

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04185

研究課題名(和文) ネットワークオペレータの意図に基づくワークフロー実行機構の研究

研究課題名(英文) Workflow Execution based on Network Operations' Intention

研究代表者

明石 修 (Osamu, Akashi)

国立情報学研究所・学術ネットワーク研究開発センター・特任教授

研究者番号：60841202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではサービス設定ワークフローを高い抽象度で表現することにより環境・実装依存の部分を隠蔽し、ワークフロー全体としてネットワークオペレータが意図する通りの実行結果であったことの妥当性の検証を目指した。基本となる構成要素として、実際に運用されるネットワーク機器の設定情報へのラベル付けや構造化された状態での操作情報の取り出し、入力時の設定記述の妥当性検証、適用先環境やその変化に応じた設定変更などの操作意図に対する解釈の抽出技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通信と情報処理機能の融合であるネットワーク環境が基本的な社会インフラとして発展を続け、存在自体が不可欠となる一方、その安定運用は必須の課題となっている。一方、さまざまな要求や機能を実現するための管理運用手順は複雑化し、その自動化や自律運用が望まれているが、設定のためのワークフロー実行結果の妥当性の検証、環境の変化や障害が発生した場合の影響範囲に応じた復旧作業等が必要である。そのため、ネットワーク状況に応じた効率的な妥当性検証、適応的な実行機能の実現は重要である。

研究成果の概要(英文)：This research focuses on the workflow execution based on network operators' intention by describing it in a highly abstracted manner which can encapsulate implementation or environment dependent details. As important research points, we constructed the technical frameworks for labeling on network configurations, extraction of configurations in a structured manner, verification of configured networks from the viewpoint of both data-plane and control-plane, and adjustment of configurations depending on environmental changes.

研究分野：ネットワーク管理

キーワード：ネットワーク管理 妥当性検証 機械学習

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通信と情報処理機能の融合であるネットワーク環境が基本的な社会インフラとして発展を続け、存在自体が不可欠となる一方、その安定運用は必須の課題となっている。一方、さまざまな要求や機能を実現するための管理運用手順は複雑化し、その自動化や自律運用が望まれているが、1) 設定のためのワークフロー実行結果の妥当性の検証、2) 環境の変化や障害が発生した場合の影響範囲に応じた復旧作業、等が必要であり、その時点でのネットワーク状況に応じた適応的な対処が必要である。

現在のネットワークやクラウド等の運用においては、特定のサービスを実現するためワークフローに個別の設定手順を記述し、個別のコマンドを実行する手段は提供されているものの、基本的な操作においてさえも、対象とする機器、OS、アプリケーションのバージョンの違いから生ずる実行結果の出力解析の困難さや、実行時のネットワーク環境の状態の違いによる解釈の違い、などの問題により、個別の実行結果はもとより、ワークフロー全体を通じた実行結果の妥当性検証は複雑化し、その自動化は困難な状況である。

2. 研究の目的

複雑化するネットワークの管理運用において、そのサービス設定・運用の自動化・自律化が望まれているが、対象とする環境での実行結果出力解析の困難さ、実行時のネットワーク環境の状態の違いによる解釈の違い、などの問題により、その実現は難しい。そのためワークフローを高い抽象度で表現することにより全体意図を記述すると同時に環境・実装依存の部分を隠蔽し、ワークフロー全体としてネットワークオペレータが意図する通りの実行結果であったことの妥当性を検証可能とする。また、全体意図整合性チェックとデータプレーン検証過程の学習により、検証を自動化・効率化させるとともに、適用先のネットワーク状態とも連動させ、環境の変化や障害時に、サービスを維持するための代替ワークフローを推定可能とし、さらなるネットワーク運用の自動化・自律化を目指す。

3. 研究の方法

ネットワーク管理・サービス設定の典型例に絞り、ルータ・サーバ等の設定実行ワークフローにおいて、コントロールプレーンの制御記述のみから検証可能な部分と、環境依存で外部観測をしないと検証が不可能な部分に分け、体系化を行うことで全体設計における必要な情報を明確化する。外部環境依存部分は、データプレーンの観測で得られる情報、およびネットワーク関連機器等の内部情報から成る。次にこれらの典型例解析結果に基づき、ワークフローの各操作を表す基本操作をテンプレート化し、ビルディングブロックとして使うことが可能なパーツとして取り出す技法を構築することで、合成、全体意図との整合性検証、類似度推定の学習を簡易化する。またテンプレートを合成したワークフロー全体の実行に際し、個々のテンプレートの実行結果と環境を参照しながら判断し、最終的にはワークフロー全体での実行結果の成否を判断可能とする枠組みを、典型例の範囲で一次構築する。並行して、設定ワークフローから、テンプレートの抽出・マッピングを行う機構と機械学習との連携に向けての適用性を解析する。なお検証には、組み合わせるテンプレートの構成粒度と検証の網羅性が重要となるため、両ファクターに対して評価関数を設定し、現実的な時間内で網羅的に検証可能なテンプレートの粒度設計も同時に行う。これらの結果に基づき、基本操作の意味解釈を、適用先のネットワーク環境、過去の事例、全体意図との整合性などと突合し、更にネットワーク状態の観測・解析過程を観測基盤経由に束ねて環境依存部分を抽象化した上で、統合的に妥当性を判断する枠組みへの適用可能性を解析する。

4. 研究成果

本研究ではサービス設定ワークフローを高い抽象度で表現することにより環境・実装依存の部分を隠蔽し、ワークフロー全体としてネットワークオペレータが意図する通りの実行結果であったことの妥当性の検証を目指す。

基本となる構成要素として、実際に運用されるネットワーク機器の設定情報へのラベル付けや構造化された状態での操作情報の取り出し、適用先環境やその変化に応じた設定変更などの操作意図に対する解釈の抽出、およびその設定が運用者の意図として妥当であることの検証技

術の構築に注力した。

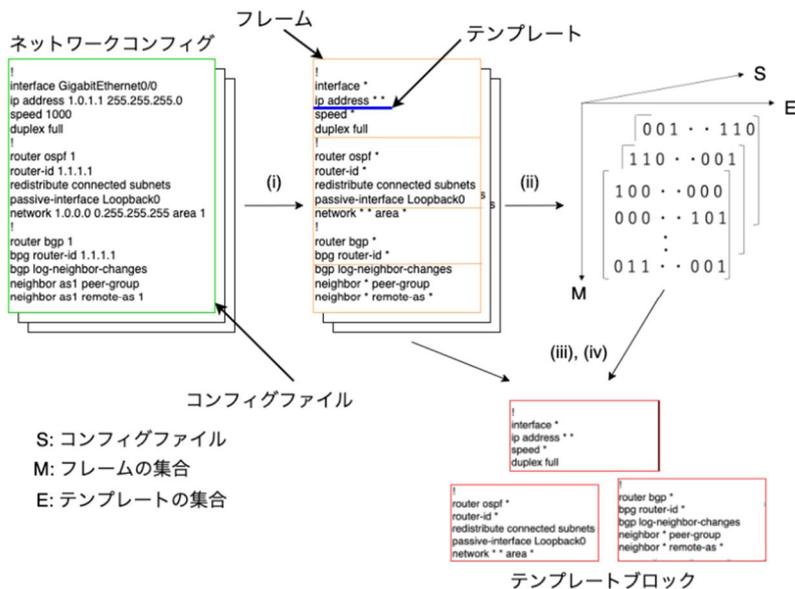
解釈における構造化データ抽出手法としては、通常の設定情報から操作記述をテンプレートとして取り出し、テンプレートに対するパラメータ値に分離した上で、data-driven 解析の手法を用いてこれらを意味付けし構造化した形で出す手法の有効性を検証した。

妥当性検証に関しては、言語モデルと自動設定フレームワークを連携させ、その有効性を検証した。また適用先環境に応じた設定に関しては、観測と強化学習を組み合わせ、その有効性を検証した。

検証パートに関しては、ネットワークの挙動が運用者の意図通りであることの検証を目的とし、コントロールプレーン検証、データプレーン検証の両視点から、検証手法設計・構築を行った。特に、対象とするネットワークの形態や、様々なレイヤの管理運用手法が複雑に混在する現実のネットワークを意識し、そのモデル化、規模拡張性を解析しながら構築を進め、実際の大規模データセンタの設定等を含めて、その有効性を検証した。

(1) ネットワークコンフィグブロックの抽出

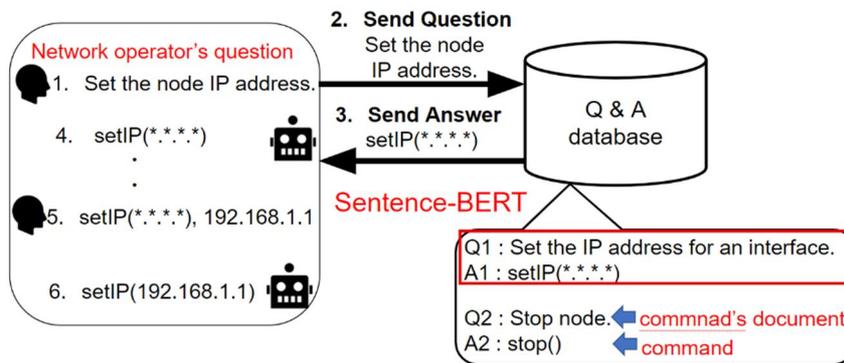
ネットワークコンフィグを入力する際に、オペレータの入力ミスを減らす必要がある。一般的には、ネットワーク機器自身が提供しているコマンド補完のみを頼りに入力することになるが、意味的なコンフィグの塊をまとめて入力できた方が、利便性が高く、コンフィグの入力ミスを減らすことができると考えられる。本課題では、連続して入力される可能性の高いコンフィグの一部の塊（テンプレートブロック）を教師なし学習にて抽出する手法を開発した（図 1）。本手法では、まず、ネットワークコンフィグに記載されているコマンドに対して識別子を与え識別子の辞書を作成し、その辞書のインデックスを用いたコンフィグベクトルを作成する。コンフィグベクトルに対して、事前に定めた入力頻度の閾値を下回るベクトル値を削除し、当該ベクトルからタッカー分解を用いて、テンプレートブロックを抽出する。実験では、CISCO のルータ・スイッチのコンフィグ（データセンタにて利用を想定される 21 台分のコンフィグ：約 1000 行）に対して、提案手法を適用し、テンプレートブロックの抽出を行った。抽出結果を分析したところ、生成したテンプレートブロックは最大で十数行となっており、利用可能なテンプレートは、利用パラメータを変更し検証したところ、全体の 25% - 50%程度であることが分かった。



(図 1)

(2) 言語モデルを用いたネットワークコンフィグの自動設定

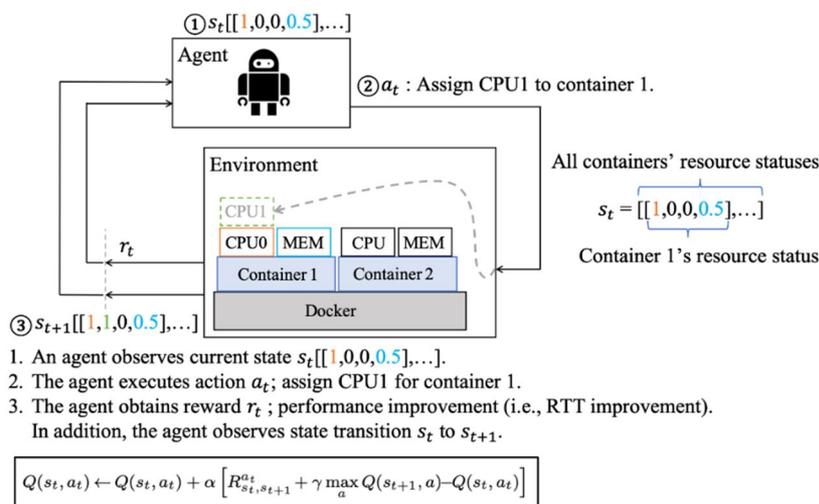
ネットワークコンフィグの入力支援を柔軟に行うため、言語モデルを用いた対話形式でのコンフィグ支援手法を開発した。本手法では、大規模言語モデルではなく、オンプレミス環境で利用できる言語モデルである Sentence BERT を利用することとした（図 2）。事前に、コンフィグとそのコンフィグに対応する説明文の情報を収集し、Q&A データベースに保存する。ネットワークコンフィグを入力するオペレータからの要求（意図）に最もマッチする上位 K 個のコンフィグの説明文を Sentence BERT を用いて探索し、オペレータに返答することとした。本手法を用いて、Python 上で仮想的にネットワークを設定するツールである Mininet のコンフィグと説明文を Q&A データベースに投入し、当該ツールを用いた基本的なネットワークの設定を行った。その結果、投入すべき正解のコンフィグが 90%以上の確率で、K 個の出力の中に含まれていることがわかった。



(図 2)

(3) 強化学習を用いた仮想サーバリソースの自動設定

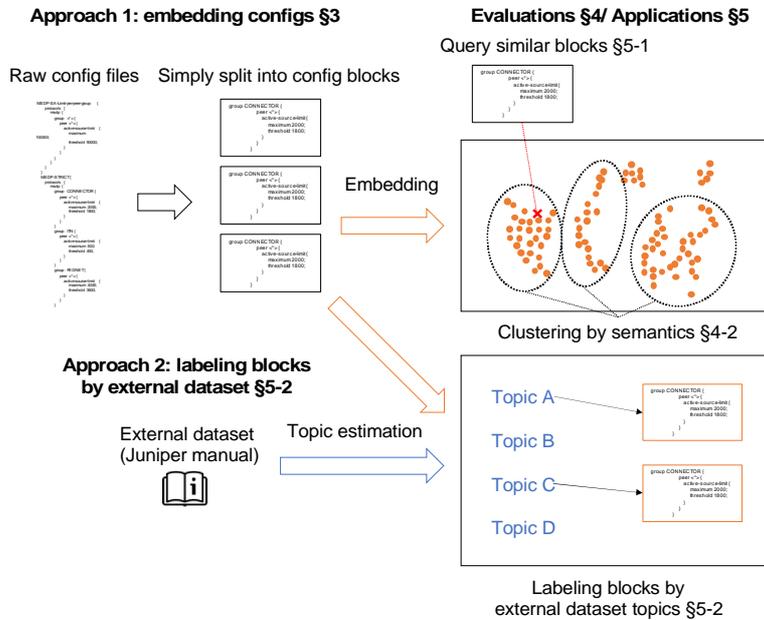
仮想化技術（主にコンテナ仮想化技術）によって、様々な機器がソフトウェア上で実現されるようになり、それらに対するリソース制御（CPU、メモリ等のリソース制御）を適切に行うことが重要になる。本課題では、複数のコンテナが動作する仮想環境にて、それらのコンテナに対する負荷に応じて、リソースを自動的に割り当てる手法を開発した（図 3）。本手法では、強化学習を用いて各コンテナのリソースを制御し、その結果として性能がどれくらい向上したか（RTT の改善度合い）のフィードバックを通して、制御方法を自律的に変化させた。動作検証では、Docker を用いた仮想環境を準備し、負荷の異なるコンテナを複数立ち上げ、各コンテナに対して約 100 回の HTTP 接続を行い、RTT が改善されるような CPU とメモリの割り当てを目指した。本手順を約 1000 回程度行うことで、RTT が最も改善されることが確認できた。



(図 3)

(4) ネットワークコンフィグブロックの意味づけ

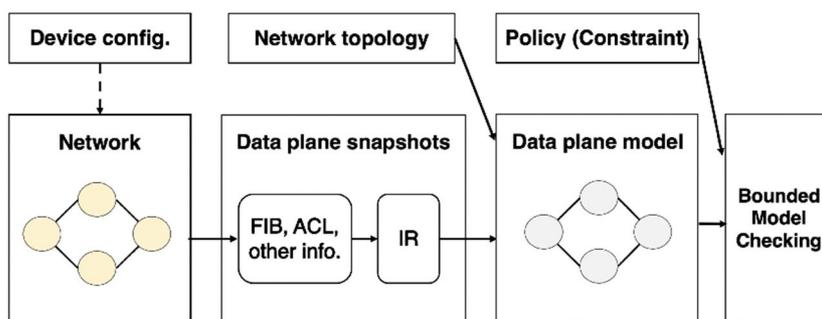
ネットワークの設定ファイルは複数の意味のあるブロックから構成されている。ネットワーク管理者は、それぞれのブロックの意味を理解しつつ正しく設定を記述する必要がある。しかし、そのブロックの意味を正しく理解することは難しく、設定の間違いを誘引する要素の一つとなっている。本課題では、ネットワーク設定ファイル中のコンフィグブロックが何を意味しているかのトピックラベル付け、およびブロックの意味的な近さを定量的に解析する手法を開発した（図 4）。具体的には、コンフィグブロックを文字列として抽出する前処理を行い、ブロックを一つの文書として扱い、その中に現れる語の持つ特徴から文書としての特徴ベクトルを抽出する。さらに全ブロックの特徴ベクトルをクラスタリングすることで、意味の塊を抽出する。さらに、外部の文章（ベンダーのネットワーク機器のマニュアル）を、章節ごとに抽出し、その文章から同様に特徴ベクトルを得ることで、節タイトル（トピック）ごとの特徴ベクトルとして利用する。これにより、クラスタリングされたクラスタの各々にもっとも近いトピックを割り当てることが可能となり、クラスタの意味を定義することに成功した。さらに、未知のコンフィグブロックをクエリとして、特徴ベクトルを計算することで、最も近いトピックを提示することを実現した。



(図 4)

(5) SRv6 データプレーンネットワーク検証

データセンター等の大規模ネットワークでは、多数の機器が接続され、その各々が正しく動作するように設定を投入する必要がある。従来の IP ベースの経路制御ではベストパスを選択するのみであったのに対して、近年の高性能ネットワークでは、ネットワーク仮想化やネットワークファンクションチェイニング(SFC)等の高度かつ柔軟な経路制御手法が利用されている。そのため、ネットワークオペレータがネットワークの挙動を正しく設定することが難しくなっている。この問題に対して、本課題では、柔軟なネットワーク設定を可能とする SRv6 プロトコルに対応した、データセンタ向けネットワーク検証技術の研究・開発を行った。開発したフレームワークは各機器の FIB、ACL、NAT テーブル等の従来のデータおよび SRv6 の変換テーブルから構成されるデバイスモデルおよびトポロジから構成され、そのネットワークモデルにおいてネットワーク性質の検証を行う。とりわけ、SRv6 のヘッダ変換をモデルに組み込むことで、SFC ネットワークにおいて、到達性やループの検出等の諸性質を柔軟な記述で検証することが可能となった。さらに 6 万程度の転送エントリを持つ Clos ネットワークでの評価では、30 秒程度の時間で検証が行えることを示した。



(図 5)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 R. Shiiba, S. Kobayashi, O. Akashi, K. Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Toward a compositional data plane verification for large-scale networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. AINTEC ' 22	6. 最初と最後の頁 1-2
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 該当する

1. 著者名 花光 大輔, 水谷 后宏, 小林 諭, 福田 健介, 明石 修	4. 巻 -
2. 論文標題 ネットワークコンフィグの潜在的特徴抽出手法の提案と評価	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集	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） なし	査読の有無 無
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 Toshiki Kawakita, Kimihiro Mizutani, Satoru Kobayashi, Kensuke Fukuda, Osamu Akashi	4. 巻 -
2. 論文標題 An Implementation of Effective Resource Management Scheme Using Deep Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Emerging Technologies for Communications	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） 10.34385/proc.72.s8-5	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 該当する

1. 著者名 Mamoru Kawaguchi, Kimihiro Mizutani, Nobukazu Iguchi	4. 巻 -
2. 論文標題 An Implementation of Misconfiguration Prevention System Using Language Model for a Network Automation Tool	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Emerging Technologies for Communications	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） 10.34385/proc.72.s5-8	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 Masaya Suzuki, and Kimihiro Mizutani, Satoru Kobayashi, Kensuke Fukuda, Osamu Akashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Novel Network Configuration Generation Scheme from Network Operator's Intent Described by Natural Language	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Emerging Technologies for Communications	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) 10.34385/proc.72.s2-1	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 Kazuki Otomo, Satoru Kobayashi, Kensuke Fukuda, Akashi Osamu, Kimihiro Mizutani, Hiroshi Esaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Towards Extracting Semantics of Network Config Blocks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE 45th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC 2021)	6. 最初と最後の頁 1443-1448
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/COMPSAC51774.2021.00214	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 Ryusei Shiiba, Satoru Kobayashi, Osamu Akashi, Kensuke Fukuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Verifying Network Properties in SRv6 based Service Function Chaining	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AINTEC '21: Asian Internet Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 18-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3497777.3498546	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 Daisuke Hanamitsu, Kimihiro Mizutani, Satoru Kobayashi, Kensuke Fukuda, Osamu Akashi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Scheme of Extracting Network Configuration Template Blocks Based on Tucker Decomposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Conference on Emerging Technologies for Communications	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) 10.34385/proc.68.P1-14	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 椎葉瑠星
2. 発表標題 Towards Realtime Dataplane Network Verification
3. 学会等名 WIDE研究会ポスタ
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 明石修, 水谷后宏, 小林諭, 福田健介
2. 発表標題 ネットワーク管理ワークフローの自動実行機構の提案
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021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	水谷 后宏 (Mizutani Kimihiro) (40845939)	近畿大学・情報学部・准教授 (34419)	
研究分担者	福田 健介 (Fukuda Kensuke) (90435503)	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授 (62615)	

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
---------	---------