

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25240009

研究課題名(和文)大規模な実用に耐えうる双方向グラフ変換の統合的基盤技術の構築

研究課題名(英文)Integrated and Fundamental for Large-Scale and Practical Bidirectional Graph Transformation

研究代表者

胡 振江 (Hu, Zhenjiang)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号：50292769

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、大規模な実用に耐えうる双方向グラフ変換のための双方向変換言語の実現を目指して、まず、双方向変換の本質がPutback変換(逆反映変換)である理論を示し、それに基づいた双方向変換の振る舞いを完全に記述しRoundtrip性質を保証できるBiGULの実現に成功した。また、多様なグラフ構造に対応可能な有力な双方向変換を開発し、モデル駆動開発で広く用いられているモデル変換言語ATLの双方向化を行った。さらに、実証研究として、ユーザ向けのソースプログラムとシステム実現向けの抽象構文木の間の双方向変換を開発するためのBiYaccシステムなどを開発し、双方向変換の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, to realize a bidirectional transformation language that can be used to deal with large scale graphs in practice, we provided a new foundation for bidirectional transformation, showing that the essence of bidirectional transformation is "putback" transformation. Based on this foundation, we succeeded in designing and implementing a new bidirectional transformation language BiGUL, which cannot only fully describe the behavior of bidirectional transformation but also guarantee the roundtrip property. Also, we extended our previous bidirectional graph transformation mechanism so that it can deal with various graph structures, and applied to bidirectionalize model transformations in ATL, a language widely used in model driven software development. Finally, we evaluated the usefulness of our approach by developing several useful systems, including the BiYacc system for supporting development of bidirectional transformations between source programs and abstract syntax trees.

研究分野：ソフトウェア、プログラミング及びプログラミング言語

キーワード：双方向変換 双方向変換言語 グラフ変換 データ同期 ソフトウェア共進化 ソフトウェア自己適応

1. 研究開始当初の背景

双方向変換とは、ソースデータをターゲットデータに変換した後、ターゲットデータ上の更新をソースデータに反映させることが可能な計算のことである。古くはデータベース分野におけるビュー更新問題として扱われてきた。近年は、新しいプログラミングモデルと進化的ソフトウェア開発の手法として注目を浴び、プログラミング言語の観点から様々な双方向変換言語が提案されている。しかし、これまでの双方向変換言語は、単方向言語に逆変換の意味を持たせることによって一つのプログラムを順変換でも逆変換でも実行することはできるが、一般的にある順変換に対して複数の逆変換が存在するため、ユーザの意図を反映した逆変換を自由に記述できず、逆変換の予測性と信頼性が欠如していた。また、大規模な実用に堪えるように発展させるには、様々なグラフモデルや既存の言語の双方向化に対応できておらず、ターゲットの更新をソースに反映させるのに時間を要するという問題が判明した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの研究を大規模な実用に堪えるように発展させ、ユーザの意図した逆変換を宣言的に記述できる双方向グラフ変換の統合的基盤技術を構築することである。そのためには、信頼性の確保と拡張可能性及び効率化に取り組み、双方向グラフ変換に対して理論から実装、そして応用まで幅広く研究することで、応用における問題点を理論へフィードバックしながら研究を遂行する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、これまでの基盤研究 B(双方向モデル変換の言語的基盤技術に関する研究)の研究成果を踏まえ、大規模な実用に耐える双方向グラフ変換のための双方向変換言語を設計し、そこに効率的な実装を与え、様々な実用的双方向変換システムへ応用し評価を行う。特に実際に用いられているデータ間の相互運用性の実現を目指す。

具体的には、次の3つの具体的な目標を念頭に研究を進めた。目標 1: 信頼性の確保によって利用者が安心して本技術基盤を利用することを可能にする。目標 2: 拡張可能にすることで、多様なグラフ構造に対応することが可能となり、既存の言語を双方向化できるようになる。目標 3: 効率化によって大規模なグラフに対しても実用可能となる。

4. 研究成果

本研究の主要成果は次の3点である。

(1) 双方向変換を完全に記述できる高信頼双方向変換言語の実現

双方向変換は順変換と逆変換 (Putback 変換) の組であるが、順変換に対して一般に複数存在する逆変換がそれぞれどのような意味 (計算の振る舞い) を持つのかが不明確である。この課題について、我々はソースとビューの間の双方向変換の本質が Putback 変換であるということを示した。つまり、ビューによるソース更新を行う Putback 変換さえあれば、ソースからビューへの順変換が唯一のものに決まるため、Putback 変換の定義から順変換が導出可能であるということである。

上の理論に基づいて、我々は世界で初めて Putback 変換を簡潔に記述できる双方向変換言語 (BiFlux) を実現した。その上、双方向的な振る舞いを検証するために、core 言語として BiGUL を設計し効率的に実現できた。BiGUL により BiFlux を十分に定義できるだけでなく、定理証明器 Agda の検証により、BiGUL で記述される双方向変換は Roundtrip 性質が保証できる。BiGUL は完全に双方向変換の振る舞いを記述できるだけでなく、BiGUL を用いて、関係データベース上の問い合わせ言語の双方向化を行い、既存の双方向変換 Relational Lens より強力な双方向変換システムを構築できるようになった。

(2) 多様なグラフ構造に対応可能な有力な双方向変換の開発

様々な種類のグラフを扱うため、まず分岐において順序のあるグラフについて実装の強化、評価を行った。応用毎のグラフの等価性に対応すべく、同型等価性と値等価性の取扱いに対応した言語設計と実装を行った。また、既存のグラフ変換言語を本研究で開発している双方向グラフ変換言語へ翻訳することで、既存のグラフ変換言語を双方向化することが可能となり、モデル駆動開発で広く用いられているモデル変換言語 ATL の双方向化に向けて、ATL 言語仕様と我々の言語やデータモデルの差異を明確にし、相互運用性に向けたデータ形式間の相互変換の形式化を行った。

また、グラフ変換の双方向化にあたりデータモデルに拘らず用いられるトレース情報の管理はスケーラビリティ達成の鍵のひとつである。我々は、従来ノード毎に格納されていたため変換段数増加に伴い空間計算量を増やしていたトレース情報について、言語設計段階でソースターゲット間マップに移行させ、順変換が複数合成されている場合の更新の影響範囲の明確化にも繋げることができた。

(3) 双方向変換の効率化と実証研究

双方向変換言語 BiGUL の静的解析により動的な検査を削減する効率化手法を開発した。それにより、BiGUL エンジン は TGG や QVT などよりはるかに速く、場合により 100 倍以上速くなった。

また、特殊なグラフ (木構造) を対象に与えられた構造 (木パターン) を満たすような結果をある順番でソートするような問合せの最適化に取り組んだ。具体的には、全てのノードをソートして出力する問合せを用意しそこに、木パターンから抽出した条件を埋め込むことによる問合せの構成に基づく最適化に取り組み、予備実験を通じて有効性を確かめた。更に、スキーマ情報を用いることで、与えられた問合せに対して、より効率的な問合せを構成することが可能となる枠組みについて、スキーマのクラスも同定しながら研究を進めた。

実証研究として、ユーザ向けのソースプログラムとシステム実現向けの抽象構文木の間の双方向変換を開発するための BiYacc システムと、プログラム開発手法への応用システムを開発し、双方向変換の有効性を確認した。(a) BiYacc システムの開発: パーサーとプリンターはコンパイラにおける重要な二つの部品である。我々は、双方向変換の原理に基づき、両者を同時に記述できる領域特有言語 BiYacc を提案し、その記述からパーサーとプリンターを自動的に生成するシステムを開発した上、その有用性を、Tiger 言語のパーサーとプリンターの自動生成を通じて示した。(b) プログラム開発手法への応用: 双方向変換の実用的側面を考慮した双方向変換の形式化を試みた。特に、既存の双方向変換の枠組みで実現できなかった例として、定理証明支援系を利用したプログラム開発手法への応用を行い、今までの研究成果を応用し、複数の双方向変換を組み合わせた新しい手法を提案し、同時にその形式化も行った。

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 10 件)

1. Tao Zan, Hugo Pacheco, Hsiang-Shang Ko, Zhenjiang Hu, BiFlux: A Bidirectional Functional Update Language for XML, JSSST Computer Software, 査読有, Vol.12, 2017, pp.1-23, 10.11185/imt.12.1
2. Soichiro Hidaka, Massimo Tisi, Jordi Cabot, Zhenjiang Hu, Feature-Based Classification of Bidirectional Transformation Approaches, Software and Systems Modeling, 査読有, Vol.15, 2016, pp.907-928, 10.1007/s10270-014-0450-0
3. Lichao Wang, Guoqiang Li, Zhenjiang Hu, Constructing Format-Preserving Printing from Syntax-Directed Definition, Science China Information Sciences, 査読有, Vol.58, No.11, 2015, pp.1-14, 10.1007/s11432-015-5368-9
4. Sebastian Fischer, Zhenjiang Hu, Hugo Pacheco, The Essence of Bidirectional Programming, Science China Information Sciences, 査読有, Vol.58, No.5, 2015, pp.1-21, 10.1007/s11432-015-5316-8
5. Hiroyuki Kato, Soichiro Hidaka, Zhenjiang Hu, Keisuke Nakano, Yasunori Ishihara, Context-Preserving XQuery Fusion, Mathematical Structures in Computer Science, 査読有, Vol.25, 2015, pp.916-941, 10.1017/S09601295130008X
6. Bo Wang, Yingfei Xiong, Zhenjiang Hu, Haiyan Zhao, Wei Zhang, Hong Mei, Interactive Inconsistency Fixing in Feature Modeling, Journal of Computer Science and Technology (JCST), 査読有, Vol.19, No.4, 2014, pp.724-736, 10.1007/s11390-014-1462-5
7. Yu Liu, Kento Emoto, Zhenjiang Hu, A Generate-Test-Aggregate Parallel Programming Library for Systematic Parallel Programming, Parallel Computing, 査読有, Vol.40, Issue 2, 2014, pp.116-135, 10.1007/s11390-014-1462-5
8. Janis Voigtlander, Zhenjiang Hu, Kazutaka Matsuda, Meng Wang, Enhancing Semantic Bidirectionalization via Shape Bidirectionalizer Plug-ins, Journal of Functional Programming, 査読有, Vol.23, Issue 5, 2013, pp.515-551, 10.1017/80956796813000130
9. Bo Wang, Zhenjiang Hu, Qiang Sun, Haiyan Zhao, Yingfei Xiong, Wei Zhang, Hong Mei, Supporting Feature Model Refinement with Updatable View, Frontiers of Computer Science, 査読有, Vol.7, Issue 2, 2013, pp.257-271, 10.1007/s11704-013-2047-0
10. Kazutaka Matsuda, Kazuhiro Inaba, Keisuke Nakano, Polynomial-Time Inverse Computation for Accumulative Functions with Multiple Data Traversals, Higher-Order and Symbolic Computation, 査読有, Vol.25, Issue 1, 2013, pp.3-38,

[学会発表] (計 27 件)

1. Daisuke Kinoshita, Keisuke Nakano, Bidirectional Certified Programming, 6th International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2017), April 29, 2017, Uppsala (Sweden)
2. Tianqi Zhao, Tao Zan, Haiyan Zhao, Zhenjiang Hu, Zhi Jin, Integrating Goal Model into Rule-based Adaptation, 23rd Asia-Pacific Software Engineering Conference (APSEC 2016), December 9, 2016, Hamilton (New Zealand)
3. Zirun Zhu, Hsiang-Shang Ko, Pedro Martins, Joao Saraiva, Zhenjiang Hu, Parsing and Reflective Printing, Bidirectionally, 9th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering (SLE 2016), October 31, 2016, Amsterdam (The Netherlands)
4. Weize Zhao, Haiyan Zhao, Zhenjiang Hu, A Framework for Synchronization Between Feature Configurations and Use Cases Based on Bidirectional Programming, Sixth International Model-Driven Requirements Engineering Workshop (MoDRE 2016), September 12, 2016, Beijing (China)
5. Chenglong Wang, Jiajun Jiang, Jun Li, Yingfei Xiong, Xiangyu Luo, Lu Zhang, Zhenjiang Hu, Transforming Programs between APIs with Many-to-Many Mappings, 30th European Conference on Object-Oriented Programming (ECOOP 2016), July 21, 2016, Rome (Italy)
6. Xiao Cheng, Hao Zhong, Yuting Chen, Zhenjiang Hu, Jianjun Zhao, Rule-Directed Code Clone Synchronization, 24th IEEE International Conference on Program Comprehension (ICPC 2016), May 17, 2016, Austin (USA)
7. Robin Dupuis, Kevin Colson, Lionel Montrieux, Zhenjiang Hu, Sebastian Uchitel, Pierr-Yves Schobbens, Reusable Self-Adaptation through Bidirectional Programming, 11th International Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS 2016), May 16, 2016, Austin (USA)
8. Tao Zan, Li Liu, Hsiang-Shang Ko, Zhenjiang Hu, Brul: A Putback-Based Bidirectional Transformation Library for Updatable Views, 5th International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2016), April 8, 2016, Eindhoven (The Netherlands)
9. Xiao Cheng, Yuting Chen, Zhenjiang Hu, Tao Zan, Mengyu Liu, Hao Zhong, Jianjun Zhao, Supporting Selective Undo for Refactoring, 23rd IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution, and Reengineering (SANER 2016), March 16, 2016, 大阪大学 (大阪市、大阪)
10. Hsiang-Shang Ko, Tao Zan, Zhenjiang Hu, BiGUL: A Formally Verified Core Language for Putback-Based Bidirectional Programming, ACM SIGPLAN 2016 Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 2016), January 19, 2016, St. Petersburg (USA)
11. Zirun Zhu, Hsiang-Shang Ko, Pedro Martins, Joao Saraiva, Zhenjiang Hu, BiYacc: Roll Your Parser and Reflective Printer into One, 4th International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2015), July 24, 2015, L' Aquila (Italy)
12. Soichiro Hidaka, Martin Billes, Quang Minh Tran, Kazutaka Matsuda, Trace-based Approach to Editability and Correspondence Analysis for Bidirectional Graph Transformations, 4th International Workshop on Bidirectional Transformations (BX 2015), July 24, 2015, L' Aquila (Italy)
13. Sebastian Fischer, Zhenjiang Hu, Hugo Pacheco, A Clear Picture of Lens Laws, 12th International Conference on Mathematics of Program Construction (MPC 2015), June 29, 2015, Konigswinter (Germany)
14. Lionel Montrieux, Zhenjiang Hu, Towards Attribute-Based Authorization for Bidirectional Programming, 20th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies (SACMAT 2015), June 2, 2015, Vienna (Austria)
15. Jun Li, Chenglong Wang, Yingfei Xiong, Zhenjiang Hu, SWIN, Towards Type-Safe Java Program Adaptation between APIs, ACM SIGPLAN 2015 Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 2015), January 14, 2015, Mumbai (India)
16. Hugo Pacheco, Tao Zan, Zhenjiang Hu, BiFlux: A Bidirectional Functional Update Language for XML, 16th International Symposium on

- Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP 2014), September 9, 2014, Canterbury (UK)
17. Makoto Onizuka, Hiroyuki Kato, Soichiro Hidaka, Keisuke Nakano, Zhenjiang Hu, Optimization for Iterative Queries on MapReduce, 40th International Conference on Very Large Data Base (VLDB 2014), September 2, 2014, Hangzhou (China)
 18. Tao Zan, Hugo Pacheco, Zhenjiang Hu, Writing Bidirectional Model Transformations as Intentional Updates, 36th International Conference on Software Engineering (ICSE 2014), June 5, 2014, Hyderabad (India)
 19. Zhenjiang Hu, Hugo Pacheco, Sebastian Fischer, Validity Checking of Putback Transformations in Bidirectional Programming, 19th International Symposium on Formal Methods (FM 2014), May 15, 2014, Singapore (Singapore)
 20. Shizuya Hakuta, Sebastian Maneth, Keisuke Nakano, Hideya Iwasaki, XQuery Steaming by Forest Transducers, 30th IEEE International Conference on Data Engineering (ICDE 2014), April 3, 2014, Chicago (USA)
 21. Hugo Pacheco, Zhenjiang Hu, Sebastian Fischer, Monadic Combinators for “Putback” Style Bidirectional Programming, ACM SIGPLAN 2014 Workshop on Partial Evaluation and Program Manipulation (PEPM 2014), January 20, 2014, San Diego (USA)
 22. Bernhard Hoisl, Soichiro Hidaka, Zhenjiang Hu, Towards Co-Evolution in Model-driven Development via Bidirectional Higher-Order Transformation, 2nd International Conference on Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD 2014), January 7, 2014, Lisbon (Portugal)
 23. Le Duc Tung, Nguyen-Van Quyet, Zhenjiang Hu, Efficient Query Evaluation on Distributed Graphs with Hadoop Environment, 4th International Symposium on Information and Communication Technology (SolCT 2013), December 5, 2013, Da Nang (Vietnam)
 24. Nguyen-Van Quyet, Le Duc Tung, Zhenjiang Hu, Minimizing Data Transfers for Regular Reachability Queries on Distributed Graphs, 4th International Symposium on Information and Communication Technology (SolCT 2013), December 5, 2013, Da Nang (Vietnam)
 25. Soichiro Hidaka, Kazuyuki Asada, Zhenjiang Hu, Hiroyuki Kato, Keisuke Nakano, Structural Recursion for Querying Ordered Graphs, 18th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming (ICFP 2013), September 27, 2013, Boston (USA)
 26. Qi Wang, Meixian Chen, Yu Lin, Zhenjiang Hu, Towards Systematic Parallel Programming of Graph Problems via Tree Decomposition and Tree, 2nd ACM SIGPLAN Workshop on Functional High-Performance Computing (FHPC 2013), September 23, 2013, Boston (USA)
 27. Kazuyuki Asada, Soichiro Hidaka, Hiroyuki Kato, Zhenjiang Hu, Keisuke Nakano, A Parameterized Graph Transformation Calculus for Finite Graphs with Monadic Branches, 15th International Symposium on Principles and Practice of Declarative Programming (PPDP 2013), September 16, 2013, Madrid (Spain)
- [その他]
- ホームページ：
<http://www.prg.nii.ac.jp/bx/>
- ## 6. 研究組織
- (1) 研究代表者
胡 振江 (HU, Zhenjiang)
国立情報学研究所・
アーキテクチャ科学研究系・教授
研究者番号：50292769
 - (2) 研究分担者
加藤 弘之 (KATO, Hiroyuki)
国立情報学研究所・
コンテンツ科学研究系・助教
研究者番号：10321580

 - 中野 圭介 (NAKANO, Keisuke)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授
研究者番号：30505839

 - 日高 宗一郎 (HIDAKA, Soichiro)
法政大学・情報科学部・教授
研究者番号：70321578

 - 浅田 和之 (ASADA, Kazuyuki)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・
特任研究員
研究者番号：00570251

(3) 連携研究者

江本 健斗 (EMOTO, Kento)
九州工業大学・情報工学研究院・准教授
研究者番号：00587470

森畑 明昌 (MORIHATA, Akimasa)
東京大学・大学院総合文化研究科・講師
研究者番号：10582257

松田 一孝 (MATSUDA, Kazutaka)
東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：10583627

(4) 研究協力者

ZHU, Zirun
総合研究大学院大学・複合科学研究科情報
学専攻・大学院生