を明確にした（ホームページ等[2]）。

(2) 言語同士の対等な相互運用

言語同士の対等な相互運用として単方向モデル変換言語ATLから双方向グラフ変換言語への部分翻訳の基本部分を設計し、プロトタイプを実装し、部分双方向化全体の健全性の証明体系の構築、部分双方向化が可能となる条件の明確化を達成した。翻訳対象部分とそれ以外の切り分けは、ソース言語レベルでの射影のフェーズを独立させることにより明確化している。この成果は他の言語同士の組み合わせにも用いることができる汎用性の高いものである。また、属性つきグラフと枝ラベルつきグラフ間の相互変換、翻訳におけるメタモデル（型情報）の組み込みを行なった。ATLの循環生成機能の翻訳の道筋も示した。性質の異なる双方向変換を相互運用する際の注意点、具体的には、性質の強い双方向変換と弱い双方向変換を合成して弱い双方向変換を構成するには、接続部分により強い制約が求められることも示した（ホームページ等[2]）。

また、部分翻訳に基づく部分双方向化のための翻訳機構を系統的に構築する手法を提案した。具体的には、翻訳元と翻訳先の言語が加法性（変換の構文の異なる階層における言語要素の列を短縮することにより変換結果が厳密に小さくなるという性質）を持つ場合、トランスレータ自身もそのような言語構造にしたがって自然に漸進的に構築できることを示した（学会発表[4]）。

(3) 静的、実行時解析

双方向変換の相互運用に際し、効率的な相互運用には軽量な変更伝搬のための分析が不可欠である。共同研究においてグラフ双方向変換言語の意味に従い追跡情報の半静的解析を行うことにより、更新伝搬を逆方向解釈なしに行うことで逆方向変換

を軽量化する手法を提案し、その適用条件と健全性を示した[2]。前述の解析は、変換が検査しない領域を特定することにより、その領域内の挿入、削除を含む任意の更新が可能であることも示すものである。

また、共同研究を通して、トレース情報をより広範な編集操作の軽量な伝搬に適用するために必要なトレース情報の一般化も行った。トレース情報による相互運用性の向上についても、これまで十分に追跡できていなかった言語要素（ラベルを束縛する変数）をGUI上で強調表示できるようになり、ラウンドトリップ性に背く可能性をより分かりやすくユーザに提示できるようになった（ホームページ等[1]）。

相互運用に必要なインタフェースの設計に関して、相互運用に必要なモジュラリティの基本となる、モデル変換のモジュラリティの分析の指標として加法性の概念を形式化し、二つの異なるモデル・グラフ変換言語から、文脈とモノイド、単調性を用いて加法性を系統的に抽出する方法を提案した[1]。加法性はデータベース分野で研究されているquery containmentの概念に関係するが、ここでは変換の間の包含関係を構文的に導出するものであり、再計算不要な部分変換の特定に役立ち、本研究課題のサブテーマの一つである、高速化のための漸進処理にも寄与する。

共同研究において、編集操作を双方向変換で定義する手法をコードクローン間の選択的変更伝搬に応用する手法を提案した（学会発表[1][2]）。具体的には、複製元を中心とした恒等双方向変換のco-targetial合成で複製間を関係づけた上、他のクローンに伝搬させたい変更は双方向変換により伝搬させ、そうでない場合は変更を表現する双方向変換を挿入する。

<引用文献>

- [1]. P. Buneman, M. F. Fernandez, and D. Suciu. UnQL: a query language and algebra for semistructured data based on structural recursion. VLDB Journal: Very Large Data Bases, 9(1):76-110, 2000.
- [2]. Bidirectionalizing graph transformations, Soichiro Hidaka, Zhenjiang Hu, Kazuhiro Inaba, Hiroyuki Kato, Kazutaka Matsuda, Keisuke Nakano, in Proceedings of the 15th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming. ACM Press, 2010, pp. 205-216.
- [3]. A Compositional Approach to Bidirectional Model Transformation, Soichiro Hidaka, Zhenjiang Hu, Hiroyuki Kato, Keisuke Nakano, New Ideas and Emerging Results Track of 31st International Conference on Software Engineering (ICSE 2009, NIER Track), Vancouver, Canada, May 16-24, 2009. pp. 235-238.

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 14 件)

- [1]. On Additivity in Transformation Languages, Soichiro Hidaka, Frédéric Jouault, Massimo Tisi, 2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS 2017) 査読有 23-33 2017年9月
<http://dx.doi.org/10.1109/MODELS.2017.21>
- [2]. Guaranteeing Free-edits to Bidirectional Graph Transformations, Ezgi Çiçek and Soichiro Hidaka, GRACE Technical Reports (GRACE-TR-2016-04) 1-15 2016年9月
<http://grace-center.jp/wp-content/uploads/2016/09/GRACE-TR-2016-04.pdf>
- [3]. 『モデル駆動工学の原理と応用』(3) モデル分類からみるモデル駆動工学の応用, 日高宗一郎, Jean Bézuvin, 胡振江, Frédéric Jouault, コンピュータソフトウェア 査読有 33(2) 56-77 2016年5月
http://dx.doi.org/10.11309/jssst.33.2_56
- [4]. Graph Generation via Reverse Iterative Query Processing, Makoto ONIZUKA, Hiroyuki KATO, Soichiro HIDAHA, Keisuke NAKANO, Zhenjiang HU, GRACE Technical Reports (GRACE-TR-2016-02) 1-11 2016年3月
<http://grace-center.jp/wp-content/uploads/2016/03/GRACE-TR-2016-02.pdf>
- [5]. Bidirectional Transformation on Ordered Graphs, Fei Yang and Soichiro Hidaka, GRACE TECHNICAL REPORTS 2015(8) 1-41 2015年12月
<http://grace-center.jp/wp-content/uploads/2015/12/GRACE-TR-2015-08.pdf>
- [6]. Towards Bidirectional Higher-Order Transformation for Model-Driven Co-evolution: Bernhard Hoisl, Zhenjiang Hu and Soichiro Hidaka, Communications in Computer and Information Science 査読有 506 153-167 2015年12月
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-25156-1_10
- [7]. Trace-based Approach to Editability and Correspondence Analysis for Bidirectional Graph Transformations, Soichiro Hidaka, Martin Billes, Quang Minh Tran and Kazutaka Matsuda, Fourth International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2015) (co-located with STAF'15), CEUR

Workshop Proceedings 査読有 1396 51-65 2015年7月

<http://ceur-ws.org/Vol-1396/p51-hidaka.pdf>

- [8]. 『モデル駆動工学の原理と応用』(2) メタモデリングとモデル変換, 日高宗一郎 Jean Bézuvin, 胡振江, Frédéric Jouault, コンピュータソフトウェア 査読有 32(2) 63-78 2015年5月
http://dx.doi.org/10.11309/jssst.32.2_63
- [9]. Parallelizing Graph Structural Recursion with BSP, Chong Li, Le-Duc Tung, Nhat-Tan Duong, Soichiro Hidaka and Zhenjiang Hu, GRACE Technical Reports (GRACE-TR-2015-02) 2015年2月
<http://grace-center.jp/wp-content/uploads/2015/02/GRACE-TR-2015-02.pdf>
- [10]. Feature-Based Classification of Bidirectional Transformation Approaches, Soichiro Hidaka, Massimo Tisi, Jordi Cabot, Zhenjiang Hu, Software and Systems Modeling 査読有 15(3) 907-928 2015年1月
<http://dx.doi.org/10.1007/s10270-014-0450-0>
- [11]. 高談闊論: 双方向変換の原理と実践 (解説論文), 加藤弘之 胡振江 日高宗一郎 松田一孝, 日本ソフトウェア科学会論文誌コンピュータソフトウェア 査読有 31(2) 44-56 2014年5月
http://dx.doi.org/10.11309/jssst.31.2_44
- [12]. On the use of Bidirectional Transformations for Translational Semantics, Florent Latombe and Soichiro Hidaka, GRACE TECHNICAL REPORTS 2014(1) 1-16 2014年4月
<http://grace-center.jp/wp-content/uploads/2014/04/GRACE-TR-2014-01.pdf>

[学会発表] (計 9 件)

- [1]. 相原崇弘, 日高宗一郎, 抽象構文木の双方向変換によるコードクローン管理に向けて, 情報処理学会 第80回全国大会, 2018年
- [2]. 相原崇弘, 日高宗一郎, 双方向変換言語を用いたコードクローン管理に向けて (ポスター), 第59回プログラミング・シンポジウム, 2018年
- [3]. Soichiro Hidaka, Towards reduction of source access in incremental updates of relational views, First Workshop on Software Foundations for Data Interoperability (国際学会), 2018年
- [4]. 日高宗一郎, Massimo Tisi, On the Construction of Translation in Partial Bidirectionalization, 情報処理学会 第116回プログラミング研究発表会, 2017年

- [5]. Bidirectionalizing Model Transformation Languages through Partial Translation, 日高 宗一郎, Massimo Tisi, 日本ソフトウェア科学会第 33 回大会 2016 年 9 月 9 日
- [6]. Towards Trace-based Approach to Increasing the Comprehensibility and Predictability of Bidirectional Graph Transformations, 日高 宗一郎, 2014 年 10 月 11 日 4th Asian Workshop of Advanced Software Engineering
Joint work with Martin Billes and Quang Minh Tran
- [7]. グラフ双方向変換のトレースに基づく分かり易さと予測可能性の向上にむけて, 日高宗一郎, マーティンビレス, クアンミントラン, 日本ソフトウェア科学会 第 31 回大会 2014 年 9 月 9 日
- [8]. Structural Recursion for Querying Ordered Graphs(順序つきグラフ問合せのための構造再帰)(特別講演) [招待有り], 日高 宗一郎, 第 31 回日本ソフトウェア科学会大会 2014 年 9 月 8 日
ICFP' 13 共著論文の紹介:
<http://dx.doi.org/10.1145/2544174.2500608>
- [9]. Optimization for iterative queries on MapReduce, Makoto Onizuka, Hiroyuki Kato, Soichiro Hidaka, Keisuke Nakano, Zhenjiang Hu, 40th International Conference on Very Large Data Base (VLDB 2014) 2014 年 9 月

[その他]

ホームページ等

- [1]. Editability/Correspondence Analysis for Graph BX
<http://www.prg.nii.ac.jp/projects/gt-contrib/cmpbx/>
Full title: Trace-based Approach to Editability and Correspondence Analysis for Bidirectional Graph Transformations
- [2]. <https://github.com/atlanmod/ATLGT>
Bidirectional version of ATL on top of the GRoundTram transformation engine

6. 研究組織

(1) 研究代表者

日高 宗一郎 (HIDAKA, Soichiro)

法政大学・情報科学部・教授

研究者番号：70321578