

# 算数文章題を対象とした作問学習支援システム「モンサク ン」における個々の作問課題の分析を目的とした作問プロセ スシミュレータの設計・開発

Design and Development of Problem-Posing Simulate in order to Analyze  
Problem-Posing Assignment in MONSAKUN that is Problem-Posing Exercise  
System for Arithmetic Word Problems

岩井健吾 林雄介 平嶋宗

Kengo IWAI, Yusuke HAYASHI, and Tsukasa HIRASHIMA

広島大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Hiroshima University

**Abstract:** In MONSAKUN that is a problem-posing exercise system for arithmetic word problems, a problem-posing assignment is formalized as a constraint satisfaction problem. Because the constraints included in the problem-posing assignment are the constraints for establishing an arithmetic word problem, the assignment requires a learner to think about the constraints of the arithmetic word problem. The learning effect of the problem-posing exercise has been confirmed. However, the constraints of each problem-posing assignment have not be able to analyze automatically yet. In this paper, a problem-posing simulate that enable to automatically analyze of constraints included in a problem-posing assignment is introduced.

## 1 はじめに

学習対象の理解には、手続きとして対象を理解する道具的理解と対象を概念及び概念間の関係として理解する関係的理解があるとされている[1]. 道具的理解は、その手続きの成立理由が含まれていないため、応用性に乏しいとされる。一方で、関係的理解はその手続きが妥当である理由も含めての理解であるため応用性があるとされている。したがって、より高度な理解としての関係的理解の促進を行うことは学習において重要であるといえる。

この関係的理解を促進するアプローチの一つとしてオープン情報構造アプローチが提唱されている[2,3,4]. このアプローチは、(1) 特定の学習課題に特化した情報構造の分析を行い、(2) その情報構造を構成要素または構成要素間の関係を表現する部品に分解し、(3) 予め学習者にその部品群を与える形で部品を組立させ、元の情報構造を再構築させる学習活動が可能な学習支援システムの設計・開発を行うものである。このアプローチの妥当性は、いくつかの先行研究の事例が示唆している。したがって、関係的理解を促進するために有効な学習支援の方法

の一つであると考えられる。

このオープン情報構造アプローチを適用した具体的な事例として、算数文章題を対象とした作問学習支援システム「モンサクン」が設計・開発されている[5,6]. このモンサクンにおける作問は、制約充足課題（制約充足問題を学習者に演習させる課題）として定式化されている。したがって、この課題演習において、学習者は与えられた制約条件を満たすように作問活動を行うことが要求されるため、学習者はその制約条件を考慮することが求められる。その結果、制約条件の理解が促進されると考えられている。このシステムの妥当性の検証に関しては、長期のおよび継続的な実践利用を通して学習効果が確認されていることから、その作問活動の妥当性は担保されているといえる。

さらに他の先行研究では、そのモンサクンを利用した作問過程のログデータに基づいた学習者の作問活動の分析も行われている。この分析結果から学習者が作成した問題およびその問題を作成するまでの途中状態はランダムではなく偏りがあり、またその偏りは制約を考慮している、あるいは考慮の失敗として説明できる結果が得られている[7,8]. 加えて、

多くの学習者において共通に陥ってしまう誤った状態の存在，およびその誤った状態が学習者にとって適切に考慮するのが難しい制約に起因することを示唆する分析結果も得られている．これらの結果は，プレテスト・ポストテストの結果だけでなく，学習者の活動のプロセスにおいてモンサクンを用いた学習活動の妥当性を示唆しているとともに，モンサクンの作問活動では問題を作成した段階だけではなく，その途中状態も考慮した診断が必要であるといえる．

一方で，現状のシステムでは，学習者が問題を作成した段階における診断機能しか実装がされておらず，問題を作るまでの途中状態の診断は実現されていない．したがって，ある作問課題に対して，どのような活動を意味するどのような作問活動があり得るかを診断する機能を実現することが必要であるといえる．

以上を踏まえて，本稿では作問活動の途中状態を含む作問課題の診断の自動化を実現するために，制約を満たす過程を表現した作問プロセスシミュレータを開発したので，それを報告する．以下，本稿では，第二章と第三章において本研究の基礎となるモンサクンと三文構成モデルについて述べる．第四章では，作問プロセスシミュレータについて述べ，第五章では，まとめと今後の課題について述べる．

## 2 モンサクン

### 2.1 作問演習形式

作問学習支援システム「モンサクン」の演習画面は，図1のようなインターフェースとなっている．学習者はこの図の左上にある問題制約を満たすように与えられた単文を選択および並び替えることで作問活動を行う．さらに，学習者は，三枚の単文を左側の三つの黒い角丸四角形（カードホルダー）に当てはめた後に正誤判定ボタンを押すことで自分の回答に対するフィードバックを受けることが可能となっている．したがって，モンサクンの作問活動の特徴は，(1) 学習者に制約を考えさせる課題になっていること，(2) 学習者に個別診断および即時フィードバックを返すことが可能であること，の二点であるといえる．

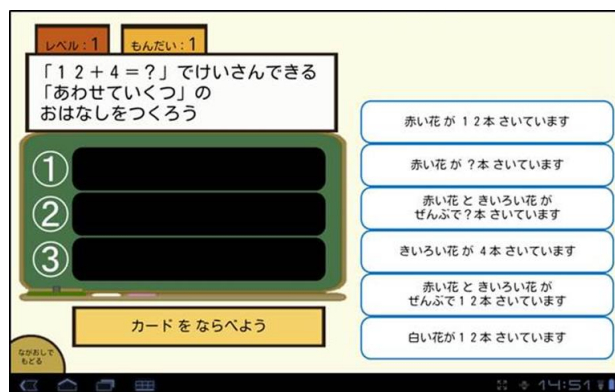


図1 モンサクンのインターフェース

### 2.2 制約充足課題

モンサクンの作問課題は，制約充足課題として定式化された作問になっている．制約充足課題とは，学習者に制約充足問題を解決させる課題のことである．この節では，この制約充足問題の定式化に関して述べる．

制約充足問題の定式化は，探索問題の定式化と類似の方法で行なわれる．探索問題は，(1) 状態集合，(2) オペレータ集合，(3) 状態遷移関数，(4) 初期状態，(5) 最終状態として定義される．モンサクンの作問課題における状態集合は，与えられた単文カードセットから生成される単文の組み合わせとして表現される．オペレータ集合は，カードホルダーに単文カードを割り当てるまたはカードホルダーから単文を取り外す操作として表現される．状態遷移関数は，状態とオペレータの積集合から状態への写像として表現され，これは状態遷移のルールを表す．初期状態は，カードホルダーに単文が一枚も割り当てられていない状態である．最終状態は，探索を行う前には未確定となっている．以上のように定義すると図2のような探索空間が規定されることになる．

加えて，制約充足問題では，制約充足を考慮する必要があるが，この探索空間の各状態において制約充足が表現される．この制約条件の種類としては，問題制約と文章題制約がある．問題制約は，問題が満たすべき数式を指定する数式制約と問題が満たすべき物語種類を指定する物語制約から構成されており，文章題制約は，オブジェクト制約，数量制約，述語制約，文構造制約，文順序制約から構成される（文章題制約の各制約の詳細に関しては，次章で述べる）．したがって，この制約充足問題で満たすべき制約条件の数は，7個となっている．以上のように定義された制約充足問題を学習者は作問演習として行っていることになる．次節では，この探索空間における探索について述べる．

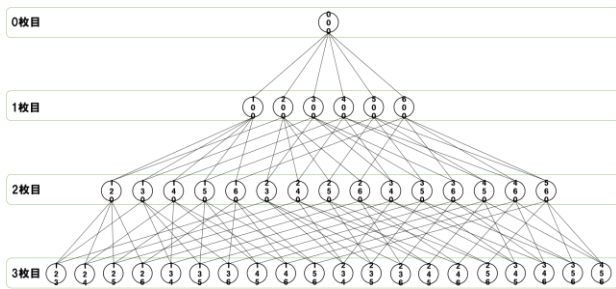


図2 作問課題の探索空間(順序考慮なし)

## 2.3 制約充足課題における探索

制約充足問題として定式化された作問課題では、学習者は探索空間内で全ての制約を充足するように探索を行うことになる。一般的に探索の種類は、探索に関する事前知識を用いないブラインド探索と探索に関する事前知識を用いるヒューリスティック探索がある。この作問課題において学習者が求められる探索は、ブラインド探索ではなくヒューリスティック探索である。なぜならば、この作問課題では算数文章題の知識や作問課題の解法の知識を活用しなければ探索範囲を制限する活動ができず、誤りが多発してしまうからである。したがって、この制約充足課題では、ヒューリスティック探索を行うことが求められるといえる。そのため、学習者は何も考えずに単文カードを選択し並び替える活動を行うわけではなく、知識に基づいて考える活動を行う作問課題になっていると考えられる。本節では、制約充足問題における探索方法について述べた。次節では、実際の学習者がこの制約充足課題において行っている探索に関して述べる。

## 2.4 学習者の作問活動の分析

制約充足課題において学習者は探索を行うことになる。モンサクンでは、この制約充足課題における探索をログデータとして記録すること可能である。そのため、先行研究においてそのログデータに基づいた学習者の作問活動の分析が行われている[7,8]。その分析結果から、学習者が作成する成果物(三枚の単文の組の状態)には偏りがあることとその偏りは制約充足に関係があることが確認されている。したがって、この課題において学習者はランダムに単文カードを選択しているわけではなく、制約を考えながら作問演習を行っていることが示唆されている。加えて、成果物(作成された問題)だけではなく、中間成果物(一枚～二枚の単文の組の状態)および状態遷移(単文の組を表現する状態間の遷移)にも偏りがあることが確認されている。したがって、成果物を組み立てるまでの過程においても制約条件を考えていることが示唆されているため、その過程も

重要であるといえる。このため、成果物だけではなく中間生成物や状態遷移をシステムで診断することも必要であると考えられる。さらに、先行研究において、ある誤った中間成果物に遷移してしまうとその状態から正解にたどり着くまでに多くの探索ステップ数が必要になる学習者がいることも確認されている。これは、一度誤った中間成果物に遷移してしまうとなかなかその状態から抜け出せない学習者がいることを示しているため、そのような学習者をシステム上で検知することも重要であるといえる。これを実現するためには、中間成果物や状態遷移の診断機能が求められる。

以上の作問活動の分析結果を踏まえると、成果物だけではなく、中間生成物の状態や状態遷移を含む作問課題の診断機能をシステムに実装することが必要であるといえる。一方で、現状のシステムでは、この診断機能は実装されていない。そこで、本研究では、この診断機能の実現を目指す。次章では、診断機能を実現するために必要な算数文章題の情報構造をモデル化した三文構成モデルに関して述べる。

## 3 三文構成モデル

### 3.1 算数文章題の情報構造定義

算数文章題の情報構造の定義とは、その構成要素と構成要素間の関係を定義することである。その定義を行っているものが三文構成モデルであるため、本節ではそのモデルに関して述べる。

三文構成モデルでは、算数文章題を三つの単文から構成されるものとして定義している[9]。この理由は、一回の四則演算で解ける算数文章題は二つの演算数と一つの結果数から構成されるためである。単文の種類は存在文と関係文の二種類あり、一つの単文文章題は二つの存在文と一つの関係文から構成される。単文文章題の種類は、合併、優量比較、劣量比較、増加、減少の五つに分類される。この分類は従来の文章題の分類方法に基づいている[10]。さらに、このモデルでは、これら各物語種類が算数文章題として成立するために必要な制約条件の定義を行っている。その制約条件の種類は基本的には各物語で共通のものとなっており、オブジェクト、数量、述語、文構造、文順序制約(増加と減少のみ)の五つがある。本稿では、図3に増加の物語の情報構造の定義の一例を示す。この物語種類の時では、オブジェクト制約では、各単文で登場する物が全て等しいことを要求し、数量制約では、劣量存在文の数量と増加の関係文の数量を足したものが優量存在文になることを要求し、述語制約では、一枚目および三枚目の

単文の述語が存在の役割を表すこと、二枚目の単文の述語が増加の役割を表すことを要求する。文構造制約では、存在文二枚と関係文が一枚から構成されていることを要求し、文順序制約では劣量存在文、増加の関係文、優量存在文の順番であることを要求する。以上のように構成要素間の関係がこのモデルでは定義されている。

- 増加問題の構成要素
- ①劣量存在文:[物A][助詞][数量A][述語:存在]
- ②増加関係文:[物B][助詞][数量B][述語:増加]
- ③優量存在文:[物C][助詞][数量C][述語:存在]

- 増加問題の構成要素間の関係
- 1. オブジェクト制約:物A, B, Cは同一の物である。
- 2. 数量制約:数量A+数量B=数量Cである(いずれかの数量は未知数)。
- 3. 述語制約:述語A, Cは存在の役割, 述語Bは増加の役割である。
- 4. 文構造制約:二枚の存在文と一枚の関係文から構成される。
- 5. 文順序制約:劣量存在文, 増加関係文, 優量存在文の順番である。

図3 増加問題の情報構造の定義

### 3.2 作問過程の予測

上記のように定義された三文構成モデルは、作問過程の予測を行うことが可能となっている。さらに、全ての制約条件を考慮する正しい作問過程の予測だけでなく、一部の制約条件を緩和する誤った作問過程の予測も行うことも可能である。これらにより、中間成果物と状態遷移の診断が実現される。本節では、その作問過程の予測について述べる。

#### 3.2.1 正しい作問過程の予測

本稿における作問過程の予測の定義は、「0枚から2枚の単文が提示された状態から文章題として成立するために必要な残りの単文およびその残りの単文が満たすべき制約条件の予測」である。これらの予測を三文構成モデルでは行うことが可能である。このモデルでは、図3のように情報構造の定義を行っているため、ある構成要素が確定すると残りの構成要素の制約条件が予測可能になっている。さらに、その予測結果を使うことで予め用意された単文カードセットから選択可能な単文を予測することも可能である。以下に増加問題を対象とした場合の作問過程の予測例を示す（他の物語種類も同様の方法で予測可能である）。

図4は単文選択枚数1枚時の増加問題を対象とした作問過程の予測の一例である。この事例は、既に“りんごが5個あります”が優量存在文としてカードホルダーの三枚目に選択されている、かつ、診断する単文カードが“りんごが3個あります”（カードホルダーの一枚目にセットされたもの）の場合において、それら二枚の単文カードから構成される状態は全ての制約を充足していると診断したものである。左上のものが単文カード1枚選択時の制約条件の予

測結果を表しており、選択されていない残りの劣量存在文と増加関係文の単文カードの制約条件の予測となっている。ここでの制約条件の予測としては、オブジェクト制約と数量制約の予測を行っている（他の制約条件は既に確定しているため除外する）。残り単文のオブジェクトは、一枚目に“りんごが5個あります”という単文が選択されているため、全ての物が同一の物になるようという制約を満たすように残りの二文に登場する物はりんごであると予測する。残りの単文の数量は、既に選択している単文が全体量なので、残りの単文はその全体量よりも小さな数量か未知数であると予測している。この予測結果と診断する単文カードの各制約のチェック（診断する単文カードが予測している制約条件に違反していないかどうかを確認する）を行ったものが下側のものになる（なお、C1はオブジェクト制約、C2は数量制約、C3は述語制約、C4は文構造制約、C5は文順序制約を表現している）。この制約チェックでは、残りの二つの単文カード全てを対象としているため、劣量存在文、増加関係文、の二種類を対象としている。また、制約を満たすまたは違反がない場合を充足している状態として判定し、制約違反がある場合は充足していないとして判定している（図4では、充足する場合は○、充足しない場合は×としている）。この事例では、存在文と比較した場合は、全ての制約条件が充足していると診断し、関係文と比較した場合は、述語制約と文順序制約が充足していないという診断となる。三文構成モデルでは、このように一つの単文カードに対して複数の制約充足の診断結果が存在する。これらの診断結果の選定基準として、三文構成モデルでは制約充足の数と充足している制約条件の項目の質を定めることが可能である。今回の事例では、説明の簡略化のため、制約充足の数が多いものを最終的な診断結果とする。したがって、この事例の診断結果は、全ての制約条件が充足されていると診断し、今回診断された単文は選択可能なものであると診断する。このようにして三文構成モデルは作問過程の予測を行うことで、中間生成物および状態遷移の診断を行うことが可能であると考えられる。

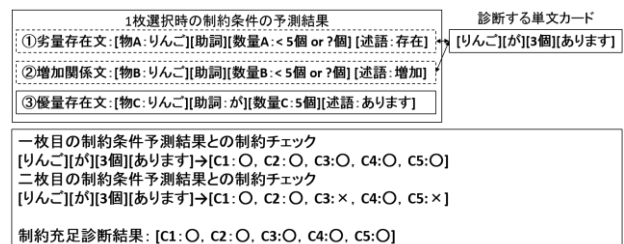


図4 増加問題を対象とした作問過程の予測例

### 3.2.2 誤った作問過程の予測

加えて、先ほどの事例では全ての制約条件を考慮する予測結果を示したがその制約条件を緩和することで誤った作問過程というのも表現可能になる。例えば、先ほどの事例でオブジェクト制約を考慮せずに制約条件を予測することも可能となる。この場合、本来はりんごを含む単文カードのみが選択されるはずだがそれ以外の物を含む“みかんが3個あります”などの単文カードが選択されることになる。このようにして三文構成モデルでは誤った作問過程の表現も含めて扱うことが可能であると考えられる。なお、既に制約違反となる単文カードが選択されている際の制約充足診断にはこの制約緩和を行うことで対応することが可能であると考えられる。

## 4 作問プロセスシミュレータ

本稿では、制約充足課題において制約を満たす過程を表現したシミュレータを作問プロセスシミュレータと呼ぶ。制約を満たす過程は、前述した三文構成モデルに基づく作問過程の予測を基礎として実装を行った。この章では、その作問プロセスシミュレータについて述べる。

### 4.1 シミュレーションの基本処理

作問プロセスシミュレータでは、制約充足問題に対してヒューリスティック探索を行うことで作問活土シミュレーションすることになる。したがって、基本的な処理としては、(1) 予測評価値の算出処理、(2) オペレータの適用処理の二つがある。

(1) の予測評価値の算出処理では、探索空間における探索範囲を絞りこむために予測評価値を算出し、予測評価値の最大値となる状態をリストに格納する処理を扱う。この予測評価値は、充足している制約条件の数によって表現されるものである。したがって、この予測評価値では、全ての制約条件を充足するものが最大値となり、その最大値となる状態はリストに記録される。このリストに格納されている状態は制約違反がないため、状態遷移が可能な状態群として判定される。これにより、任意の状態において状態遷移が可能な状態の診断が実現される。なお、この予測評価値を算出する方法は、3章で記述した三文構成モデルの作問過程の予測に基づいている。制約条件の予測結果と診断する単文カードの情報をういた制約チェックにより、制約充足の診断を行い、その診断結果を予測評価値として用いている。通常の制約充足問題では、オペレータを適用した後制約充足のチェックを行うが、このシミュレ

ータでは、予測評価値の段階において制約チェックを行う。また、問題制約も考慮した形で制約チェックをしている。

(2) のオペレータの適用では、さきほどのリストの情報に基づき制約違反がある状態には遷移しないようにすることで探索範囲を制限する。その上でオペレータの適用を行い、次の状態へ遷移する処理を行う。

### 4.2 シミュレーションの種類

4.1 節では、シミュレーションの基本処理について述べたが、この節では、その基本処理に基づいて実現可能なシミュレーションの種類に関して述べる。このシミュレータで実現できるシミュレーションの種類としては、大きく三つある。

一つ目は、全ての制約条件を考慮する正しい作問過程のシミュレーションである。全ての制約条件を考慮したものであるため、正しい状態や正しい状態遷移の診断が可能である。

二つ目は、一部の制約条件を緩和する誤った作問過程のシミュレーションである。この処理では、シミュレーションの初期状態において、緩和する制約条件の種類を指定し、その指定した制約条件を緩和した予測を行う。一部の制約条件を緩和しているため、誤った状態や誤った状態遷移の診断につながる。

三つ目は、探索空間における状態集合の全状態の制約充足を診断するためのシミュレーションである。この処理では、全ての状態を診断するために全探索を行う。また、正しい作問過程のシミュレーションと誤った作問過程のシミュレーションの両方を用いることで全ての状態および状態遷移を診断する。これらによって、探索空間における状態集合の全ての状態の制約充足の診断が可能となっている。

### 4.3 作問プロセスシミュレータの機能

作問プロセスシミュレータの機能としては、大きく四つある。一つ目は、制約充足状態診断機能である。この機能は、探索空間における中間成果物を含む全状態の制約充足を診断するものである。この機能により、探索空間の全状態の制約充足が診断できるため、中間成果物作成段階を考慮した学習者の作問活動のフィードバックが実現可能になると考えられる。例えば、中間成果物作成段階において正誤判定を学習者に提示することが可能になる。加えて、制約充足の診断結果に基づいて単文カードセットの種類や枚数を変更したり単文カードをカードホルダーに固定したりすることで探索空間内において考慮すべき制約条件や探索範囲を学習者の状況に合わせて適応的に変更できるようになると考えられる。ま



た、作問課題作成時やモンサクンのログデータに基づく学習者の作問活動の分析時などにおいて作問課題を分析する際に活用することが期待できる。

二つ目は、状態遷移診断機能である。この機能は、任意の状態から状態遷移可能な他の状態を全て特定することを可能にする。この機能により、モンサクンを苦手とする学習者に対して単文選択過程を可視化することでガイドするといったような支援につながると思われる。

三つ目は、制約条件予測過程の診断機能である。これは、単に状態遷移が可能な状態が判定できるだけでなく、その状態遷移が可能な理由を説明する機能である。ここでの説明は、選択した単文が満たすべき制約条件を示すことである。

四つ目は、探索戦略診断機能である。この機能は、一部の制約条件のみを考慮することで作問課題における正解を見つけることが可能な戦略を検知するものである。モンサクンにおける作問課題では、全ての制約条件を理解させることを目的としているので一部の制約条件を考慮するだけで正しい回答を導出可能な作問課題は望ましくない場合がある。この機能を使うことでそれを前もって検知することが可能となる。さらに、モンサクンにおける学習者が行った作問活動のログデータから学習者が用いた探索戦略を推定する機能を実現することも期待される。

## 5 むすび

本稿では、算数文章題を対象とした作問学習支援システム「モンサクン」における作問過程を考慮した作問課題の分析を目的とした作問プロセスシミュレータの設計・開発について述べた。このシミュレータにより、モンサクンのシステムにおいて中間生成物や状態遷移、制約条件予測過程、探索戦略の診断機能が実現された。

今後の課題としては、作問プロセスシミュレータの機能を活用した作問課題の作成や作問活動の分析およびフィードバックなどの応用事例の実現とその評価を行っていききたい。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 19H04227, 17H01839, および SIP「ビッグデータ・AI を活用したサイバースペース基盤技術」の助成による。

## 参考文献

[1] R. Skemp: 新しい学習理論にもとづく算数教育-小学

校の数学, 平林一榮 (監訳), 新曜社, (1992).

- [2] 平嶋 宗: 学習課題の内容分析とそれに基づく学習支援システムの設計・開発: 算数を事例として, 教育システム情報学会誌, 30,1,8-193, (2013).
- [3] 平嶋 宗: 「学習課題」中心の学習研究: 情報構造としての学習課題の再定義と構造操作としての学習活動の設計, 人工知能学会誌 30 (3), 277-280, (2015)
- [4] 平嶋 宗: Computational Thinking の外在化とプロセスエビデンス: 情報構造オープンアプローチ, 人工知能学会全国大会, (2017).
- [5] 山元 翔, 神戸 健寛, 吉田 祐太, 前田 一誠, 平嶋 宗: “教室授業との融合を目的とした単文統合型作問学習支援システムモンサクン Touch の開発と実践利用”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J96-D, No.10, pp.2440-2451, (2013).
- [6] 横山 琢郎, 平嶋 宗, 岡本 真彦, 竹内 章: “単文統合としての作問を対象とした学習支援システムの設計・開発,” 教育システム情報学会誌, Vol.23, No.4, pp.166-175, (2006).
- [7] A.A. Supianto, Y. Hayashi, and T. Hirashima: “Visualizations of problem-posing activity sequences to-ward modeling the thinking process,” Research and Practice in Technology Enhanced Learning, vol.11, no.1, p.14, (2016).
- [8] A.A. Supianto, Y. Hayashi, and T. Hirashima: “Model-based analysis of thinking in problem posing as sentence integration focused on violation of the constraints,” Research and Practice in Technology Enhanced Learning, vol.12, no.1, p.12, (2017).
- [9] T. Hirashima, Y. Hayashi, and S. Yamamoto: “Triplet structure, model of arithmetical word problems for learning by problem-posing”, Proc.HCII2014, (LNCS 8522), pp.42-50, (2014).
- [10] M.S. Riely and J.G. Greeno: “Development analysis of understanding language about quantities and of solving problems,” Cognition and Instruction, vol.5, no.1, pp.49-101, (1988).