［論文］

知識チャンク再利用支援ツールを利用した 教師ロボット連携授業システムの開発と評価

Teacher-Robot Collaboration Lesson System using Knowledge Chunk Reuse Support Tool

森田 武史†, 高橋 尚也‡, 小須田 瑞季†, 山口 高平†

Takeshi MORITA, Naoya TAKAHASHI, Mizuki KOSUDA, Takahira YAMAGUCHI

† 慶應義塾大学 理工学部

‡ 慶應義塾大学大学院 理工学研究科

† Faculty of Science and Technology, Keio University

‡ Graduate School of Science and Technology, Keio University

要旨

サービスロボットアプリケーション開発には多大なコストがかかっており，ロボットや人工知能技術の知識がない領域専門家でも容易にアプリケーションを開発可能なプラットフォームが求められている．サービスロボットアプリケーションの開発を支援するために，著者らは統合知能アプリケーション開発プラットフォーム PRINTEPS の研究開発を進めている．PRINTEPS では，シナリオエディタを用いて実行主体ごとに業務プロセスのワークフローを記述することにより，ロボットを実行可能なソースコードが生成できる．シナリオエディタでは，ワークフロー全体または個別の業務プロセスを再利用しながら，ワークフローを構築することができる．しかし，ワークフロー全体を再利用する場合には，再利用可能な箇所を同定し，目的に合わせて修正することは困難である．一方，個別の業務プロセスを再利用する場合には，業務プロセスの組み合わせ方を考えることが困難である．これらの問題を解決するために，本研究では異種オントロジーに基づく知識チャンク再利用支援ツールを提案する．提案ツールは，事例ベース推論の枠組みを用いて，応用領域知識とロボット活用の観点から再利用可能なワークフローの部分を異種オントロジーに基づいて事例（知識チャンク）として蓄積し，知識チャンクの検索および再利用を支援する．提案ツールを利用して教師ロボット連携授業システムを開発し，ケーススタディを行なった．複数の小学校で行ってきた教師ロボット連携授業のワークフローを元に，教師知識，ロボット，知識チャンクに関するオントロジーを構築し，各種オントロジーに基づいて知識チャンクベースを構築した．公立小学校の教師２名が提案ツールを用いて，理科の学習単元「振り子の運動」関するワークフローを作成し，教師ロボット連携授業を行った．教師と児童に対するアンケートより，提案ツールと教師ロボット連携授業システムの評価を行ない，その有用性を確認した.

Abstract

Since it costs a lot to develop service robot applications, there is a need for a platform that can easily develop the applications even for experts who do not have knowledge of robots and artificial intelligence techniques. We have been developing an integrated intelligent application development platform named PRINTEPS to support the development of service robot applications. By using the scenario editor in PRINTEPS, users can execute source codes for robots generated from the workflows. In the scenario editor, it is possible to create a workflow while reusing the entire workflow or individual business processes. However, when reusing the entire workflow, it is difficult to identify, how to reuse parts of the workflow containing business processes for a different purpose. Also, when reusing individual business processes, it is difficult to solve, how to combine business processes. To solve these issues, this research proposes a knowledge chunk reuse support tool based on different ontologies. Using the case-based reasoning framework, the proposed tool accumulates part of reusable workflow as a case (knowledge chunk) based on different ontologies from the viewpoint of application domain knowledge and use of robots. It also supports retrieval and reuse of knowledge chunks. As a case study, we have developed a teacher-robot collaboration lesson system using the proposed tool. We built a knowledge chunk base based on the ontologies about teacher knowledge, robots, and knowledge chunks by referring to the workflows of teacher-robot collaboration lessons we did at several elementary schools. Two teachers in a public elementary school have created workflows about the science learning unit "Pendulum Movement" using the proposed tool. Based on the created workflows, they have conducted teacher-robot collaboration lessons. We evaluated the proposed tool and teacher-robot collaboration lesson system from the questionnaire for the teachers and pupils and confirmed its usefulness.

［論文］2019 年 2 月 25 日受付, 2019 年 5 月 24 日改訂, 2019 年 6 月 25 日受理

© 情報システム学会

1. はじめに

近年，ホテルや飲食店などのサービス業において，人とコミュニケーションを取りながらサービスを提供するサービスロボットに注目が集まっている．教育分野においては，情報通信技術や人工知能技術により教育にイノベーションを起こす取り組みである EdTech[20]に注目が集まっており，様々なサービスが開発されている．EdTech では，ノート PC やタブレットが主に活用されているが，今後，サービスロボットを用いてロボットと児童・生徒のインタラクションを通した個別学習支援も期待されている．しかしながら，サービスロボットのアプリケーション開発には多大なコストがかかっており，ホテルの従業員や教師など，ロボットや人工知能技術の知識がない領域専門家でも容易にアプリケーションを開発可能なプラットフォームが求められている．

以上の背景より，著者らは統合知能アプリケーション開発プラットフォーム PRINTEPS[12]の研究開発を進めており，応用事例として複数の小学校において教師ロボット連携授業の実践を行ってきた[24]. PRINTEPS では，シナリオエディタを用いて，実行主体ごとに業務プロセスの実行手順（ワークフロー）を記述することにより，ロボット用ミドルウェアである ROS (Robot Operating System)[1]上で実行可能なソースコードを生成することができる．シナリオエディタでは，ワークフロー全体または個別の業務プロセスを再利用しながら，ワークフローを構築することが可能である．しかし，ワークフロー全体を再利用する場合には，再利用可能な箇所を同定し，目的に合わせて修正することは困難である．一方，個別の業務プロセスを再利用する場合には，業務プロセスの組み合わせ方を考えることは困難である．また，ロボットの機能や活用方法を把握していない領域専門家が，ロボットの機能や性質を考慮したワークフローを構築することは容易ではない．

PRINTEPS におけるワークフローの作成と再利用に関する問題を解決するために，本研究では異種オントロジーに基づく知識チャンク再利用支援ツール（以下，提案ツール）を提案する．提案ツールは，事例ベース推論[3][6]の枠組みを用いて，応用領域知識とロボット活用の観点から再利用可能なワークフローの部分を異種オントロジーに基づいて事例（知識チャンク）として蓄積し，知識チャンクの検索および再利用を支援する．

提案ツールを利用して教師ロボット連携授業システムを開発し，ケーススタディを行なった．複数の小学校で行ってきた教師ロボット連携授業のワークフローを元に，教師知識（教材と授業進行），ロボット，知識チャンクに関するオントロジーを構築し，各種オントロジーに基づいて知識チャンクベースを構築した．提案ツールを公立小学校の教師 2 名に利用していただき，理科の学習単元「振り子の運動」について，教師ロボット連携授業のワークフローを作成してもらった．作成したワークフローを元に，2 クラス合計 2 回の授業を行った．教師と児童に対するアンケートより，知識チャンク検索・再利用機能と教師ロボット連携授業システムの評価を行ない，その有用性を確認した．

本論文の構成は以下の通りである．2 章では，関連研究と比較した本研究の位置付けについて述べる．3 章では，本研究の基礎となる PRINTEPS シナリオエディタについて説明する．4 章では，本研究で提案する知識チャンク再利用支援ツールの構成について述べる．5 章では，知識チャンクベースの基礎となる各種オントロジーについて述べる．6 章では，知識チャンクベースに基づくワークフローの検索・再利用方法について説明する．7 章では，ケーススタディとその評価について述べる． 8 章では，本論文のまとめと今後の課題について述べる．

2. 関連研究

2.1. サービスロボットアプリケーション作成支援

[27]では，アルデバランロボティクス社により開発された人型ロボット NAO のためのアプリケーション開発ツール：Choregraphe を提案している．Choregraphe では，ロボットを動作させるためのライブラリであるボックスを，フローダイアグラム上で時系列に並べてボックス間を線で接続することにより，NAO に様々な動作をさせることができる．Choregraphe におけるボックスは PRINTEPS シナリオエディタにおけるプロセスやモジュールと類似しており，Choregraphe にはボックスを名前により検索する機能がある．しかし，本研究で提案した知識チャンクの検索や再利用に関する機能はなく，応用領域オントロジーやロボット活用方法の観点からボックスライブラリの組み合わせ方を検索し，再利用することはできない．また，Choregraphe は人型ロボット NAO または Pepper に特化したアプリケーション開発ツールであるのに対して，本研究で開発している PRINTEPS は，ROS に基づいているため，複数種類のロボットやセンサーを組み合わせたアプリケーションの構築が可能である．

[18]では，教育機関や美術館などを対象としたサービスロボットアプリケーションを開発するためのロ

ボットシナリオツールを提案している．本ツールを用いることにより，エンドユーザは既存のシナリオを再利用しながらサービスロボットアプリケーションを開発することができる．しかし，本研究で提案しているように教材，授業進行，ロボット活用などに関する様々な観点からシナリオを検索し，再利用する機能は提供されていない．

その他にも，視覚的にブロックを組み合わせることにより，コードを書くことなくサービスロボットアプリケーションを開発可能なツールはいくつか提案されている [19][15][21][22]．しかし，多くのツールは，[27]と同様に，モジュールやプロセスなどのコンポーネント単位での名前による検索と再利用機能は提供されているが，本研究で提案する知識チャンク再利用支援機能に相当する機能は提供されていない．

オントロジーを用いたロボットアプリケーション開発フレームワークとして，KnowRob[25][17]プロジェクトがある．KnowRob では，ロボットの部品とその構成，センサーとその機能，ロボットが実行可能なタスク，物理環境などに関するオントロジーが構築され，これらのオントロジーに基づいて Prolog を用いて行動計画を実行することにより，物理信号を処理する各種プログラムが連携されている．KnowRob がロボットの動作やセンシングなど, 物理信号処理に関するオントロジーを主に構築しているのに対して，本研究では応用領域やロボット活用方法に関するオントロジーを構築し，専門知識や経験知識，ワークフローの再利用に着目している点が KnowRob との差異である．

2.2. 事例ベース推論

事例ベース推論は，ヘルプデスク支援，設計支援，製造計画支援，法的推論，医療支援，教育支援など，様々な分野にこれまで適用されてきている[6]．本研究では，ロボットアプリケーション開発や教育における授業支援に事例ベース推論の枠組みを適用している．

ロボットアプリケーション開発に事例ベースを適用した研究として[14]がある．[14]では，ロボカップのシミュレーションリーグのプラットフォームを用いて，リアルタイム環境下での学習に事例ベースを適用する方法について論じている．[14]では，「センサー入力と行動内容」を事例として表現しているのに対して，本研究では，事例（知識チャンク）の構造をオントロジーおよびワークフローを用いて定義できるようにすることにより，様々な領域における事例も表現できるようにしている．また，異種オントロジーに基づいたモデルを事例として表現することにより，他のアプリケーションも事例を利用できる可能性があり，事例の再利用性を高めている点も本研究の利点の一つである．

オントロジーを事例の構造を定義するために用いている研究としては[16]がある．[16]では，モバイルベースの緊急対応システムのためのオントロジーに基づく事例ベース推論手法を提案している．[16]では，緊急事態に関する事例を，1. 緊急事態の仕様と関連属性，2. 解決策，3.結果の組として表現している．また，緊急事態オントロジーを構築し，それに基づいて事例を蓄積することにより，クエリ語彙としてオントロジーを利用したり，事例の統合などを行うことを可能にしている．オントロジーに基づいて事例を構築している点やオントロジーの概念をクエリ語彙として利用している点は本研究と類似しているが，[16]ではワークフローとオントロジーに基づくモデルの関連づけは行われていない．また，[16]では応用領域オントロジー（緊急事態オントロジー）を事例構築のために直接利用しているが，本研究では知識チャンクオントロジーを用いることにより，応用領域オントロジーを切り替えられるようにし，より汎用的に事例を定義することを試みている．

2.3. オントロジーに基づく学習・教授シナリオ作成支援

オントロジーに基づく学習･教授シナリオ設計支援システムとして SMARTIES が開発されている[8]．SMARTIES では，学習支援関連理論オントロジー：OMNIBUS（以下，OMNIBUS オントロジー）に基づいて学習･教授シナリオを作成することにより，シナリオの設計意図を保存可能にしている．さらに，作成された学習･教授シナリオを，学習･教授シナリオ記述の標準化規格である IMS Learning Design(IMS LD)[1]フォーマットに変換することにより，実践現場では失われがちなシナリオの理論的根拠や正当性を明示し，理論研究と実践研究との間の「知識共有」を促進し，理論と実践の間にあるギャップを埋めている．さらに，学習・教授理論だけでなく，OMNIBUS オントロジーに基づいて中学校教師の教授戦略を方式知識としてモデル化し，それらを用いて授業計画をモデル化する実践も行われている[9]．この研究から実践的な教授知識についても方式知識としてモデル化することにより，その組み合わせにより授業計画を記述し，改善に役立つ可能性が示されている．

[1] Learning Design Specification — IMS Global Learning Consortium, http://www.imsglobal.org/learningdesign/index.html

知識の再利用の観点では，[8]では方式知識を主に，再利用可能にしている．さらに，教師が SMARTIES を用いて学習・教授シナリオを作成する際には，OMNIBUS オントロジーに基づいて，I_L event（教授と学習の関係を定義するための概念）に対して適用可能な方法知識が提案される．これにより，学習・教授理論に基づいた学習・教授シナリオの設計や再利用を支援することを目的としている．

本研究では，教師自身が行う通常の授業ではなく，教師ロボット連携授業を研究の対象としている．そのため，ロボットの非専門家である教師に不足している，主にロボットの活用方法に関する知識やワークフローを，事例ベース推論の枠組みを用いて，知識チャンクの形式で再利用可能にすることにより，教師のワークフロー作成の負担を軽減することを目的としている．

教師ロボット連携授業は新たな試みであり，現状では，教師および開発者にロボット活用に関するノウハウが多く蓄積されておらず，ロボット用いた学習・教授理論も確立していないと考えられる．そのため，[8]のように，既存の学習・教授理論のみに基づいて教師ロボット連携授業のワークフローの構築を支援することは困難である．今後，ワークフロー及び知識チャンクを蓄積し，これらを分析することにより，教師ロボット連携授業における学習・教授理論の作成支援に提案ツールを活用できる可能性はあると考えられる．

3. PRINTEPS シナリオエディタ

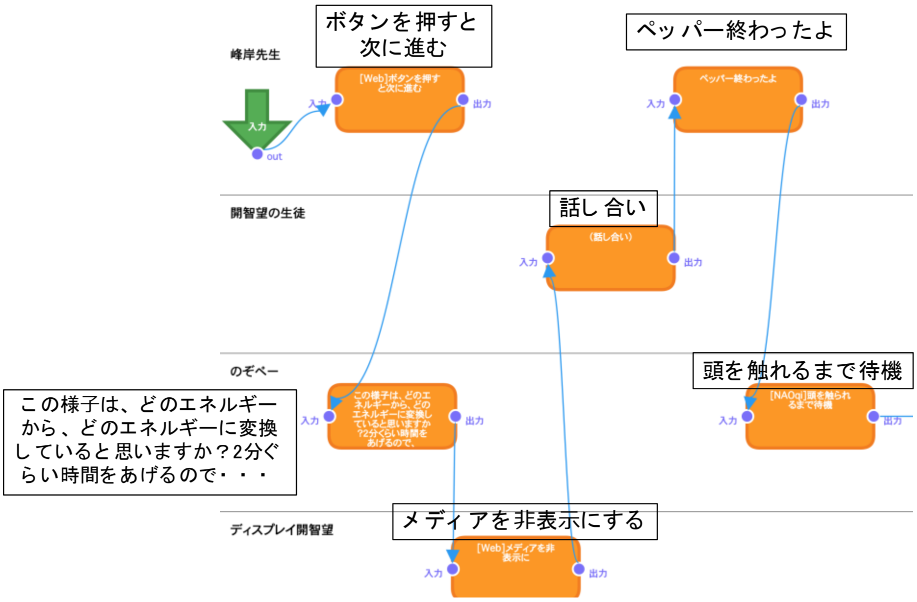


図 1　PRINTEPS シナリオエディタのスクリーンショット

PRINTEPS では，シナリオエディタを用いてソフトウェアコンポーネント（サービス，プロセス，モジュール）の実行手順（ワークフロー）を定義することにより，ROS 上で動作するアプリケーションを構築することができる．サービスはプロセスの組み合わせにより構築され，プロセスはサブプロセスおよびモジュールの組み合わせにより構築される．モジュールは，PRINTEPS における最小のソフトウェアコンポーネントであり，ROS におけるサービスクライアント，パブリッシャ，サブスクライバなどに相当する．PRINTEPS におけるプロセスは，業務プロセスに対応し，領域専門家はサービスまたはプロセスを組み合わせてワークフローを構築することを想定している．

図 1 にシナリオエディタのスクリーンショットを示す．シナリオエディタでは，業務プロセスの実行主体であるアクター（人間やロボットなど）および道具（ディスプレイなど）別に横方向のレーンで区切り，レーン内に対応するアクターや道具が実行する業務プロセスの実行手順を定義することができる．図 1 において「峰岸先生」は開智望小学校の教諭を，「のぞぺー」は開智望小学校が保有している Pepper を表している．シナリオエディタを用いることにより，アクター間の相互作用を俯瞰しながら，ワークフローが構築できる．

シナリオエディタでは，ワークフロー全体または個別の業務プロセスを再利用しながら，ワークフローを構築することができる．しかし，ワークフロー全体を再利用する場合には，再利用可能な箇所を同定し，目的に合わせて修正することは困難である．一方，個別の業務プロセスを再利用する場合には，業務プロセスの組み合わせ方を考えることは困難である．また，ロボットの機能や活用方法を把握していない領域専門家が，ロボットの機能や性質を考慮したワークフローを構築することは容易ではない．

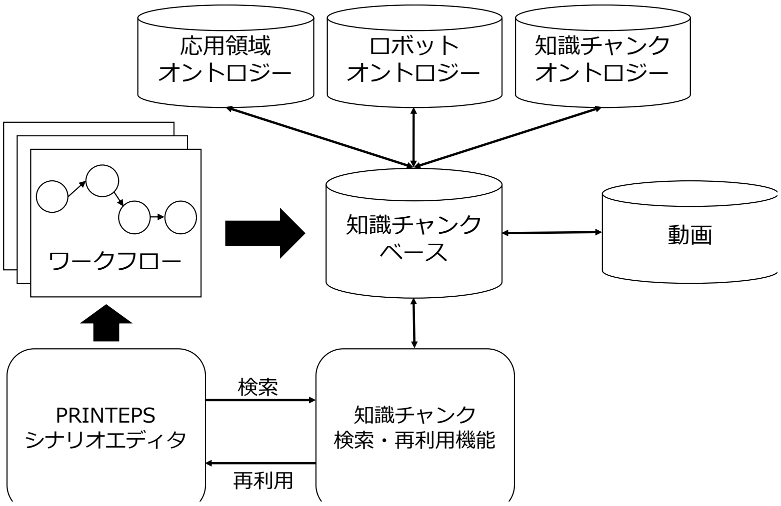


図 2　知識チャンク再利用支援ツールの構成

4. 知識チャンク再利用支援ツールの構成

PRINTEPS におけるワークフローの作成と再利用に関する問題を解決するために，本研究では異種オントロジーに基づく知識チャンク再利用支援ツール（以下，提案ツール）を提案する．本章では，最初に知識チャンクを定義し，次に知識チャンク再利用支援ツールについて述べる．

4.1. 知識チャンク

知識チャンクを定義するために，本研究における「知識」と「チャンク」の定義について述べる．人工知能の知識工学の研究分野では，「知識」は「問題から解へとつながる記号の列」[10]のことを指し，この「記号の列」は「知識表現」[5]により記述される．本研究における「知識」は知識工学の研究分野における「知識」のことを指す．「知識表現」には，ワークフロー，オントロジー，ルール，ゴールツリーなどがあるが，本研究では特にワークフローおよびオントロジーを知識表現として用いる．知識には様々な種類[11]があるが，本研究では「1. 応用領域に関する専門家の専門知識や経験的知識」,「2. ロボット活用方法に関する知識」,「3. 人やロボットがタスクを実現するために必要な行動手順に関する知識」を対象とする．1 と 2 についてはオントロジーを用いて表現し，3 についてはワークフローを用いて表現する．一方，チャンクとは，G. A. Miller が提唱した「意味のある情報のまとまり」を表す概念である[23].

以上の「知識」と「チャンク」の定義より，「複数種類の知識表現のまとまり」を「知識チャンク」の定義とする．具体的には,「意味のある（再利用可能な）PRINTEPS におけるワークフローの部分とそれに関する異種オントロジーに基づくモデル」が提案ツールが利用する「知識チャンク」である．ここで,「オントロジーに基づくモデル」とは，オントロジーにおけるクラスのインスタンス間およびインスタンスとリテラルの関係（トリプル）の集合を示す．知識チャンクオントロジーにおける「知識チャンク」クラスのインスタンスを知識チャンクの ID として定義し，そのインスタンスと再利用可能なワークフローの部分やそれに関連する応用領域とロボット活用におけるクラスのインスタンスとの関係が知識チャンクには定義されている．これらのクラスおよびインスタンスは，知識チャンクを検索する際のインデックスとして利用される．さらに，5.4 節で述べるように，ワークフローとそのモデルのみでロボットの動きを想定することは困難であることから，再利用可能なワークフローの部分を実行した際のロボットの動きを録画した動画ファイルも知識チャンクと関連づけている．これにより，ユーザが提案ツールを用いて知識チャンクを検索した際に，関連する動画を再生できるようにしている．また，知識チャンクが格納されたデータベースを「知識チャンクベース」と呼ぶ.

4.2. 知識チャンク再利用支援ツール

図 2 に提案ツールの構成を示す．提案ツールでは，事例ベース推論の枠組みを用いて，応用領域知識とロボット活用の観点から知識チャンクを 3 種類のオントロジー（応用領域オントロジー，ロボットオントロジー，知識チャンクオントロジー）に基づいて事例として蓄積し，知識チャンクの検索および再利用を支援する．提案ツールは，PRINTEPS シナリオエディタを拡張することにより実装した．

提案ツールを用いて知識チャンクを再利用する流れを説明する．提案ツールでは，シナリオエディタを用いてワークフローがいくつか構築されていること，ワークフロー実行時の動画が撮影してあること，知識チャンクオントロジーとロボットオントロジーが，開発者により事前に構築されていることを前提としている．最初に開発者は領域専門家にインタビューをしながら応用領域オントロジーを構築する．その後，知識チャンクに対応するワークフローの部分を抽出すると共に，それに対応する動画の切り出しを行う．知識チャンクオントロジーに基づいて，知識チャンククラスのインスタンスを作成し，関連する業務プロセスの ID，動画へのリンク，応用領域オントロジーに基づいた検索用インデックスの付与を行う．提案ツールのユーザは，シナリオエディタ上から応用領域オントロジーとロボットオントロジーに基づいて作成された検索用インデックスを利用して，知識チャンクベースを検索する．条件に一致する知識チャンクのリストが表示され，再利用したい知識チャンクを選択すると，知識チャンクに対応するワークフローの部分がシナリオエディタ上に挿入される．ユーザは挿入されたワークフローを編集し，再利用することができる．

本研究では，教師ロボット連携授業をケーススタディとしているため，応用領域オントロジーとして，教材と授業進行オントロジーを構築した．5 章ではケーススタディのために構築した応用領域オントロジー，ロボットオントロジー，知識チャンクオントロジーについて述べる．6 章では，知識チャンクベースに基づくワークフローの検索・再利用方法について述べる．

5. 異種オントロジー

5.1. 概要

知識チャンク再利用支援ツールでは，応用領域オントロジー，ロボットオントロジー，知識チャンクオントロジーに基づいて知識チャンクベースを構築する．本章では，各種オントロジーの詳細について説明する．本研究ではケーススタディとして教師ロボット連携授業を行うため，応用領域オントロジーとして教師知識を体系化した教材と授業進行オントロジーを構築した．なお，オントロジーは Web Ontology Language(OWL)[2]の形式で，オントロジーエディタ Protégé[3]を用いて構築した．

5.2. 応用領域オントロジー

5.2.1 教材オントロジー

教材オントロジーは，文部科学省が定めた学習指導要領に基づいて，各教科の学習単元に関連する教材知識を体系化したオントロジーである．教材オントロジーを用いることにより，教師は教科や学習単元とそれに関する教材の観点からワークフローを検索・再利用することができる．図 3 に教材オントロジーにおけるクラス階層とインスタンスの一部を示す．教材オントロジーは，「学習単元」クラスをルートクラスとして，各教科の学習単元クラス（「理科の学習単元」クラスなど）をルートクラスのサブクラスとして定義している．さらに，各教科の学習単元クラスのサブクラスとして，「力学分野の学習単元」クラスなど，分野ごとの学習単元クラスを定義した．各学習単元クラスのインスタンスには，具体的に行う学習単元が定義されている．例えば，図 3 に示すように「力学分野の学習単元」クラスのインスタンスには，「てこの規則性」や「振り子の運動」が，「生物分野の学習単元」クラスのインスタンスには，「人の体のつくりと働き」や「人の体のつくりと運動」などが定義されている．

本研究では，ケーススタディにおいて小学校の理科の授業を対象としているため，文部科学省が提供している「小学校学習指導要領解説 理科編」第 2 章第 2 節「理科の内容区分」[4]を参考に，教材オントロジーを構築した．

5.2.2 授業進行オントロジー

授業進行オントロジーは，授業の導入やまとめなど，授業進行における構成を体系化したオントロジーである．授業進行オントロジーを用いることにより，教師は授業進行の観点からワークフローを検索・再利用することができる．図 4 に授業進行オントロジにおけるのクラス階層とインスタンスの一部を示す．授業進行オントロジーは，「授業の進め方」クラスをルートクラスとして，各教科ごとの授業の進め方に関するクラス（「理科の授業の進め方」クラスや「社会の授業の進め方」クラス）をサブク

---
[2] https://www.w3.org/OWL/
[3] https://protege.stanford.edu/
[4] 小学校学習指導要領解説 http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/syokaisetsu/index.htm

ラスとして定義した．また，各教科ごとの授業の進め方に関するクラスには，各教科に関する具体的な授業の進め方を表すインスタンスを定義した．例えば，図 4 に示すように「理科の授業の進め方」クラスのインスタンスには,「単元導入(自然現象への働きかけ)」や「問題づくり」などのインスタンスを定義している．さらに，全ての教科に共通した「教科非依存の授業の進め方」クラスを定義し，「授業の開始・導入」,「授業のメインコンテンツ」,「授業のまとめ・終了」などのインスタンスを定義した．

本研究では, ケーススタディを行った小学校の教員が参考にしている文部科学省の手引き[5]を基に,「理科の授業の進め方」クラスのインスタンスを定義した．

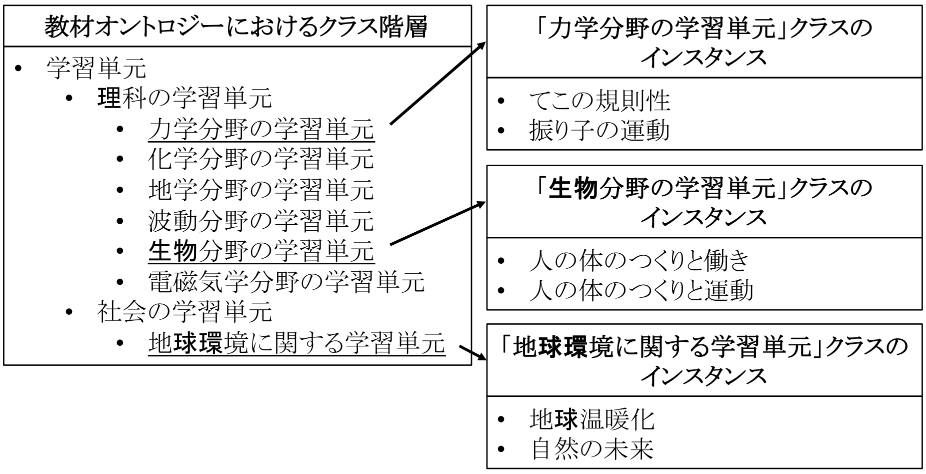


図 3　教材オントロジーにおけるクラス階層とインスタンスの一部

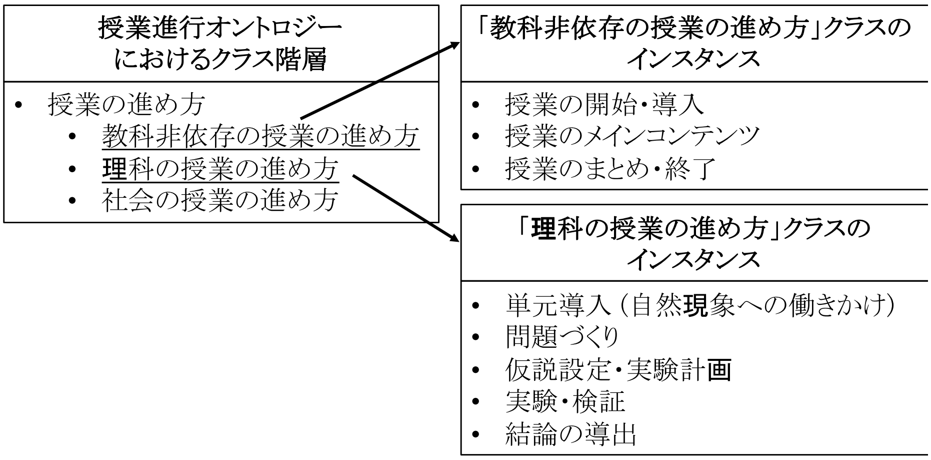


図 4　授業進行オントロジーにおけるクラス階層とインスタンスの一部

5.3. ロボットオントロジー

ロボットオントロジーは，ロボットの機能やロボットと人（教師と児童）のインタラクションを体系化したオントロジーである．ロボットオントロジーを用いることにより，教師はロボットの機能やロボットと人のインタラクションの観点からワークフローの検索・再利用ができる．

これまで行ってきた教師ロボット連携授業において，児童と教師のアンケート結果より，ロボットが適切に活用できたと思われる授業の特徴として，「ロボットと人がインタラクションを取る場面を授業ワークフローに導入している」,「教師とロボットの役割分担を適切に定めて，授業ワークフローを作成している」の 2 点が挙げられる．

以上より, 教師やロボットが一方的に児童に説明するだけでなく, ロボットの役割を明確にした上で, 教師とロボットまたは児童とロボットが掛け合いをするような授業のワークフローを作成することが, 教師や児童の評価につながっていると考えられる．

[5] 小学校理科の観察，実験の手引き http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/senseiouen/1304649.htm

図 5 にロボットオントロジーにおけるクラス階層とインスタンスの一部を示す．ロボットオントロジーは「ロボットの使い方」クラスをルートクラスとして，「インタラクションに関する使い方」クラスと「実際にやってみて反応がよかった使い方」クラスをサブクラスとして定義した．

「インタラクションに関する使い方」クラスのインスタンスには,「ロボットから児童への働きかけ」,「ロボットから教師への働きかけ」など，人とロボットのインタラクションに関するロボットの使い方をインスタンスとして定義した．「実際にやってみて反応がよかった使い方」クラスのインスタンスには,「ロボットによる自発的行動の演出」などを定義した．例えば，これまで行ってきた教師ロボット連携授業において，人型ロボット NAO が地球温暖化の授業に関する動画を児童に見せるワークフローを作成し実行したところ，児童はロボット自身が動画を見せてくれたように受け取ったために，開発者や教師が想定していた以上に児童の反応が良かったことがあった．このようなワークフローの部分に対して,「ロボットによる自発的行動の演出」インスタンスを関連づけている．

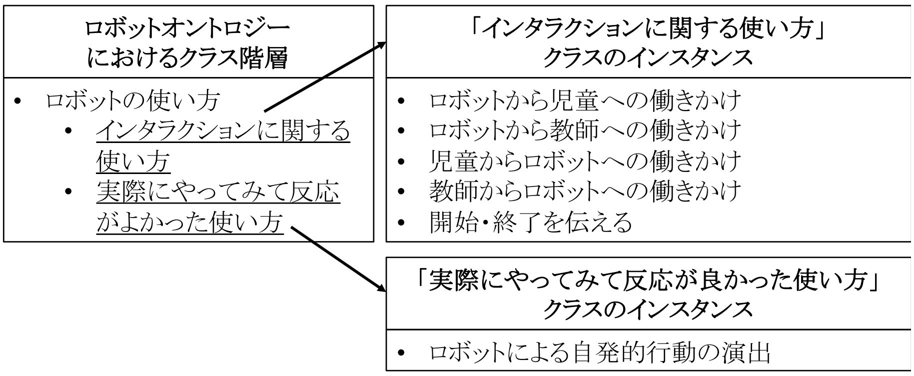


図 5　ロボットオントロジーにおけるクラス階層とインスタンスの一部

5.4. 知識チャンクオントロジー

知識チャンクオントロジーは，知識チャンクを構成するプロセスと応用領域オントロジーの関係を体系化するためのオントロジーである．

図 6 に知識チャンクオントロジーにおける知識チャンククラスとインスタンスを示す．知識チャンクオントロジーにおけるクラスとして,「知識チャンク」クラスと「プロセス」クラスを定義した．知識チャンクは「知識チャンク」クラスのインスタンスとして定義される．PRINTEPS ワークフローエディタにおけるプロセスは「プロセス」クラスのインスタンスとして定義される．

例えば，図 6 に示すように,「知識チャンク」クラスのインスタンスには,「Pepper が立て札クイズをする」,「にんじんを切る」,「リズム振り子」などが定義されている．これらの知識チャンクについては，本研究のケーススタディにおいて教師により参照されたため，7.5 節において内容を説明している．

「プロセス」クラスのサブクラスには，PRINTEPS ワークフローエディタにおいて定義されたロボットごとのプロセスを定義している．例えば，図 6 では「プロセス」クラスのサブクラスとして「NAO のプロセス」を定義し，そのサブクラスとして,「身振り付き発話」クラスを定義している．「身振り付き発話」クラスのインスタンスとしては,「NAO 発話 1」や「NAO 発話 2」など，発話内容を含めた具体的な NAO の発話プロセスを定義している．

知識チャンクオントロジーにおけるデータタイププロパティとして,「chunkFile」,「chunkMovie」,「processID」を定義した．chunkFile プロパティは，PRINTEPS シナリオエディタにおいて当該知識チャンクを構成するプロセス集合とその順序・接続関係，それらのプロセス内で利用されている関連モジュール情報を抽出したファイルの名称を示している．chunkMovie プロパティは，当該知識チャンクに対応するワークフローの部分を実行した様子を切り出した動画ファイルの名称を示している．

ロボットの非専門家である教師がワークフローとテキストによる説明だけでロボットの動きを想定することは困難だと考えられるため，知識チャンクと対応する動画ファイルを関連づけた．また，児童の反応やインタラクションにおける間のとり方など，実際に体験しなければわかりにくい様子を教師が動画から感じてもらうことにより，知識チャンクの再利用を促したいという意図もある．

ワークフローとテキストによる説明のみでロボットの動きを想定することが困難な例の一つとして，ロボットの音声認識が挙げられる．人型ロボットに搭載されているマイクを用いて音声認識を行う場合には，ロボットの目に埋め込まれた LED が光っている間のみ，音声認識を受け付けるなどの制約があ

る．しかし，児童や教師の発話のタイミングによっては，発話途中から音声認識されたり，ノイズを拾ってしまう不具合が発生する．また，音声認識や音声合成に一定時間がかかるため，それらの処理中にロボットがフリーズしたように見えることがある．このようなロボットの挙動は，実際にロボットを動かして挙動を把握するか，過去の教師ロボット連携授業の動画におけるロボットの音声認識の成功と失敗の場面を見なければ，想定することは困難である．さらに，5.3 節のロボットオントロジーにおける「ロボットによる自発的行動の演出」の例で示したように，人型ロボット NAO が授業に関連する動画を自ら再生しているように見せる演出については，開発者や教師が想定していた以上に児童の反応が良かった．しかし，このような児童の反応は，実際に当該場面の動画中で児童が歓声を挙げて喜んでいる様子を見なければ，その効果を実感することは困難だと考えられる．実際に，これまで行ってきた教師ロボット連携授業においても，動画中の児童の反応を参考に，教師がワークフローを作成したことは何度かあった．以上より，知識チャンクと対応する動画ファイルを関連づけて，人とロボットのインタラクションの確認とワークフローの再利用を容易にすることは，教師による知識チャンクの再利用を促す効果が期待できると考えられる．

processID プロパティは，「プロセス」クラスを定義域に持ち，PRINTEPS シナリオエディタにおける当該プロセスの ID を定義するために用いられる．さらに，rdfs:label プロパティを用いて知識チャンクの名称を，rdfs:comment プロパティを用いて知識チャンクの説明文を定義した．

知識チャンクオントロジーにおけるオブジェクトプロパティとして「learningUnit」，「classProcedure」，「robotUsage」，「hasProcess」を定義した．「robotUsage」プロパティの定義域はプロセスクラスであり，それ以外のプロパティの定義域は「知識チャンク」クラスである．learningUnit プロパティは，学習単元クラスを値域に持ち，知識チャンクと対象とする学習単元を関連づけるために用いられる．classProcedure プロパティは，授業の進め方クラスを値域に持ち，知識チャンクと対象とする授業の進め方を関連づけるために用いられる．robotUsage プロパティは，ロボットの使い方クラスを値域に持ち，プロセスと対象とするロボットの使い方を関連づけるために用いられる．hasProcess プロパティは，プロセスクラスを値域にもち，知識チャンクとロボットの使い方に関するプロセスを関連づけるために用いられる．learningUnit と classProcedure プロパティは，応用領域に依存したプロパティであるため，別の応用領域で提案ツールを利用する場合には，応用領域オントロジーに対応するオブジェクトプロパティを定義する必要がある．

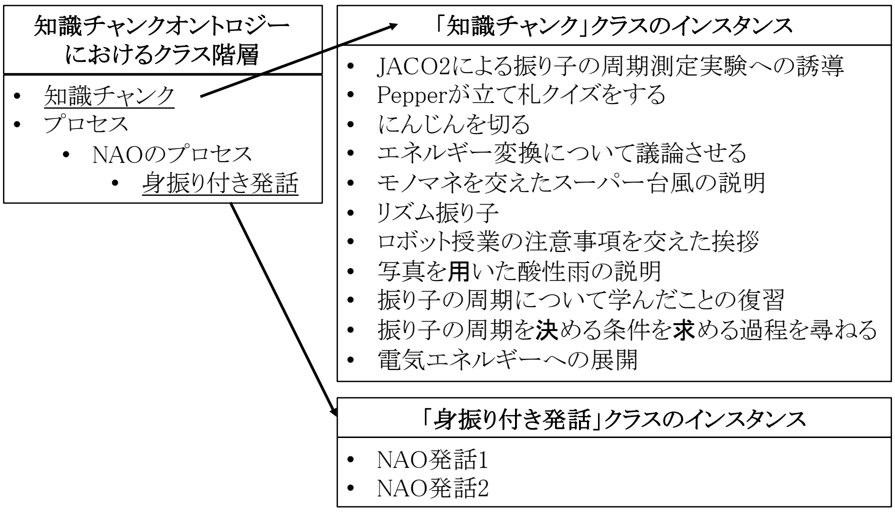


図 6　知識チャンクオントロジーにおける知識チャンククラスとインスタンス

6. 知識チャンクベースに基づくワークフローの検索・再利用方法

6.1. 知識チャンクベース

各種オントロジー（応用領域オントロジー，ロボットオントロジー，知識チャンクオントロジー）に基づいて知識チャンクベースを構築した．図 7 に知識チャンクベースの具体例を示す．図 7 では，知識チャンククラスのインスタンスとして，「RythmPendulum」を定義している．表 1 に「RythmPendulum」における知識チャンクの名称と説明，学習単元，授業の進め方，チャンクファイル名，動画ファイル名，ロボットの使い方に関するプロセスと使い方を示す．

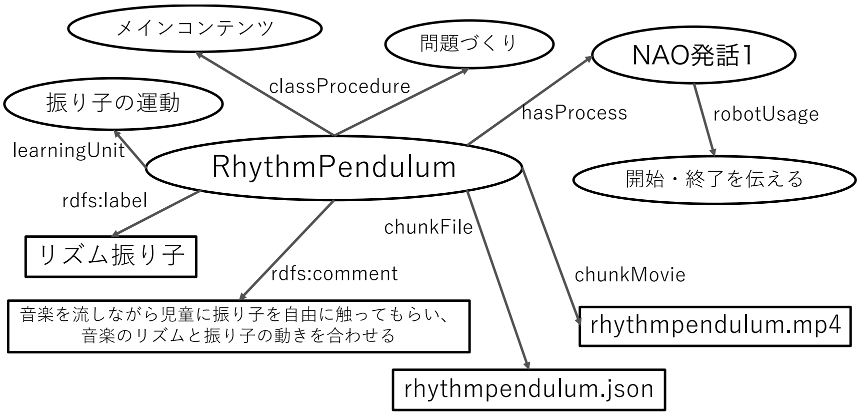


図 7　知識チャンクベースの具体例

表 1　「RythmPendulum」インスタンスのプロパティとプロパティ値

知識チャンク名	リズム振り子
知識チャンクの説明	音楽を流しながら児童に振り子を自由に触ってもらい，音楽のリズムと振り子の動きを合わせる
学習単元	振り子の運動
授業の進め方	メインコンテンツ，問題づくり
チャンクファイル名	rhythmpendulum.json
動画ファイル名	rythmpendulum.mp4
ロボットの使い方に関するプロセス	NAO 発話 1
ロボットの使い方	開始・終了を伝える

6.2. 知識チャンクベースに基づくワークフロー検索

6.2.1 知識チャンクベースの実装

知識チャンクベースは，chunk フォルダ，media フォルダ，owl フォルダ，sparql フォルダ，設定ファイル(config.json)から構成される．chunk フォルダには，PRINTEPS シナリオエディタにおける当該知識チャンクのプロセスの実行順序とそれに関連するモジュール情報を抽出したファイル群が保存され，chunkFile プロパティにより参照される．media フォルダには，知識チャンクに対応する動画ファイル群が保存され，chunkMovie プロパティにより参照される．owl フォルダには，教師知識オントロジーなどの応用領域オントロジー，ロボットオントロジー，知識チャンクオントロジーが保存される．sparql フォルダには，以下で説明する知識チャンクベースを検索するためのクエリファイル群が保存される．設定ファイルには，知識チャンク名，知識チャンクが参照する owl フォルダ内に保存されたオントロジーファイルリスト, 検索条件と対応する sparql フォルダ内に保存されたクエリファイルが記載されている．

6.2.2 知識チャンク検索クエリ

知識チャンク検索クエリのソースコードを図 8 に示す．知識チャンク検索クエリは，ユーザが選択した学習単元，授業の進め方，ロボットの使い方に関するクラスのインスタンスに関連づけられた知識チャンクの名称(?name)，説明(?description)，知識チャンクファイル(?file)，動画ファイルのパス(?movie)のリストを取得する．これらは，6.2.3 項に示す知識チャンク検索画面の検索結果として整形して表示される．図 8 において，「?unitselected」，「?procedureselected」，「?usageselected」には，検索画面上でユーザが選択した学習単元，授業の進め方，ロボットの使い方クラスのインスタンス代入される．

検索画面上の検索条件に対応するプルダウンメニューを選択した時に表示されるリストも，検索クエリとして用意し，初期条件などを設定ファイルに記載する．図 9 に，学習単元の検索項目絞り込みのクエリを示す．このクエリでは，「?selected」に代入されたクラスのサブクラスのリストが取得できる．設

定ファイルには，初期条件として，教材オントロジーのルートクラスが設定されているため，最初はルートクラス直下のサブクラスが表示される．検索クエリを書き換えることにより，検索画面上に表示される検索項目を変更することが可能である．

```
SELECT DISTINCT ?s ?name ?description ?file ?movie
WHERE {
    ?s rdfs:label ?name ;
       rdfs:comment ?description ;
       ec:chunkFile ?file ;
       ec:chunkMovie ?movie ;
       ec:hasProcess ?process .
    {
        ?s ec:learningUnit ?unit .
        ?unit rdf:type ?unitselected .
    } UNION {
        ?s ec:learningUnit ?unitselected .
    }
    {
        ?s ec:classProcedure ?procedure .
        ?procedure rdf:type ?procedureselected .
    } UNION {
        ?s ec:classProcedure ?procedureselected .
    }
    {
        ?process ec:robotUsage ?usage .
        ?usage rdf:type ?usageselected .
    } UNION {
        ?process ec:robotUsage ?usageselected .
    }
}
```

図 8　知識チャンク検索クエリのソースコード

```
SELECT ?s ?label
WHERE {
    ?s rdfs:label ?label .
    {
        ?s rdf:type ?selected .
        FILTER NOT EXISTS {
            ?subclass rdfs:subClassOf ?selected .
            ?s rdf:type ?subclass .
        }
    } UNION {
        ?s rdfs:subClassOf ?selected .
    }
}
```

図 9　学習単元の検索項目絞り込みのクエリ

6.2.3 知識チャンク検索画面

図 10 に知識チャンク検索画面を示す．知識チャンク検索画面は PRINTEPS シナリオエディタ上から呼び出すことができる．図 10 における「種類」プルダウンメニューでは，知識チャンクベースの種類を選択する．選択された知識チャンクベースの設定ファイルが読み込まれ，検索条件として設定した項目が検索画面上に表示される（図 10 における「学習単元」，「授業の進め方」，「ロボットの使い方」）．各検索条件の最初のプルダウンメニューでは，検索条件に対応するオントロジーのルートクラス直下のサブクラスが選択できる．例えば，学習単元検索条件では，理科の学習単元など，各教科の学習単元クラスを選択できる．最初のプルダウンメニューを選択すると，選択したクラスのサブクラスのリストが

2 番目のプルダウンメニューから選択できる．リーフクラスに到達した場合には，選択したクラスのインスタンスのリストが最後のプルダウンメニューに表示される．

検索ボタンを押下すると検索結果が表示され，各検索結果から動画を再生して知識チャンクの内容を確認し，挿入ボタンから現在作成中のシナリオエディタ上に知識チャンクに対応するワークフローが挿入できる．なお，リーフクラスやインスタンスではない中間クラスを指定した場合には，指定したクラスとそのサブクラスの全インスタンスが検索対象となる．

図 10　知識チャンク検索画面

6.2.4 知識チャンクの挿入と編集

図 10 の知識チャンク検索画面において，「リズム振り子」知識チャンクの「挿入」ボタンを選択すると，シナリオエディタ上に，図 11 に示す「リズム振り子」知識チャンクに対応するワークフローが挿入される．シナリオエディタには，ワークフロー全体または一部分を JSON 形式でインポートおよびエクスポートする機能がある．「リズム振り子」知識チャンクでは，図 7 に示したように chunkFile プロパティにより「rhythmpendulum.json」ファイルが関連づけられている．この JSON ファイルは，「振り子の運動」に関する教師ロボット連携授業のワークフローから「リズム振り子」に関連するワークフローの一部分をエクスポートしたファイルである．このように，あらかじめ再利用したいワークフローの一部分を JSON ファイルとしてエクスポートして知識チャンクと関連づけることにより，シナリオエディタ上に知識チャンクを挿入し，再利用することが可能となる．

挿入された知識チャンクは，シナリオエディタ上で編集が可能となるため，例えば，図 11 のワークフローにおいて，NAO が音楽を再生する際の発話内容を修正したり，再生する音楽のファイルを変更することなどが可能となる．また，シナリオエディタ上には，図 12 に示すように，あらかじめ登録されたプロセスやモジュールのリストが表示されている．これらのプロセスやモジュールを個別にシナリオエディタ上に挿入し，ワークフローを再構造化することも可能である．

ケーススタディにおいて教師が「リズム振り子」知識チャンクのワークフローをどのように編集したかは，7.5.1 項で述べる．

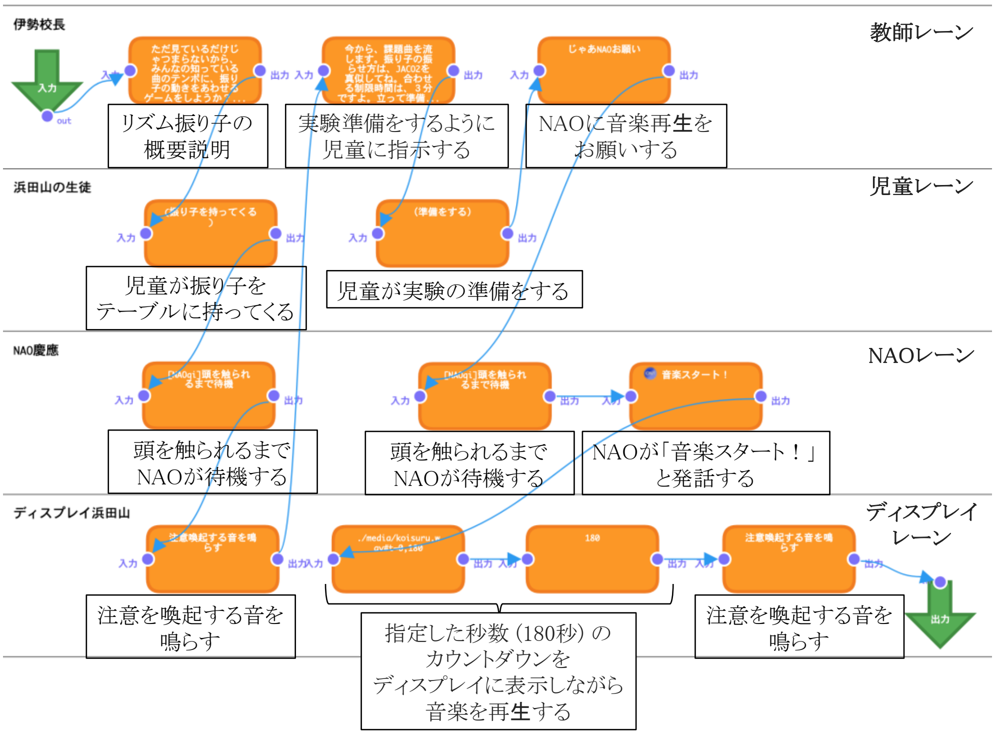


図 11　「リズム振り子」知識チャンクを挿入した PRINTEPS シナリオエディタのスクリーンショット

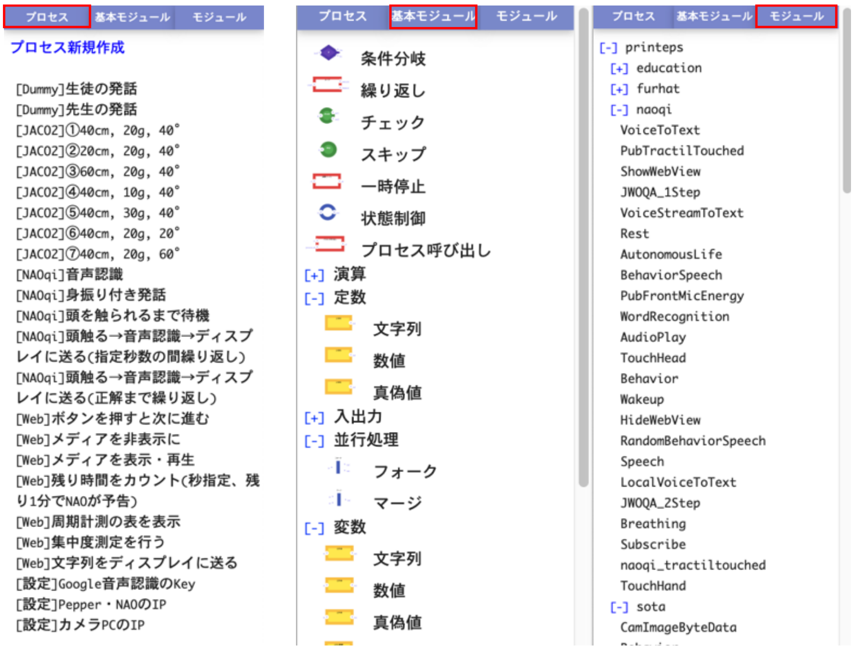


図 12　シナリオエディタにおけるプロセスおよびモジュールリストの例
(左：プロセスリスト，中央：基本モジュールリスト，右：モジュールリスト)

7.　ケーススタディ

7.1.　概要

提案ツールの有用性を評価するために，東京都杉並区立浜田山小学校の第 5 学年 1 組と 4 組の担任教師 2 名にご協力いただき，提案ツールを用いて教師ロボット連携授業を行なった．２名の教師は，プログラミング経験およびロボットアプリケーション開発経験はなく，本ケーススタディにおいて初めて教師ロボット連携授業を行なった．

授業の内容は，両クラス共に理科の学習単元「振り子の運動」の導入である．いずれのクラスの授業

も，振り子の長さ・おもりの重さ・振れ幅といった条件を変えながら振り子を揺らしてみる実験を通して「ふりこの 1 往復にかかる時間は何によってきまるのだろうか」という学習問題の設定を行うことを授業終了時における到達目標としている．授業へのロボット活用方法については，各教師に委ねられているため授業内容は異なる．

教師ロボット連携授業を行うために，提案ツールを用いて教師ロボット連携授業システムを開発した．開発したシステムを用いて，各クラスにおいて各教師が 1 回ずつ教師ロボット連携授業を行なった．

本研究が対象とする教師ロボット連携授業は世の中にまだ普及していない新規のサービスであり，ロボットを用いていることもあり，1 回あたりの実験コストは非常に大きい．また，授業を担当可能な教師や小学校における授業計画の制約などもあり，著者らの研究グループでは，年に 2-3 回程度しか，教師ロボット連携授業の実践を行うことはできない．さらに，不公平にならないように，あるクラスで教師ロボット連携授業を，別のクラスで通常のロボットを用いない授業を実施し，その差異を比較することもできない．以上より，通常の情報システムやサービスのように，多くのユーザに構築したアプリケーションを定量的に評価してもらうことは困難である．そこで，本研究では，ユーザの実環境においてその現状やユーザの生活，行動等を観察し，必要に応じてユーザに質問することにより，ユーザの利用経験を把握する調査法である「ビジネスエスノグラフィ」[7]的なアプローチにより，提案ツールおよびシステムを評価する．具体的には，提案ツールを評価するために，著者らは小学校の教師が提案ツールを利用する様子を観察し，インタビューにより，その利点や欠点などを考察した．また，著者らは教師ロボット連携授業の様子を観察し，授業を受けた児童にアンケートを行い，提案システムの有用性や教育的効果を考察した．

7.2. 知識チャンクベースの構築

本ケーススタディを実施するために，我々がこれまで実施してきた教師ロボット連携授業（表 2）を基に，知識チャンクベースを構築した．その際，各知識チャンクに異なるロボットの活用方法が含まれることを考慮して，11 個の知識チャンクを抽出した（図 6 における「知識チャンク」クラスのインスタンス）．知識チャンクに対応する動画は，1 本あたり 1 分から 1 分 30 秒に収まるように，児童への知識伝達のみを行っている発言や作業のみを行っている部分は除去し，必要に応じて注釈を入れる編集を施した．これにより，教師が知識チャンクの内容理解に時間を要さないようにすることと，知識チャンク全体の流れを短時間で追えるようにすることを試みた．

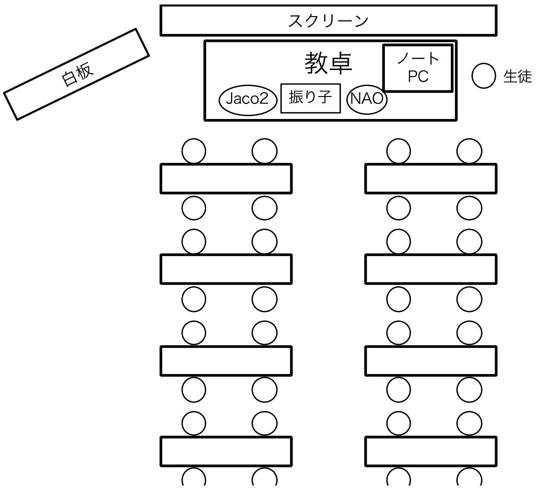
表 2　これまで実施してきた教師ロボット連携授業

実施年月	小学校名	学年	教科	学習単元
2015 年 1 月	横須賀市立鶴久保小学校	5 年	社会	地球温暖化
2016 年 1 月	慶應義塾幼稚舎	6 年	理科	てこの規則性
2016 年 12 月	慶應義塾幼稚舎	6 年	理科	人の体のつくりと働き
2017 年 7 月	開智望小学校	4 年	探求[6]	エネルギーの仕組み
2017 年 9 月	杉並区立浜田山小学校	5 年	社会	自然の未来
2018 年 1 月	開智望小学校 杉並区立浜田山小学校	5 年	理科	振り子の運動[7] （単元導入・まとめ）

7.3. 授業環境

図 13 にケーススタディにおける授業環境と授業の様子を示す．授業前日にロボットや机を設置し，教師が授業のリハーサルを行うために，教室の空き状況などを考慮して，今回は視聴覚室で教師ロボット連携授業を行なった．また，各班において振り子を揺らす実験を児童が行いやすいように，8 台の机を 4 人の児童が囲むように配置した．

[6] 「総合的な学習の時間」の中で行う授業
[7] 開智望小学校と杉並区立浜田山小学校のそれぞれにおいて，振り子の運動の単元導入とまとめに関する教師ロボット連携授業を 2 回ずつ行った．



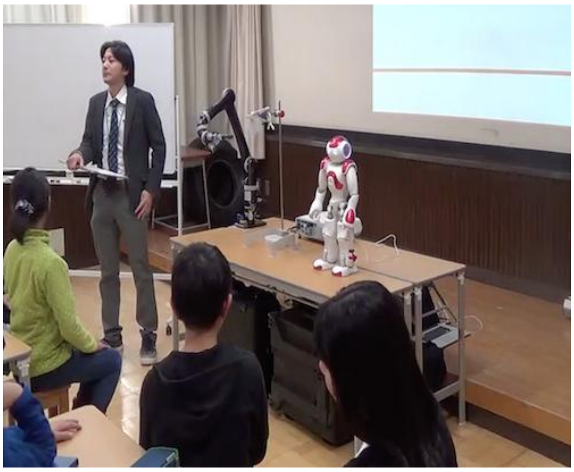


図 13 ケーススタディにおける授業環境と授業の様子

7.4. 教師ロボット連携授業用ワークフローの作成

教師ロボット連携授業用ワークフローを教師自身に構築してもらうために，2018 年 10 月から 12 月にかけて，2 から 3 週間に 1 回程度，約 40 分の PRINTEPS シナリオエディタ勉強会を浜田山小学校において 2 名の教師を対象に行った．教師が PRINTEPS シナリオエディタの操作方法を学んだ後，2019 年 1 月より教師ロボット連携授業のワークフローを教師が作成した．ワークフロー作成と教師ロボット連携授業のスケジュールを表 3 に示す．

ワークフロー作成の 1 回目は，知識チャンク検索機能を用いずに授業全体の流れのみを従来のシナリオエディタを用いて作成した．2 回目は，知識チャンク検索機能を用いてロボットの活用方法などを参照しながら，詳細なワークフローの作成を行った．また，2 回目のワークフロー作成と同日の 2019 年 1 月 17 日には，児童のロボットに対する障壁を取り払い，音声認識や顔画像からの年齢推定などのロボットの機能を知ってもらうことを目的として，NAO を用いた顔合わせ授業を行なった．3 回目は，教師ロボット連携授業の前日にリハーサルを通して最終的な調整を行った．なお，ワークフロー作成時間は，1 回あたり 2 から 3 時間程度であった．

表 3 ワークフロー作成と教師ロボット連携授業のスケジュール

日付	クラス	詳細
2019 年 1 月 10 日	1 組・4 組	ワークフロー作成 1 回目
2019 年 1 月 17 日	1 組・4 組	ワークフロー作成 2 回目，顔合わせ授業
2019 年 1 月 23 日	1 組	ワークフロー作成 3 回目とリハーサル
2019 年 1 月 24 日	1 組	教師ロボット連携授業 1 回目
2019 年 1 月 25 日	4 組	ワークフロー作成 3 回目とリハーサル
2019 年 1 月 26 日	4 組	教師ロボット連携授業 2 回目

7.5. 知識チャンクの再利用に関する結果

ケーススタディにおいて，提案ツールを用いて，教材およびロボットの使い方の観点から，教師により検索された知識チャンクは以下の通りである．

7.5.1 教材の観点から検索された知識チャンク

知識チャンク「ロボット授業の注意事項を交えた挨拶」

本知識チャンクは，NAO が振り子の運動の学習単元の授業を始める際に，教師ロボット連携授業特有の注意事項に関する説明と授業導入の挨拶をする知識チャンクである．本知識チャンクは両方のクラスで採用された．1 組のワークフローでは，本知識チャンクにおけるクラス名の変更など，軽微な変更のみを行い再利用した．しかしながら，4 組のワークフローでは，本知識チャンクは NAO から児童へ

一方的に注意事項を伝達していた点を変更し，児童と NAO のインタラクションを発生させるワークフローが追加された．

知識チャンク「リズム振り子」

リズム振り子とは，一定の制限時間内で流されている音楽のテンポに振り子の動きを合わせることにより，周期の変化に関する問題意識を児童に持たせる授業方法である．この授業方法は，浜田山小学校において振り子の運動の学習単元における導入を行うときの定番の手法として用いられており，本知識チャンクはリズム振り子における開始と終了の合図や音楽の再生を NAO に行わせたものである．本知識チャンクは両方のクラスで再利用された．1 組のワークフローでは，児童が流してほしい曲を NAO に対して音声認識でお願いしてもらうも，NAO がそういう気分ではないと言って断り，NAO が流したい曲を言って児童らに了解をもらうやりとりが追加された．4 組のワークフローでは，教師がリズム振り子の説明を開始する前に，話を聞く体制になるのがいつも遅い児童に対して，NAO が直接声を掛けるやりとりが追加された．さらに，両クラス共に，テンポが異なる別の曲を用いて，再度リズム振り子を行うワークフローが追加された．

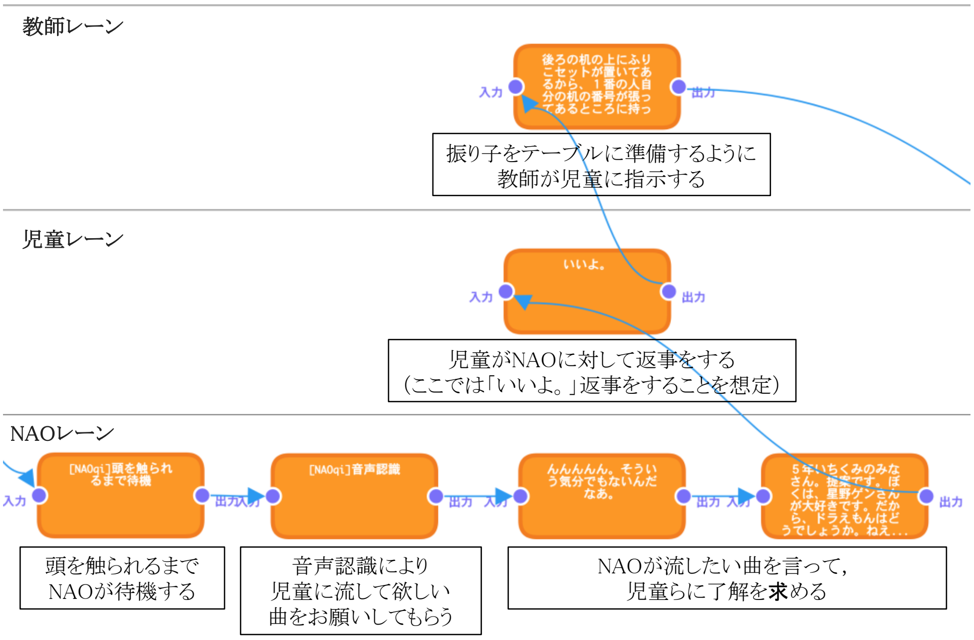


図 14　1 組の教師が編集した「リズム振り子」知識チャンクのワークフローの一部

図 14 に 1 組の教師が編集した「リズム振り子」知識チャンクのワークフローの一部を示す．図 11 に示した編集前の「リズム振り子」知識チャンクのワークフローでは，再生する曲はあらかじめ決まっており，教師がリズム振り子の概要説明を行なった後に，すぐに児童は振り子を各テーブルに持ってきている．図 14 に示すワークフローでは，最初に児童が流して欲しい曲を音声認識でお願いしたり，NAO が自身で流したい曲を提案するなど，ロボットと児童のインタラクションが追加されている．

7.5.2 ロボットの使い方の観点から検索された知識チャンク

知識チャンク「Pepper が立て札クイズをする」

本知識チャンクは，学習単元「人の体のつくりと働き」において，Pepper が学習内容を確認する 3 択クイズを班対抗で行うものである．本知識チャンクに含まれるロボットの活用方法の一つに，Pepper が筋肉の説明をした後に，「先生もやせればシックスパックだから自信を持ってね」という発言をすることにより児童の笑いを誘う場面があった．1 組では，顔合わせ授業において NAO による年齢当てを行った際に，教師が実年齢よりも古く判定されたことを利用し，「先生，古いなあ」という発言を随所にちりばめるというワークフローが追加された．

知識チャンク「にんじんを切る」

本知識チャンクは，学習単元「てこの規則性」の導入場面のものである．重心の位置に糸をくくりつ

けて左右がつりあった人参を示し，児童に糸の左右(長い方と短い方)でどちらが重いか，あるいは同じ重さかを問うと，児童は同じ重さだと答えるが，NAO はそれを聞き，「短い方が重いと思う」と答える．その後ロボットアームの Jaco2 が切断した人参をはかりに載せて短いほうが重いと確かめられると，「ほら，僕の言う通りだったでしょ」と児童を煽り関心を持たせるという流れである．本知識チャンクのロボット活用は採用されるには至らなかったが，この知識チャンクを参照した 1 組の担任の教師からは，「本知識チャンクでは，児童に間違えさせるように誘導した結果としてロボットが児童を煽るという形でのインタラクションが発生しているが，逆にロボットに間違いをさせることにより児童の反面教師的な使い方ができるのではないか．なぜなら，間違うことを嫌がったり恥ずかしがったりする児童も中には存在し，そのような児童を間違えさせるように誘導するのは好ましくないからである．しかもロボットには不確実な誘導ではなく，意図的な間違いを確実にさせることができる．」という意見を頂いた．4 組でもこの知識チャンクは参照されたものの，採用には至らなかった．

7.6. 教師によるアンケート結果と考察

提案ツールにおける知識チャンク再利用とユーザインタフェースの有用性を評価するために，提案ツールを利用し，教師ロボット連携授業を行なった教師２名に，インタビューによるアンケートを行った．質問事項は，「1. ロボット活用の難しさ解消への提案ツールの有用性は？」，「2. 検索結果の表示項目（知識チャンク名・説明・動画）に関する利点や欠点は？」，「3. 知識チャンクを検索・修正して再利用することの利点や欠点は？」の主に 3 つである．

1 については，「ロボットを初めて触る人が陥りがちな典型的な失敗事例を事前に知ることができ，授業設計に役立てることができた」，「知識チャンク検索機能を使うタイミングについて検討の余地がある」などのコメントをいただいた．今回のケーススタディのワークフロー設計については，教師の業務の都合上，PRINTEPS シナリオエディタを利用する前に，教師に授業全体の流れを考えてもらった．そのため，教材と授業進行に関する知識を参照する必要性があまりなく，ロボットの使い方に関する知識チャンクの検索と再利用の機能が主に利用されていた．以上より，教師は知識チャンク検索機能を利用するタイミングがわかりづらかったのではないかと考えられる．各知識チャンクをワークフロー作成のどの場面で活用すべきかを明確にする必要がある．

2 については，「カテゴリの絞り込み・組み合わせによって探したい授業場面を見つけられるのは便利であると思った」，「関連項目毎にまとめられていたのが使いやすかったが，さらに細分化する余地がありそう」などのコメントをいただいた．今回，教材，授業の進め方，ロボットの使い方という 3 種類の知識チャンクを同等に検索できるようにしていた．今回ケーススタディに参加した教師は中堅であり，教材や授業の進め方については知識が十分あった．「関連項目毎にまとめられていたのが使いやすかったが，さらに細分化する余地がありそう」というコメントがあったことから，教師の知識レベルに応じて，知識チャンクの検索項目の詳細度，優先順位，構成を動的に変更することも必要だと考えられる．

3 については，「同じような失敗を繰り返さないで済むという利点がある一方，頼りすぎると創造性が阻害されたり，硬直化した授業づくりになったりしないか」などのコメントをいただいた．この点については，現状では知識チャンクが 11 個と少ないことも原因の一つと考えられる．今後，知識チャンクが数多く蓄積されていけば，その組み合わせ方や修正の仕方は増えていき，教師が創造性を発揮できる場面は増えていくと考えられる．

7.7. 児童によるアンケート結果と考察

教師ロボット連携授業に参加した児童に対して，授業が楽しかった理由とその場面，先生とロボットの掛け合い，児童とロボットのコミュニケーションについて，自由記述形式でアンケートを行った．1 組の児童 26 名と 4 組の児童 29 名からアンケートを回収することができた．

授業が楽しかった理由とその場面については，「NAO が他の機材に指示を出した（11 名回答）」，「ロボットが授業を進めてくれた（8 名回答）」，「ロボットにできることを知れた（8 名回答）」などの回答があった．「NAO が他の機材に指示を出した」という回答は，授業中に NAO が画像をスクリーン上に表示したり，音楽を再生することを意味している．ロボットが自発的に動画を再生する場面については，他の小学校における実践でも今回と同様に児童からの評価が高かった．普段見る機会が少ない人型ロボットの動作を間近に見ることができ，自発的に動いている様子に驚きや感動を覚えた児童たちの感想が，授業が楽しかった理由の回答として表現されたと推察される．

先生とロボットとの掛け合いについては，「本当に人間のように会話していた（12 名回答）」，「先生をいじるくだりが印象に残った（6 名回答）」などの回答があった．「本当に人間のように会話していた」

と児童らが感じた点については，教師らが事前にシナリオを入念に考え，リハーサルを行ったことが原因と考えられる．また，先生をいじるくだりについては，7.5.2 節で述べたように，1 組の顔合わせ授業において NAO による年齢当てを行った際に，教師が実年齢よりも古く判定されたことを利用し，「先生，古いなあ」という発言をワークフローの随所に追加した点が，教師が想定した通り有効に機能したと考えられる．

児童とロボットとのコミュニケーションについては，「音声認識の精度が悪い（15 名回答）」，「自由度の高い質問・会話がしたい（12 名回答）」などの回答があった．今回の教師ロボット連携授業では，授業の一場面において教師が児童を指名して，NAO の質問に回答させるという児童とロボットのコミュニケーションが中心であった．その際に，音声認識が失敗する場面が多くあったことが「音声認識の精度が悪い」という回答につながったと考えられる．また，児童から NAO に自由に質問を投げかけて，NAO が回答する場面がなかったことが，「自由度の高い質問・会話がしたい」という回答につながったと考えられる．

今回は NAO に内蔵されているマイクと Google 音声認識 API を利用して音声認識を行なっていたが，今後は，より高性能なマイクを利用するなど，音声認識精度を改善する必要がある．また，シナリオエディタのみの利用では，ワークフローから外れたコミュニケーションを児童と行うことはできないため，汎用オントロジー，ルールベース，音声対話システムなどの仕組みを取り入れて，より自由度の高い質問応答や会話をできるように PRINTEPS を拡張する必要がある．

7.8. 教師ロボット連携授業と教育効果に関する考察

本節では，教師ロボット連携授業による教育効果について考察する．表 2 に示したように，著者らはこれまで主に理科と社会の学習単元を対象に，複数の小学校で教師ロボット連携授業を実践してきた．いずれの実践においても，児童と教師へのアンケート結果より，ロボットを用いない通常の授業と比べて，児童の興味関心が高いという結果が得られている．また，いくつかの実践中に，教師から児童に対して授業内容を確認する質問をしたところ，通常の授業よりも積極的に手を挙げて回答しようとする児童が多くいたことが確認できている．このことから，授業にロボットを導入することにより，児童の自発性を促すという一定の教育効果が得られていると考えられる[2][13].

一方，教師ロボット連携授業の準備コストは大きく，小学校の教師は多忙であることもあり，長期的に教師ロボット連携授業を実施することはできていない．そのため，長期的に教師ロボット連携授業を実施した際の教育効果については不明である．[4]では，理科室に合計 5 週間ロボットを設置し，理科授業の前後における休憩時間に，子どもたちとの自由対話を行い，理解度向上を評価したが，ロボットの存在そのものは子どもたち全員の理解度向上には有意に影響を及ぼさなかったという結果が出ている．本研究で提案した知識チャンク再利用支援ツールにより，様々な学習単元における知識チャンクが蓄積・共有されていけば，教師ロボット連携授業の準備コストは下がっていくと考えられる．これにより，長期的に教師ロボット連携授業の実践を行うことができれば，その教育効果も今後評価していくことができると考えられる．

本研究では，知識チャンクの再利用に着目して実践を行なったため，複数センサーは用いなかったが，他の実践では，各グループにカメラや小型ロボットを設置して児童の集中度を測定したり，各グループで行なった授業内容に関するクイズの回答や理科実験の進捗状況を教師に提示するという試みも行なっている[26][24]．これにより，一人では把握が難しい，グループごとの理解度や進捗状況を教師は一覧できた．

さらに，著者らが研究開発を進めている PRINTEPS はエンドユーザ向けの開発ツールであり，今後，本研究で提案した知識チャンクが蓄積されていくことにより，多くの小学校に教師ロボット連携授業を展開していける可能性がある．これにより，量的な教育効果も期待できる．

8. まとめ

PRINTEPS におけるワークフローの作成と再利用に関する問題を解決するために，本研究では異種オントロジーに基づく知識チャンク再利用支援ツールを提案した．本研究では，人工知能の知識工学の研究分野における「知識」[10]と G.A.Miller が提唱した「意味のある情報のまとまり」表す概念である「チャンク」[23]を組み合わせて，「複数種類の知識表現のまとまり」を「知識チャンク」と定義した．提案ツールは，事例ベース推論の枠組みを用いて，応用領域知識とロボット活用の観点から再利用可能なワークフローの部分を異種オントロジーに基づいて事例（知識チャンク）として蓄積し，知識チャンクの検索および再利用を支援する．

複数の小学校で行ってきた教師ロボット連携授業のワークフローを元に，教師知識（教材と授業進行），ロボット，知識チャンクに関するオントロジーを構築し，各種オントロジーに基づいて知識チャンクベースを構築した．提案ツールを公立小学校の教師 2 名に利用していただき，理科の学習単元「振り子の運動」について，教師ロボット連携授業のワークフローを作成してもらった．作成したワークフローを元に，2 クラス合計 2 回の授業を行った．教師と児童に対するアンケートより，知識チャンク検索・再利用機能と教師ロボット連携授業システムの評価を行ない，その有用性を確認した．

今後の課題として，知識チャンク検索機能をワークフロー作成におけるどの時点で利用することが適切かを検討し，ユーザに知識チャンク検索を行うタイミングを教示することが必要だと考えられる．教師の知識レベルに応じて，知識チャンクの検索項目の詳細度，優先順位，構成を動的に変更可能にすることも必要だと考えられる．さらに，音声認識精度の改善や汎用オントロジー，ルールベース，音声対話システムなどの仕組みを取り入れて，より自由度の高い質問応答や会話ができるように PRINTEPS を拡張することも今後の課題である．

本研究で行なった教師ロボット連携授業では，人型ロボット NAO とアーム型ロボット Jaco2 の 2 台を連携させており，1 台のロボットを利用した授業に比べて，ワークフロー作成の難易度は高いと考えられる．そのため，提案ツールを用いて，既存のワークフローを再利用しながら，1 台のロボットを利用した教師ロボット連携授業のワークフローを構築することはより容易にできると考えられる．今後は，様々な小学校において PRINTEPS を利用した実践を行い，知識チャンクベースを充実させ，教育分野へのサービスロボットの普及を目指していきたい．

謝辞

ケーススタディにご協力いただいた，東京都杉並区立浜田山小学校の伊勢明子校長，森賀慎一副校長，ICT 推進担当の上原達朗主任教諭，授業立案・実践を担当いただいた第 5 学年クラス担任の幸阪創平主任教諭と鈴木渓教諭に感謝する．PRINTEPS の実装に協力いただいたノースグリッド社に感謝する．

本研究は，科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業(CREST)「実践知能アプリケーション構築フレームワーク PRINTEPS の開発と社会実践」(JPMJCR14E3)の支援によって実施した．

参考文献

[1] 岡田 慧, “ROS（ロボット･オペレーティング･システム）”，日本ロボット学会誌，Vol. 30, No. 9, 2012, pp 830-835.
[2] 小野 宙生，森田 武史，山口 高平,” 小学校のグループ学習に参加する議論支援ロボットの構成”，第 14 回情報システム学会全国大会・研究発表大会， S1-A.4, 2018.
[3] 小林 重信, "事例ベース推論の現状と展望", 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 4, 1992, pp.559-566.
[4] 小松原 剛志, 塩見 昌裕, 神田 崇行, 石黒 浩, 萩田 紀博, " 理科室で授業の理解を支援するロボットシステム", 日本ロボット学会誌,Vol.33, No.10, 2015, pp.789-799.
[5] 武田 英明， "知識表現基礎"， 人工知能学大事典 第 5 章 知識表現・論理・推論，5-2, 人工知能学会（編集），共立出版, 2017, pp.229-230.
[6] 仲谷 善雄, "事例ベース推論の動向", 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 1, 2002, pp.28-33.
[7] 橋爪 絢子, "質的調査によるユーザエクスペリエンスの把握と人工物の開発 -人間中心設計におけるビジネスエスノグラフィ-", 感性工学 11(2), 2012, 109-113.
[8] 林 雄介，Jacqueline Bourdeau，溝口 理一郎, "理論の組織化とその利用への内容指向アプローチ −オントロジー工学による学習・教授理論の組織化と Theory-aware オーサリングシステムの実現−"，人工知能学会論文誌，Vol. 24, No. 5 2009, pp.351-375.
[9] 林 雄介，溝口 理一郎, “実践的教授知識の再利用による授業デザイン”，人工知能学会全国大会 (第 28 回) 論文集，2014, 4D1-1.
[10]堀 浩一, "知識の姿 − 人工知能研究者の立場から", 現代思想, Vol.19, No.6, 1991, pp.142-149.
[11]溝口 理一郎， "知識工学の誕生とエキスパートシステム"， 人工知能学大事典 第 18 章 知識工学とセマンティックテクノロジー, 18-2, 人工知能学会（編集），共立出版, 2017, pp.1255-1256.
[12]山口 高平，森田 武史，“統合知能アプリケーション開発プラットフォーム PRINTEPS”，人工知能, Vol.32, No.5, 2017, pp.721-729.
[13]読売教育ネットワーク 会報 49 号 2019 年 1 月号.
[14]賴光 正典, 松田 憲幸, 瀧 寛和, 安部 憲広, "ロボット行動学習への事例ベースの適用", 情報処理学会研究報告 知能と複雑系（ICS）, Vol. 2000, No. 66, 2000, pp.85-90.

[15]S. Alexandrova, Z. Tatlock and M. Cakmak, "RoboFlow: A flow-based visual programming language for mobile manipulation tasks," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Seattle, WA, 2015, pp. 5537-5544.
[16]Amailef, Khaled & Lu, Jie., "Ontology-supported case-based reasoning approach for intelligent m-Government emergency response services", Decision Support Systems. 55., 2013, pp.79–97.
[17]M. Beetz, D. Beßler, A. Haidu, M. Pomarlan, A. K. Bozcuoğlu and G. Bartels, "Know Rob 2.0 — A 2nd Generation Knowledge Processing Framework for Cognition-Enabled Robotic Agents," *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, QLD, 2018, pp. 512-519.
[18]Choi, D., Ha, J., Jung, M., Park, W., and Park, H., "Development of Robot Scenario Script Language and Tool for Non-Expert", Jounal of Automation and Control Engineering, 3(6), 2015, pp.498–502.
[19]C. Datta, C. Jayawardena, I. H. Kuo and B. A. MacDonald, "RoboStudio: A visual programming environment for rapid authoring and customization of complex services on a personal service robot," 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, 2012, pp. 2352-2357.
[20]Maya Escueta, Vincent Quan, Andre Joshua Nickow, and Philip Oreopoulos, "Education Technology: An Evidence-Based Review", National Bureau of Economic Research Working Paper, No. 23744, 2017.
[21]Huang, J. and Cakmak, M., "Code3: A system for end-to-end programming of mobile manipulator robots for novices and experts", In 2017 12th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), 2017, pp.453–462.
[22]Lee, D., Jang, S., and Cho, H., "Mocca studio: a graphical tool for high-level programming of human-robot social interaction", In 2019 14th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction(HRI), 2019, pp. 620–621.
[23]George Armitage Miller, “The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information”, Psychological Review, Vol. 63, No. 2, 1956, 81-97.
[24]Takeshi Morita, Shunsuke Akashiba, Chihiro Nishimoto, Naoya Takahashi, Reiji Kukihara, Misae Kuwayama, Takahira Yamaguchi, “A Practical Teacher-Robot Collaboration Lesson Application Based on PRINTEPS”, The Review of Socionetwork Strategies, Springer, Vol. 12, Issue 1, 2018, pp 97–126.
[25]Tenorth, Moritz, and Michael Beetz. “KnowRob: A Knowledge Processing Infrastructure for Cognition-Enabled Robots.” The International Journal of Robotics Research, vol. 32, no. 5, Apr. 2013, pp. 566–590, doi:10.1177/0278364913481635.
[26]Chihiro Nishimoto, Shunsuke Akashiba, Takeshi Morita, and Takahira Yamaguchi, “Teaching Assistant Robot Development by PRINTEPS”, Workshop on Robots for Learning (R4L), 2017.
[27]E. Pot, J. Monceaux, R. Gelin and B. Maisonnier, "Choregraphe: a graphical tool for humanoid robot programming," RO-MAN 2009 - The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Toyama, 2009, pp. 46-51.

著者略歴

森田 武史（もりた たけし）

2003 年静岡大学情報学部情報科学科卒業．2005 年同大学院情報学研究科修士課程修了．2007 年日本学術振興会特別研究員(DC2)．2008 年慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程修了．同年日本学術振興会特別研究員(PD)．2009 年慶應義塾大学大学院理工学研究科特別研究助教．2011 年青山学院大学社会情報学部助手．2014 年同助教．2015 年慶應義塾大学理工学管理工学科専任講師（有期）．2019 年同准教授（有期）．現在に至る．博士（工学）．セマンティック Web とオントロジーに関する研究に従事．人工知能学会，情報システム学会，電子情報通信学会，日本データベース学会の各会員．

高橋 尚也（たかはし なおや）

2017 年慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業．2019 年同大学院理工学研究科修士課程修了．現在に至る．

小須田 瑞季（こすだ みずき）

2019 年慶應義塾大学理工学部管理工学科卒業．現在に至る．

山口 高平（やまぐち たかひら）

1979 年大阪大学工学部通信工学科卒業．1984 年同大学院工学研究科博士後期課程修了．同年，大阪大学産業科学研究所助手．1989 年静岡大学工学部助教授．1997 年同大学情報学部教授．2004 年より慶應義塾大学理工学部教授．現在に至る．工学博士．定理証明，知識システム，データマイニング，セマンティック Web，オントロジー，知能ロボット工学に関する研究に従事．2007 年大川出版賞，2015 年人工知能学会功績賞，人工知能学会元会長・現顧問，情報システム学会会長．著書『データマイニングの基礎』『人工知能とは』など．人工知能学会，情報システム学会，電子情報通信学会，情報処理学会，AAAI，IEEE-CS 等の会員．