Vol.2015-CE-129 No.13
2015/3/21

CSアンプラグドを用いた ソーティングプログラム理解教材の提案

島袋 舞子[1,a)]　土田 和人[1,b)]　兼宗 進[1,c)]

概要：大学等のアルゴリズム学習の中でソーティングのプログラムが扱われることは多いが，クイックソートのプログラムについては理解が難しい傾向があった．そこで我々はクイックソートのプログラムを理解することが簡単でない要因を分析し，CS アンプラグドの天秤を用いたソート学習と独自のワークシートを組み合わせることにより理解を補助する教材を開発した．大学生で実験したところ，実験前と比較してクイックソートのプログラムを理解できる割合が向上することを確認した．

キーワード：AR, 拡張現実, CS アンプラグド, クイックソート, プログラム学習

A proposal of worksheet for understanding quicksort algorithm.

Shimabuku Maiko[1,a)]　Tsuchida Kazuto[1,b)]　Kanemune Susumu[1,c)]

Abstract: Quicksort program is not easy to understand in university classes. However, in Computer Science Unplugged activity, quicksort is not difficult for children. We thought that the reason is difficulty of using arrays in programs. So we propose a worksheet for understanding quicksort program using arrays. In our experiment, reading ability of program was improved by using the worksheet.

Keywords: AR, CS Unplugged, Quick sort, Programming Education

1. はじめに

大学などのアルゴリズム学習の中で，ソーティングのプログラムが扱われることが多いが，クイックソートのプログラムについて理解が難しい傾向がある．

情報科学の基礎を学ぶための教育手法の一つにコンピュータサイエンスアンプラグド（以下，CS アンプラグド）がある [1][2]．CS アンプラグドでは，カードなどの教具を用いた体験的な活動から情報科学に関する様々な概念を学ぶことができる．

CS アンプラグドの学習法の一つに，天秤とおもりを教具に用いた「整列アルゴリズム学習」がある．これは，「コンピュータは同時に 2 つのデータしか大小比較できない」という制約を天秤で作り，コンピュータ内部で行われているデータの動きをデータに見立てたおもりの重さの比較動作を繰り返すことで体験する学習である．学習者は，自分の手で教具を動かし，試行錯誤を繰り返しながら，「どのような手順で比較するおもりを選んでいけば良いか」を意識する事で，自分で整列アルゴリズムを見つけ出したり，基本的な整列アルゴリズムを理解したりする学習が可能になる．

CS アンプラグドは，学習内容を調節することで，学習者の年齢等に応じた使い方が可能になる．そのため，CS アンプラグドはこれまでも小学校から大学までのいろいろな校種の授業で使われ，その学習効果が確認されてきた [3][4][5][6][7][8] ．

ただし，CS アンプラグドは，学校の授業用に開発された学習法ではないため，授業で使う場合には課題も存在する．

[1] 大阪電気通信大学
Osaka Electro-Communication University, Shijonawate, Osaka 575–0063, Japan
[a)] shimabuku.m@gmail.com
[b)] ht12a053@oecu.jp
[c)] kanemune@acm.org

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

天秤とおもりを教具に用いた「整列アルゴリズム学習」はアルゴリズムの考え方の理解は可能であるが，プログラムの理解に必要な要素を学ぶことができない．そこで，我々は再帰処理と配列による並び替えの学習を補助すること目的とし，独自のワークシートを作成し，効果をはかった．

2. クイックソートのプログラム学習

ソーティングアルゴリズムを学ぶの中で，クイックソートは代表的なソート法の一つである．他のソート法と比べて最も高速といわれており，多くのプログラムで利用されるソート法である．しかし，一般的にクイックソートのプログラムを理解するのは，難しいと言われている．

クイックソートのプログラムを理解するためには，以下の項目を理解していなければならないと考える．

- クイックソートの考え方（2 つずつ値を比較する，基準値で左右に分割する）
- 再帰処理
- 配列による並び替え
- 配列の添字

再帰処理の考え方を使用せずにプログラムを記述することは可能であるが，一般的に大学などのアルゴリズム学習で用いられるクイックソートのプログラムは多くの場合，再帰処理の考えを用いたプログラムとなっているため，項目に含めた．

クイックソートの考え方は以下のとおりである．

(1) ピボットとして値を 1 つ選びそれを P とする
(2) 左から順に値を調べ，P 以上のものを見つけたらその位置を i とする
(3) 右から順に値を調べ，P 以下のものを見つけたらその位置を j とする
(4) i が j より左にあればその二つの位置を入れ替え，2 に戻る．そのとき，(2) の探索では i の 1 つ右，(3) での探索は j の 1 つ左から行う
(5) (2) に戻らなかった場合，i の左側から分割し 2 つの領域に分け，そのそれぞれに対して再帰的に (1) からの手順を行う。要素数が 1 以下の領域ができた場合，その領域は確定とする

このように，クイックソートのプログラムを理解するためには，複数の要素を扱わなければならないため，難易度が高い．そこで，CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」に着目した．

3. CS アンプラグドのアルゴリズム学習

3.1 CS アンプラグドの整列アルゴリズム学習

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」とは，天秤とおもりを教具に用いて，データの整列（ソーティング）を学習することを目的とした学習である．日本では，著書 [2] の中で「いちばん軽いといちばん重い（整列アルゴリズム）」という学習内容として紹介された．

この学習では教具として，天秤と重さのわからない複数個のおもりを使用する．学習者はおもりの中から 2 個ずつを選び，天秤を用いて「どちらが軽いか／重いか」の比較を繰り返す (図 1)．学習者は，その繰り返しからどのように比較するおもりを選べば整列ができるか，また，効率が良いかといったアルゴリズム的な思考を行うようになる．そして，考え方が正しければ整列が可能である．学習者は，整列ができたと思ったところで，おもりの重さを確認し，自分の考え方の正誤を確認する．

この学習を通して，「コンピュータは同時に 2 つの値しか比較ができないこと」や，「クイックソートやバブルソートなどの基本的な整列の手法」，「方法によって処理の効率に違いが生じること」などの情報科学の基礎を学習できる．

図 1 天秤を用いたアルゴリズム学習

3.2 プログラムを理解する場合の課題

体験的な学習法として効果的な CS アンプラグドであるが，元々は学校用として開発された手法ではないために，学校の授業で使う場合には，授業環境や学習者の特性に配慮した工夫が必要である．

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」を用いることで，2 個の値を比較していく，基準値で左右に分割をおこなうというクイックソートの考え方の理解は可能であるが，クイックソートのプログラムの理解に必要な再帰処理，配列での並び替えといった要素を学ぶことができない．そこで，我々は再帰処理と配列による並び替えの学習を補助すること目的とし，独自のワークシートを作成した．また，教具にはワークシートとの親和性が高いデジタル天秤を用いる．

デジタル天秤は，紙で作成されたマーカーとそれを読み取るカメラを組み合わせた AR 技術を用いて開発された仮想天秤である．既存の天秤とおもりにある「手にとったおもりの重さで順番の予測がつく」，「アルゴリズムを実行する度に並び順が同じになる」等の課題を解決するために開発された．天秤マーカーとおもりマーカー (図 2)，正誤判

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

定マーカーの３種類のマーカーがあり，それぞれを印刷し，コンピュータに接続したカメラで読み取ることで使用することができる．天秤マーカーを中央に置き，その左右におもりマーカーを置くことで，２つのマーカーの比較ができる (図 3)．正誤判定マーカーを用いることで，おもりマーカー上に数字を表示し，正しく並び替えが実行できたかを確認することができる．再度，実行した場合は，過去の研究から，デジタル天秤を用いた学習は，天秤を用いた場合と同等の効果があることが知られている [9]．CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」と組み合わせて利用することにより，クイックソートの概念的な学習とプログラム学習を同時にできると考える．

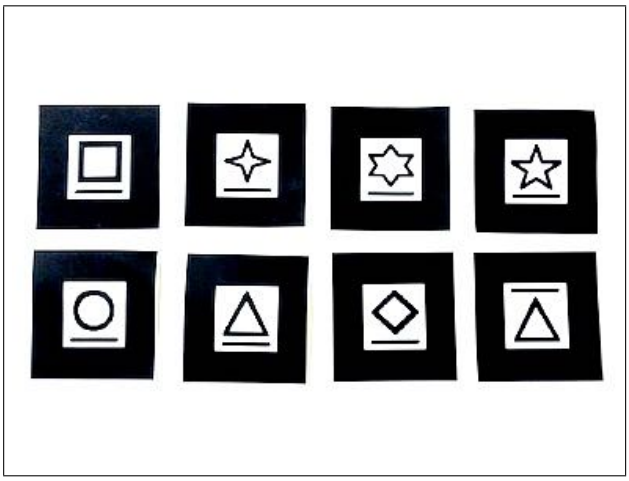

図 2 AR マーカー

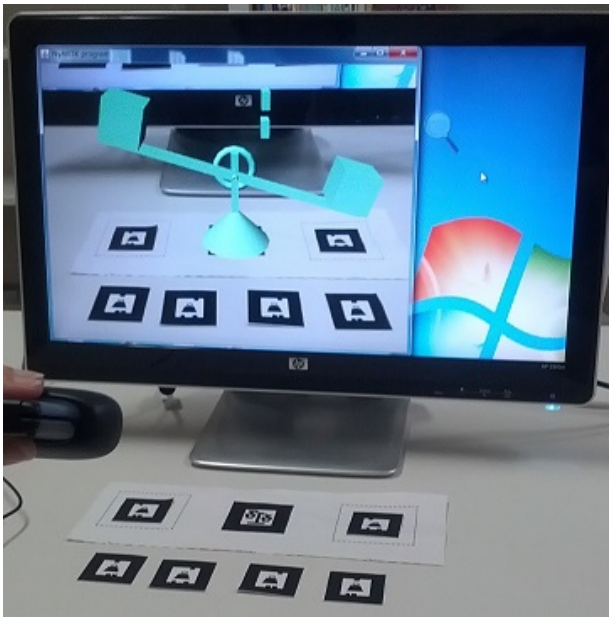

図 3 コンピュータスクリーンの仮想天秤

4. 作成したワークシートと学習方法

4.1 作成したワークシート

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」と組み合わせて利用することで，プログラム理解の補助を目的としたワークシートを作成した．ワークシートはピボットで左右に分ける比較シート（図 4）と，全体の再帰処理を表すシート（図 5）を作成した．ワークシートは紙製で，A4 コピー用紙を利用している．

4.1.1 比較シート

図 4 の比較シートでは，マーカーの大小比較をおこなう．マーカーには，実行する度にランダムな値が入るようになっている．中央にある天秤のイラストのマーカーは，天秤を表示させるマーカーである．カメラを通して見ることで，仮想的な天秤がコンピュータ画面上に表示される．

その上にある P と書かれた領域には，ピボットのマーカーを置き，下にある a[i] と書かれた領域には，比較を行うマーカーを置く．P と記述することでピボットを基準値として分割することを，a[i] と書くことで，配列から値を取り出すことを意識させた．比較をおこなった後，比較したマーカーが大きい場合は右の破線で示された領域，小さい場合は左の破線で示された領域にマーカーを置く．

4.1.2 作業シート

再帰処理を表すシートの一番上の空欄は，マーカーに描かれた内容を記述する欄である．配列を意識させるために，空欄の左側に a[ ]=と記述した．枝分かれした空欄には，分かれた中央にある空欄には，ピボットを記述する．デジタル天秤によって比較した結果，大きい場合は右下の空欄へ，小さい場合は左下の空欄に記述する．これを各空欄に 1 つ以下のマーカーになるまで繰り返していく．下にある矢印は，ピボットと比較していく順番を表している．これは基準値（ピボット）で左右に分割すること，再帰処理を意識させるものである．一番下の空欄には並び替えの結果を記述する．各領域から，下へ垂直に降りた部分に図形を記述することで，並び替えることができる．

4.2 ワークシートを利用した学習の流れ

作成したワークシートを用いた CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」の流れは以下のとおりである．

(1) 作業シートの一番上の空欄に，おもりとなるマーカーの内容を記述する．
(2) (1) で 1 番右側に内容を記述したマーカーを比較ワークシートの P の領域に置く．
(3) (1) に書かれた内容を左側から順番に a[i] の領域に置き，ピボットと大きさを比較する．
これを手元のマーカーが無くなるまで繰り返す．
(4) 作業シートに，ピボットにしたマーカー，マーカーの領域とその内容を記録する．

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

(5) 大小分けられた領域ごとに (1)〜(4) を，それぞれの領域に残るマーカーが 1 枚以下になるまで繰り返す．

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」とクイックソートのプログラム理解を補助するワークシートを組み合わせて学習をおこなうことにより，クイックソートの概念的な学習とプログラムの学習が可能となると考える．

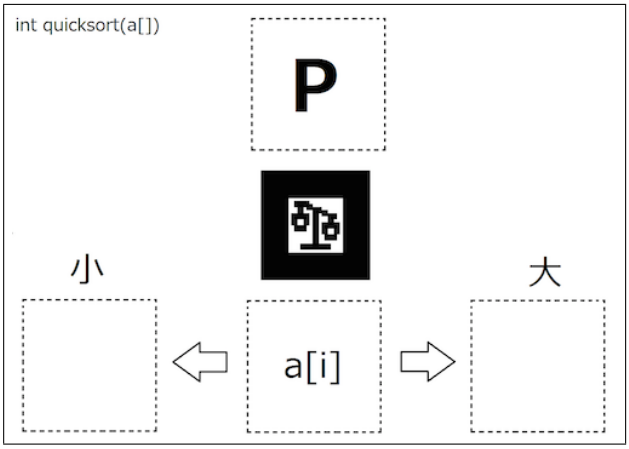

図 4 比較ワークシート

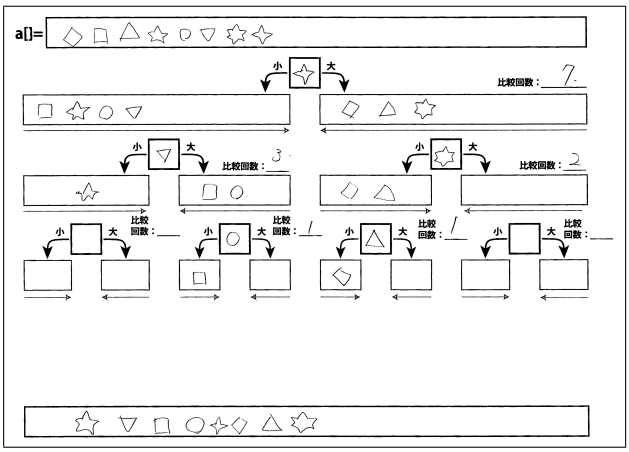

図 5 再帰処理を表すワークシート

5. 評価実験

5.1 対象

評価実験は，情報科学を学ぶ大学生 16 名を対象におこなった．全員がソーティングアルゴリズムを扱う講義を履修済みである．本実験は，クイックソートに関する確認テスト（図 7）をおこなった後，(学習群 A) 独自シートを用いた CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」，(学習群 B)CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」，(学習群 C) クイックソートを解説した本を黙読の 3 つの学習に分け，学習をおこない，その後、再度確認テストをおこなう．

学習群 A と学習群 B の学習をおこなう被験者には，学習方法を解説したプリント（以下，解説シート）を見ながら学習を進めてもらった．解説シートには，デジタル天秤と AR マーカー，独自シートの使用方法等が記述されている (図 6)．

使用する教具として，通常 CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」では天秤とおもりを使用するが，今回はデジタル天秤と AR マーカーを使用した．実行する度にマーカーの値が変化する，ワークシートと同じく学習に紙を用いることから親和性が高いと考える．デジタル天秤は，AR 技術を用いて作成された仮想的な天秤教具である．コンピュータに接続したカメラを通して正方形の紙製マーカーを見ることで，コンピュータ画面上に仮想的な天秤とおもりが表示される．その傾きによって比較したおもりの重さがわかる．

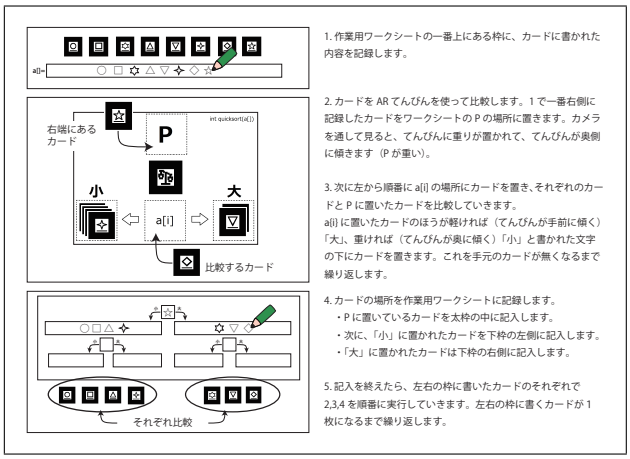

図 6 学習群 A で使用した解説シート

5.1.1 3 つの学習法

実施した 3 つの学習のそれぞれの流れについて述べる．

(1) 学習群 A：独自ワークシートを用いた学習

16 名のうち 7 名を対象に，ワークシートを用いて CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」をおこなった．被験者に独自ワークシートを用いた CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」のやり方を記述した解説シートを読んでもらった後，2 回の学習をおこなった．

(2) 学習群 B：CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」

16 名のうち 4 名を対象に学習をおこなった．被験者に CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」のやり方を記述した解説シートを読んでもらった後，2 回の学習をおこなった．

(3) 学習群 C：専門書による学習

16 名の内 5 名を対象に，本学で開講されているアルゴリズムに関連する講義で使用されているテキストのクイックソートについて解説されたページを 20 分間読む学習をおこなった．テキスト [10] は，クイックソートの部分のみを読ませた．

これらの学習をおこなった後，再度確認テストをおこ

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

なった．

5.1.2 確認テストの内容

問題は 3 問出題した．1 問目はクイックソートの考え方を理解しているかを確認するため，5 択の選択問題を出題した．選択肢には各種ソートの特徴を記述し，クイックソートの説明を正しく選択した場合，正解とした．

2 問目は記述問題で，配列中の値のトレースできるかを確認するために出題した．ピポッドに 4 を指定しているか，ピボットの値である 4 と比較し，左側に小さい値，右側に大きな値が記述されていれば正解とした．

3 問目はプログラム中の変数が何を表しているかを問う問題で，6 つの選択肢から、それぞれの変数が表しているものに適切に対応するものを選択する問題である．クイックソートのプログラムを理解しているかを確認するために出題した．a をソートを行う配列，l を配列の左端の位置，i を大小を比較する基準の値の位置，r を配列の右端の位置と選択していれば正解とした．4 つの変数と選択肢の対応が全て正しい場合のみ，クイックソートのプログラムを理解していると判断した。

5.2 結果

5.2.1 確認テストの結果

それぞれの学習において学習前と学習後のテスト結果を比較した．学習群 A におけるテスト結果の比較を表 1，学習群 B におけるテスト結果の比較を表 2，学習群 C におけるテスト結果を表 3 に示す．

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」に独自ワークシートを組み合わせた学習群 A においては，学習前と学習後を比較し，問題 1 で 26.6%，問題 2 で 57.2%正解率が向上した．問題 3 は変化はみられなかった．学習前と学習後の平均点の差について t 検定をおこなった結果，問題 2 において，5%水準で有意差がみられた．

CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」をおこなった学習群 B においては，問題 1 と問題 3 で 50.0%正解率が向上した．問題 2 は変化はみられなかった．学習前と学習後の平均点の差に有意差はみられなかった．

クイックソートについて解説した本を黙読する学習をおこなった学習群 C においては，問題 1 で 40%，問題 3 で 20%正解率が向上した．問題 2 は変化はみられなかった．学習前と学習後の平均点の差に有意差はみられなかった．

表 1 学習群 A におけるテスト結果の比較 (n=7)

	学習前	学習後	t 検定
問題 1	5(71.4%)	7(100.0%)	p=0.1723
問題 2	1(14.2%)	5(71.4%)	p=0.03176
問題 3	4(57.1%)	4(57.1%)	—

問題 1
次の文章でクイックソートについて説明されているものを選びなさい。
1. 値をランダムに並べ、大小順になっていることを確認する
2. すべてのデータを隣のデータと比較しながら入れ替えていく
3. いちばん小さい値を探し、残りの値の中からいちばん小さい値を探していく
4. ソートが済んだ並びの中に、値をひとつずつ入れていく
5. 値の 1 個を基準にして大小に分け、分けた値の 1 個を基準にして大小に分けていく

問題 2
次の数は、配列の値をクイックソートにより並び替えを行った時の値を表している。空欄に当てはまる値を書きなさい。

6, 1, 2, 8, 5, 7, 3, 4
(　　)
1, 2, 3, 4, 8, 5, 7, 6
1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 7
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

問題 3
次のプログラムは配列の値をクイックソートにより並び替えるプログラムである。1 行目と 2 行目の変数 a, l, i, r は、それぞれ何を表しているかを次の選択肢から選びなさい。

```
void quicksort(int a[], int l, int r){
  if(l < r){
    int i = tenbin(a, l, r);
    quicksort(a, l, i-1);    ← 1
    quicksort(a, i+1, r);    ← 2
  }
}
  int tenbin(int a[], int l, int r){
    int v = a[r], i = l1, j = r, t;
    while(true){
      do i++; while(a[i] < v);
      do j; while(l <= j && v < a[j]);
      if(i >= j) break;
      t = a[i]; a[i] = a[j]; a[j] = t;
    }
    t = a[i]; a[i] = a[r]; a[r] = t;
    return i;
  }
int main(void){
  int a[8] = {3, 2, 8, 7, 1, 4, 6, 5};
  quicksort(a, 0, 7);
  return 0;
}
```

選択肢
ア, ソートを行う配列 イ, 配列の左端の位置 ウ, 配列の右端の位置 エ, 配列の真ん中の位置 オ, 配列を順に見る変数 カ, 大小を比較する基準の値の位置 キ, 位置を交換するために値を 保持する変数

図 7 実施した確認テスト

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

表 2 学習群 B におけるテスト結果の比較 (n=4)

	学習前	学習後	t 検定
問題 1	2(50.0%)	4(100.0%)	p=0.1817
問題 2	1(25.0%)	1(25.0%)	—
問題 3	0(0.0%)	2(50.0%)	p=0.1817

表 3 学習群 C におけるテスト結果の比較 (n=5)

	学習前	学習後	t 検定
問題 1	2(40.0%)	4(80.0%)	p=0.2429
問題 2	0(0.0%)	0(0.0%)	—
問題 3	2(40.0%)	3(60.0%)	p=0.5796

6. 考察

それぞれの学習前と学習後のテスト結果を比較した結果を考察する．学習前と学習後のテストの平均点の差について t 検定をおこなった結果，学習群 A の問題 2 における学習前と学習後のテスト結果の差にのみ，5%水準の有意差があった．問題 2 は，配列中の値をトレースする問題であった．正解するには，ピボットに適切な値を置くこと，ピボットを基準にし左右に分割していくこと，そして，その処理を繰り返し実行することを理解していなければならない．このことから，CS アンプラグドの「整列アルゴリズム学習」にワークシートを組み合わせることにより，ソーティングのプログラム理解を補助することが可能であることがわかった．

7. おわりに

ソーティングプログラムの理解の補助を目的として，独自のワークシートを作成した．CS アンプラグドの天秤を用いた「整列アルゴリズム学習」と独自のワークシートを組み合わせることにより，概念的な理解とプログラムの理解を促進する．3 種類の学習法に分け実験をおこなった結果，CS アンプラグドのソート学習とワークシートを組み合わせることで，クイックソートのプログラムを理解できる割合が向上したことがわかった．今回はクイックソートを取り上げ，ワークシートを作成したが，今後は他のソーティングにも応用していきたい．

謝辞 本研究は，科学研究費補助金（基盤研究（C）25350214）の補助を受けています．

参考文献

[1] Tim Bell, Ian H. Witten, Mike Fellows: Computer Science Unplugged - An enrichment and extension programme for primary-aged children(2005).
[2] 兼宗進監訳: コンピュータを使わない情報教育アンプラグドコンピュータサイエンス, イーテキスト研究所 (2007).
[3] 井戸坂幸男，青木浩幸，兼宗進，久野靖. コンピュータサイエンスアンプラグドの小学生向け実践の取り組み. 情報教育シンポジウム (SSS2008)(2008).
[4] 井戸坂幸男, 久野靖, 兼宗進. コンピュータサイエンスアンプラグドに基づく授業方法改善の試みとその実践. 日本産業技術教育学会誌, Vol.53, No.2, pp.115–123(2011).
[5] 保福やよい, 井戸坂幸男, 兼宗進, 久野靖. 高校情報 B における CS アンプラグドの活用. 情報教育シンポジウム (SSS2008)(2008).
[6] 兼宗進, 佐藤義弘. 情報科教育法での CS アンプラグドの利用. 情報処理学会研究報告. コンピュータと教育研究会報告 2010-CE-103(24), 1-3(2010).
[7] 間辺広樹，並木美太郎，兼宗進. 障害者職業能力開発校における情報教育の取り組み. 情報教育シンポジウム (SSS2008)(2008).
[8] 間辺広樹, 兼宗進, 並木美太郎. CS アンプラグドのアルゴリズム学習における教具による理解度の影響. 情報処理学会論文誌, Vol.54, No.1, pp.14–23(2013).
[9] 土田和人, 島袋舞子, 間辺広樹, 兼宗進. AR を利用した CS アンプラグド教材の提案. 情報教育シンポジウム (SSS2014)(2014).
[10] 浅野哲夫, 和田幸一, 増澤利光: IT Text アルゴリズム論, オーム社 (2005).

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan