

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K12662

研究課題名(和文)メッセージの到達性を保証しない通信環境におけるセッション型付きプログラミング

研究課題名(英文)Session-typed programming in unreliable communication environment

研究代表者

今井 敬吾 (Imai, Keigo)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：70456630

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果は主に次の通りである：(1) 2者間の通信を扱うセッション型を扱う枠組みを、OCaml言語およびC#言語において実現した。さらに、(2) 3者以上の通信を扱うマルチパーティセッション型を実現した。(1)の成果は国際会議 FLOPS 2020、(2)の成果はトップレベル会議 ECOOP 2020 および TACAS 2022 において採択された。さらに、(2)を通信のタイムアウトの抽象的な表現と見なせるmixed choiceへと拡張し、メッセージの到達性を保証しない環境における通信プログラミングの基本的な枠組みを与えることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要な学術的意義は、セッション型の多彩な実現手法とその特徴を明らかにしたことと、その具体的な実装を与えたことである。セッション型は、既存のプログラミング言語の型とは大きなギャップが存在した。本研究により、そのままでは信頼性高く構築することが困難な並行・分散プログラムを、プログラミング言語の主要な信頼性保証技法である「型」の枠組みで、安全に効率よく開発できることが期待される。さらに、本研究が最終的に実現したmixed choiceの枠組みを発展させることで、メッセージの到達性を保証しない環境における通信プログラミング手法の確立が強く期待できる。

研究成果の概要(英文)：The main results of this research are: (1) Programming frameworks for session types for two-party communication, which has been realised in OCaml and C#. (2) Programming frameworks for multiparty session types that handle communication between three or more parties. The results are accepted at higher-tier venues including ECOOP 2020, FLOPS 2020 and TACAS 2022. Furthermore, one of the results in multiparty session types is extended to the mixed choice, which is an abstract model for timeout in an communication. By establishing mixed choice and timeout in multiparty session types, we opened the design space for session types in the unreliable communication environment.

研究分野：プログラミング言語理論

キーワード：並行システム 通信プロトコル セッション型 関数型プログラミング

1. 研究開始当初の背景

複数のソフトウェア部品の同時実行で構成される並行ソフトウェアは、部品間の通信に起因するデッドロック等の発見しづらい欠陥を含みうるため、その信頼性保証が難しい。セッション型は、プログラミング言語の型システムの一つであり、並行ソフトウェアの欠陥を静的に(実行前に)排除するための理論的枠組みである。セッション型は、並行ソフトウェアの通信プロトコルを表現する。これにより、並列(同時)実行や通信プロトコルに由来する欠陥を静的に(実行前に)排除できる。

研究開始当初、メッセージの到達性が保証されない通信環境におけるセッション型の枠組みは提案されていなかった。

2. 研究の目的

本研究課題は、メッセージの到達性が保証されない環境におけるセッション型を活用したプログラミング手法を確立するために始まった。具体的な研究目標として次の2点を念頭に置いていた：

目標 (1) メッセージの到達性が保証されない枠組みのためのセッション型理論の拡張

目標 (2) セッション型と既存のプログラミング言語の統合

3. 研究の方法

まず、研究期間全体を通して 目標 (1) のメッセージの到達性が保証されない枠組みにおけるセッション型の理論を検討した。

これと並行して、より具体的・実践的な立場からのアプローチとして、目標 (2) を目指し、まずは次のサブ目標の達成を目指した：

サブ目標 (2a) 2者間の通信を扱う「バイナリーセッション型」の既存のプログラミング言語との統合

これは、当初から研究代表者がプログラミング言語 Haskell における実装を達成していたが、その実現はアドホックであったため、より汎用的な、他のプログラミング言語へも適用可能な手法が必要と考えられたためである。

ここで OCaml や C# において一定の成果が得られたことから、次に以下を検討した。

サブ目標 (2b) 3者以上の通信を扱う「マルチパーティセッション型」の統合

具体的な研究方法は、文献調査とプログラミングによる実験、および定理の構築と証明などである。

4. 研究成果

本研究の研究成果は次の通りである：

- (1) 2者間の通信を扱うバイナリーセッション型の実現手法の確立
- (2) 3者以上の通信を扱うマルチパーティセッション型の実現手法の確立
- (3) それらの研究から派生した成果

(それぞれの発表文献を[]で示す)。

研究成果(1) について次に述べる。まず、それまでのバイナリーセッション型の実現における煩雑さを解消する「**極性付きセッション型**」を提案した [COORDINATION 2017, Sci. Comp. Prog.]。これは名古屋大学の結縁祥治教授と英国インペリアルカレッジロンドンの吉田展子教授との協働による成果である。

さらに、より広く使われているプログラミング言語 C# におけるセッション型実装 **Session C#** を提案した [PLACES 2020]。これは、研究室の(元)学生の木村駿介氏との協働による。

これらはプログラミング言語(OCaml や C#)に元々備わっている型システムを活用して、通信プロトコルの適合性の検査を行う手法であり、やや型表現が込み入ってしまうきらいがあった。これを解消するため、プログラムを生成する「**メタプログラミング**」の手法を用いた別種の検査手法を開発し、関数型および論理型プログラミング言語の主要国際会議 [FLOPS 2020] に採択された。これは東北大学 Oleg Kiselyov 氏との協働による。

これとは別に、セッション型を用いて構築された通信プログラムに対するリファクタリング手法として、双方向プログラミングの手法を応用する手法について模索した [SFDI 2019]。これは国立情報学研究所(当時)の Liye Guo 氏, Hsiang-Shang Ko 博士, Zhenjiang Hu 教授, および上述の吉田教授との協働による。

研究成果(2)のマルチパーティセッション型の検査機構は、通信の参加者が3者以上に渡るため、一般的なプログラミング言語の型検査機構と著しく異なる。このため、プログラミング環境が外部ツールに依存した枠組みが必要である問題があった。このことを解消するため、OCaml 言語の構造多相を活用して、通常の型検査の枠組みの内部でマルチパーティセッション型の検査機構を確立した。その成果を記した論文は、トップレベル国際会議 [ECOOP 2020] に採択された。その着想は、セッション型の**サブタイプ関係とプロトコル全体の整式性 (well-formedness) の関係性**を見出したことにある。これは英国 Brunel University London の Rumyana Neykova 講師および上述の吉田教授、結縁教授との協働による。

研究成果(3)では、OCaml において線形型に基づいたプログラミング手法を確立した [JIP]。セッション型においては、通信路を重複して使用しないことを静的に保証するための性質である線形性を実現する必要がなる。本研究の(1)においてはインデックス付きモナドの技法を用いて線形性を OCaml において実現したが、これを拡張して、OCaml において線形型を扱う一般的な枠組みを確立した。本研究は名古屋大学の Jacques Garrigue 教授との協働による。

この他に、延長して実施した最終年度における研究が、同年度に開始した基盤(C)における研究課題における主要な成果につながった。これは、マルチパーティセッション型において従来みられた通信プロトコル設計とその安全性の検証が必要な「**トップダウン型**」の開発手法ではなく、それらが不要な「**ボトムアップ**」の手法を確立するものである。その実装である **kmclib** を実装に関する論文は、トップレベル会議 [TACAS 2022] に採択された。この方法は、関数型プログラミング言語の型推論機構とプリプロセッサ、および共同研究者の Julien Lange 氏が開発したモデル検査器 **k-MC checker** を組み合わせたものである。この研究は 英国ロンドン大学 Royal Holloway の Julien Lange 講師と Brunel University London の Rumyana Neykova 講師との協働による。

さらに、研究成果(2)を拡張することで、利用して、マルチパーティセッション型における**混合選択(mixed choice)**の実現の目途を立てることができた。これは、ある通信ステップにおけるアクションの選択肢が、送信と受信の双方を含みうるよう修正するものである。これにより、受信の**タイムアウト**時に送信を行うといった、メッセージの到達性が保証されない環境における実用的な通信ソフトウェアの振舞いをコンパイラによって検証できる。

以上の研究成果により、目標(2)については達成できたと判断する。一方、目標(1)については、研究成果(3)の混合選択により単純で見通しのよい理論・実装の目途が立ち、部分的に達成できたと考える。その安全性の証明については今後のプロジェクトで引き続き進めていく。

(以上)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Keigo Imai, Romyana Neykova, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen	4. 巻 166
2. 論文標題 Multiparty Session Programming with Global Protocol Combinators	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ECOOP 2020: 34th European Conference on Object-Oriented Programming, In: Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 9:1-9:30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ECOOP.2020.9	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 該当する
1. 著者名 Oleg Kiselyov, Keigo Imai	4. 巻 12073
2. 論文標題 Session Types Without Sophistry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 FLOPS 2020: 15th International Symposium on Functional and Logic Programming, In: Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 66-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-59025-3_5	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 Shunsuke Kimura, Keigo Imai	4. 巻 314
2. 論文標題 Fluent Session Programming in C#	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLACES 2020: Proceedings of the 12th International Workshop on Programming Language Approaches to Concurrency and Communication-cEntric Software, Dublin, Ireland. In: EPTCS	6. 最初と最後の頁 61-75
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4204/EPTCS.314.6	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 Keigo Imai, Jacques Garrigue	4. 巻 27
2. 論文標題 Lightweight Linearly-typed Programming with Lenses and Monads	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 431 ~ 444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsj.jip.27.431	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 Keigo Imai, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen	4. 巻 172
2. 論文標題 Session-ocaml: A session-based library with polarities and lenses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 135 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2018.08.005	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 該当する

1. 著者名 Liye Guo, Hsiang-Shang Ko, Keigo Imai, Nobuko Yoshida, Zhenjiang Hu	4. 巻 -
2. 論文標題 Towards Bidirectional Synchronization Between Communicating Processes and Session Types	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SFDI2019: Second Workshop on Software Foundations for Data Interoperability (In proceedings of 2019 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BigComp))	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/BIGCOMP.2019.8679265	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 該当する

1. 著者名 Keigo Imai, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen	4. 巻 10319
2. 論文標題 Session-ocaml: A Session-Based Library with Polarities and Lenses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 COORDINATION 2017: Coordination Models and Languages, In: Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 99-118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-59746-1_6	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 該当する

1. 著者名 Keigo Imai, Julien Lange, Romyana Neykova	4. 巻 13243
2. 論文標題 KmcLib: Automated Inference and Verification of Session Types from OCaml Programs	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 TACAS 2022: Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, In: Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 379 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-99524-9_20	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 該当する

[学会発表] 計17件(うち招待講演 1件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Keigo Imai, Romyana Neykova, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen
2. 発表標題 Multiparty Session Programming with Global Protocol Combinators (oral communication)
3. 学会等名 ICE 2021: 14th Interaction and Concurrency Experience, co-located with DisCoTec 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keigo Imai, Romyana Neykova, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen
2. 発表標題 Verifying Multiparty Communication Protocols using ML Type Systems
3. 学会等名 ML'21: ML Workshop 2021, co-located with ICFP 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keigo Imai, Julien Lange, Romyana Neykova
2. 発表標題 Verifying Session-Typed Concurrent Programs using Typed PPX in OCaml
3. 学会等名 情報処理学会 第137回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keigo Imai, Julien Lange, Romyana Neykova
2. 発表標題 KmcLib: Automated Inference and Verification of Session Types (PPL Category 2)
3. 学会等名 PPL 2022: 第 24 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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 将希, 今井 敬吾
2. 発表標題 OCamlのための構文上の穴を用いたアドホック多相のプリプロセッサによる実装 (ポスター)
3. 学会等名 PPL 2022: 第 24 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
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keigo Imai
2. 発表標題 Polymorphic Multiparty Session Handlers in OCaml
3. 学会等名 PLACES 2022: 13th Workshop on Programming Language Approaches to Concurrency- & Communication-centric Software (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井敬吾
2. 発表標題 混合選択とタイムアウトで拡張されたマルチパーティセッション型の軽量検査
3. 学会等名 第132回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keigo Imai
2. 発表標題 A Preliminary Study on Locally Concurrent Multiparty Session Types
3. 学会等名 第127回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 オレグ キセリョーフ、今井 敬吾
2. 発表標題 セッション型、簡潔に (ポスター)
3. 学会等名 第21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 (PPL2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今井 敬吾、ジャック ガリグ
2. 発表標題 レンズとモナドを用いた軽量の線形型付きプログラミング
3. 学会等名 第121回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Oleg Kiselyov, Keigo Imai
2. 発表標題 Session types without sophistry
3. 学会等名 IFIP Working Group 2.11, Eighteenth Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keigo Imai, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen
2. 発表標題 Session-ocaml: a Session-based Library with Polarities and Lenses
3. 学会等名 PPL 2018: 第20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
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keigo Imai, Romyana Neykova, Nobuko Yoshida, Shoji Yuen
2. 発表標題 Fully Static Multiparty Session Programming with Global Protocol Combinators
3. 学会等名 The 2019 Joint Workshop on Formal Methods, Shanghai, China (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Imai
2. 発表標題 Global Protocol Combinators: static structural multiparty sessions over simply-typed channels
3. 学会等名 PLAS Group Seminar, School of Computing, University of Kent (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Imai
2. 発表標題 Session Type Implementations in Functional Programming Languages
3. 学会等名 NII Shonan Meeting 149: Programming Languages for Distributed Systems (PL4DS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Imai
2. 発表標題 A session type implementation in OCaml
3. 学会等名 2017 NSFC-JSPS Joint Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村 駿介, 今井 敬吾
2. 発表標題 文脈自由マルチパーティセッション型の実装 (ポスター)
3. 学会等名 PPL 2022: 第 24 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
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kmclib https://github.com/keigoi/kmclib OCaml-MPST http://github.com/keigoi/ocaml-mpst Session types via Staging http://okmij.org/ftp/meta-programming/sessions/ Session C# https://github.com/curegit/session-csharp LinOCaml: Linearly-typed programming in OCaml https://github.com/keigoi/linocaml/ session-ocaml https://github.com/keigoi/session-ocaml/

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

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		
英国	Imperial College London	Brunel University London	University of London Royal Holloway