

理解支援手法の複合化による効果的な理解支援に関する研究

中村 学[†] 川口 佳樹^{†*} 岩根 典之[†] 大槻 説乎^{†**}
松原 行宏[†]

A Study on Effective Comprehension Support by Assortment of Multiple Comprehension Support Methods

Manabu NAKAMURA[†], Yoshiki KAWAGUCHI^{†*}, Noriyuki IWANE[†],
Setsuko OTSUKI^{†**}, and Yukihiro MATSUBARA[†]

あらまし 理解支援手法には長所と短所が存在する．よって，ある支援を行う上で効果的な理解支援手法でも，別の支援領域では効果が期待できず，逆に学習の行き詰まりの原因となる可能性がある．しかし，理解支援手法の長所と短所は相補的な役割を果たす．これらを考慮し，理解支援手法が相補的に役割を果たすように組み合わせることで，より効果的な理解支援が可能になると考えられる．本研究では，複数の理解支援手法をもつ複合学習環境を作成し，評価実験を行った．これにより理解支援手法の長所と短所を確認し，複数の理解支援手法を複合的に利用することによる効果を示す．

キーワード 理解支援手法，理解支援手法の複合化，複合学習環境

1. ま え が き

これまで，様々な理解支援手法が提案，開発されてきた[1]～[7]．CAI (Computer Assisted Instruction), ITS (Intelligent Tutoring System), ILE (Interactive Learning Environment), CSCL (Computer Supported Collaborative Learning), テキスト，静止画・動画，アニメーション・シミュレーションなどが挙げられる．これらの理解支援手法には，その目的の違いにより，長所と短所が存在する．よって，ある支援を行う上で効果的な理解支援手法でも，別の支援領域では効果が期待できず，逆に学習の行き詰まりの原因となる可能性がある．しかし，理解支援手法の長所と短所は相補的な役割を果たす．よって，理解支援手法の短所を別の理解支援手法の長所で補うことができる学習環境を作ることによって，短所による学習の行き詰まりを防ぎ，長所を生かした理解支援が可能であると考えられる．例えば，テキストによる受動的な学

習だけでは学習意欲をそぐおそれがある．このとき，学習者主導性という長所をもつ ILE のような理解支援手法を併用することにより，テキストの短所を補うことができると考えられる．このように，理解支援手法の短所を別の理解支援手法の長所で補完するためには，理解支援手法の複合化が必要である．複合化することで，学習者は複数の理解支援手法を必要に応じて複合的に利用することができる．本研究では，初等力学における単振り子を対象とした複数の理解支援手法をもつ複合学習環境を作成し，評価実験を行った．これにより，理解支援手法がもつ長所と短所を確認した．また，これらの特徴を考慮し，理解支援手法を複合化することにより，効果的な支援が可能になることを確認した．そして，より多面的，総合的な理解を支援するためには，複数の理解支援手法を複合的に利用することが望ましいことを示す．以下，2. において理解支援手法の特徴について述べ，3. において理解支援手法の複合化について述べる．4. において作成した複合学習環境について述べ，5. において評価実験について述べ，6. においてその結果の検証，考察を行う．最後に，7. においてまとめを行う．

[†] 広島市立大学情報科学部，広島市
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University,
Hiroshima-shi, 731-3194 Japan

* 現在 (株) エネルギア・コミュニケーションズ

** 現在，広島市立大学名誉教授

2. 理解支援手法の特徴

理解支援手法は、それぞれ長所と短所をもっている。ここでは特に、テキスト、ILE、ITS がもつ長所、短所について述べる [7]。

(1) テキストは、教科書がもつ系統的な教示機能をもつ。長所として、系統的な学習が可能であり、学習者が初めて出会う対象であっても比較的容易に知識を直接伝達できる。また、ハイパーリンクや、索引により辞書の利用が可能である。一方、短所としては、受動的な学習だけでは学習者の主体的な学習意欲をそぐおそれがある。また、動きのある学習対象の場合、それを直感的にイメージすることが難しい。更に、学習者は用意されたものからしか情報を得ることができないことなどが挙げられる。通常 (2) ILE (3) ITS は、学習対象に関する説明としてテキストをもつ。

(2) ILE は、マルチメディア技術を用いることにより、グラフィックスやアニメーションによるシミュレータ環境を中心とした直感的で分かりやすい学習環境を実現し、学習者の発見的、創造的な学習を支援する。これにより学習者主導性という優れた性質をもつ。ILE は、学習者が対象を直接操作し、引き起こされる状態変化を観察することによって学習を行うための学習環境である。ILE の長所として、光、音、力、速度のような直接的には目に見えない自然現象や数直線や図形のような数学的な概念など、現実世界では見ることができなかった対象も含めて視覚化した実験環境を実現することができる。更に、仮説構成、実験、検証を繰り返す試行錯誤を通じて、学習者が主体的に自分のメンタルモデルを正しい方向に再構成することを支援する可能性をもっていることなどが挙げられる。一方、短所としては、学習者が行き詰まったときに助言を与えたり、質問に回答できないこと、比較的高度な学習スキルが要求されることなどが挙げられる。

(3) ITS は知識処理を導入し、学習者の問題解決過程を推測することによって学習者の理解状態をモデル化し、モデルに基づいて学習支援を行う。ITS の長所としては、システム自身が正しい解答を導出でき、その導出過程に基づき、学習者の解答、質問に応じた説明を提示できることである。また、学習者の解法や誤り原因を推定でき、これらを用いて学習者モデルを生成でき、学習者に応じた指導方略をとることが挙げられる。一方、短所としては、領域を限定して完全な知識を用意することはできても、学習者の質問及び

解答はしばしばこの範囲を超え、学習者の意図に沿って適切な学習支援を常に行うことは困難であることなどが挙げられる。

3. 理解支援手法の複合化

2. において述べたように、理解支援手法には効果的な支援が可能 (得意) な領域、また支援が不十分となる不得意な領域が存在する。よって、一つの理解支援手法により単独で支援を行う場合、不得意な領域において効果的な支援が困難となる。そこで、学習者は学習に行き詰まったり、迷子になってしまうおそれがある。これを防ぎ、効果的な理解支援を行うためには、理解支援手法を複合的に利用できることが望ましい (図 1)。

例えば、テキストによる受動的な学習だけでは、学習者の学習意欲をそぐおそれがある。これは、直接操作及び学習者主導性という特徴をもち、学習者の興味をひくことができる ILE により補完できる。しかし、ILE では行き詰まったり、迷子になった学習者に助言を与えたり質問に答えることができない。これは、学習者の質問に対して解答できる ITS により補完できる。しかし、ITS では限られた領域知識の範囲内では質問応答はできない。これは、仮説構成、実験、検証を繰り返す試行錯誤を通じて、学習者が主体的に自分のメンタルモデルを正しい方向に再構成することを支援する可能性をもっている ILE により補完できる。このように理解支援手法の短所を別の理解支援手法の長所で補うことで、学習の行き詰まりを防ぎ、より多面的、総合的な理解を達成することが期待される。

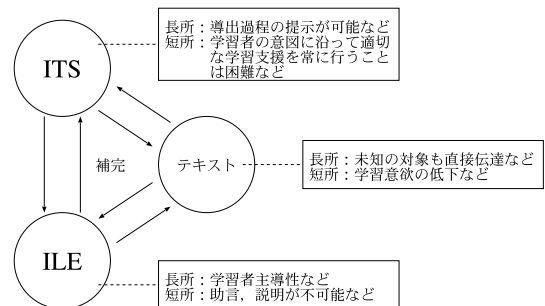


図 1 理解支援手法の相互補完
Fig. 1 Complementary roles among comprehension support methods.

4. 複数の理解支援手法をもつ複合学習環境

理解支援手法には長所と短所が存在し、これが学習の行き詰まりや迷子の原因となると考えられる。しかし、相補的な役割を果たすと考えられる部分も多い。

本研究では、理解支援手法の短所を別の理解支援手法の長所で補うことで、より効果的な理解支援を行うことができる、理解支援手法の複合化を提案する。理解支援手法の長所と短所を明らかにし、複合的に利用することによる効果を実際に検証するために、初等力学における単振り子を対象とした複数の理解支援手法をもつ複合学習環境を試作した。複合学習環境は、具体的な理解支援手法として、(1)単振り子のテキスト(2)単振り子シミュレータをもつマイクロワールド(以下、マイクロワールドと略記)(3)定性推論 QSIM (Qualitative Simulation)[8]、比較推論 DQ 解析 (Differential Qualitative Analysis)[9] による質問応答システム(以下、質問応答システムと略記)の三つをもつ。それぞれの特徴を簡単に説明する。

(1) 単振り子のテキストでは、対象となる単振り子に関する物理量の定義、変位 x 、加速度 a 、速度 v 、周期 T の公式、速度 v と加速度 a のグラフを提示した(図 2)。

(2) マイクロワールド [10] は (2) ILE の機能を

実現したものであり、複数の単振り子シミュレータをもつ(図 3)。ただし(1)テキストをもっていない。学習者は、単振り子の初期位置(初期角度) θ 、糸の長さ l 、重りの重さ m 、重力加速度の大きさ g などの物理量を変更し、単振り子の運動を観察することができる。このとき、実際の物理系では観測が容易でない重りの加速度 a 、速度 v 、重力 mg 、張力 $mg \cos \theta$ 、推進力 $mg \sin \theta$ などの物理量の大きさを可視化することも可能である。また、学習者は条件の異なる物理系の単振り子を同時に動かす、その挙動の違いを観察することもできる。複数の単振り子シミュレータを提供することにより、複数の現象を比較し、内在する物理法則などを発見的に学習することを支援する。例えば、右の物理系において重力加速度の大きさ g_2 のみをデフォルト値 g_1 の 1/2 に変更し、左右二つの物理系の単振り子を同時に運動させると、デフォルトの状態(左の物理系の単振り子の周期 T_1)と比較し、右の物理系の単振り子の周期 T_2 が大きくなる(初期状態と同じ状態になるまでに多くの時間がかかる)ことを観察することができる(図 4)。

(3) 質問応答システム [11] は (3) ITS の機能の一部を実現したものであり、学習者の質問に対して、定性推論 QSIM と比較推論 DQ 解析を用いて解を導出し、応答することができる(図 5, 図 6)。ただし、(1)テキストをもっていない。また、学習者の問題解決過程を推測することによって学習者の理解状態をモデル化し、モデルに基づいて学習支援を行う機能はない。定性推論による質問応答の機能として、学習者は物理系の振りいやその理由に関してシステムに対して質問を行うことができる。比較推論による質問応答の機能として、学習者はある物理量を変更した場合に物

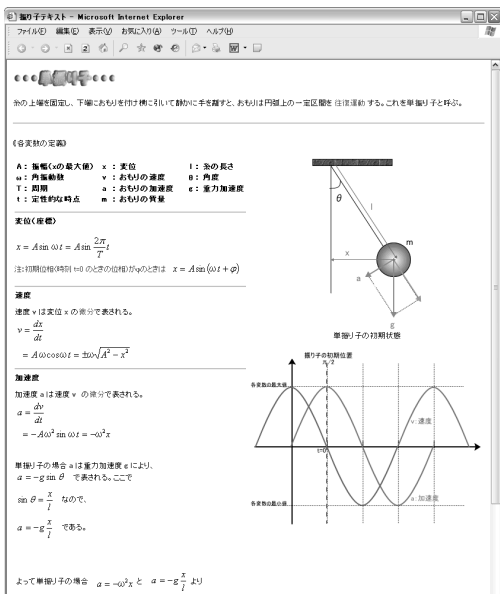


図 2 単振り子のテキスト
Fig.2 Text about pendulum.

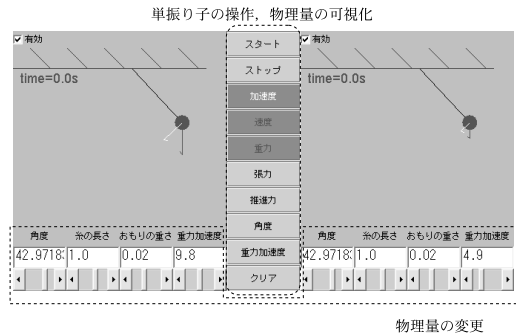


図 3 複数の単振り子シミュレータをもつマイクロワールド
Fig.3 Microworld with multiple pendulums.

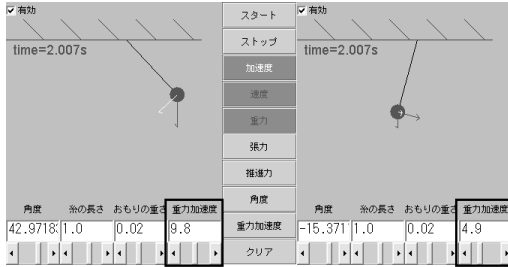


図 4 $2\pi \times \sqrt{l_1/g_1}$ 秒後の複数の単振り子（重力加速度の大きさ g_2 のみを g_1 の 1/2 に変更）

Fig. 4 Multiple pendulums after $2\pi \times \sqrt{l_1/g_1}$ s.

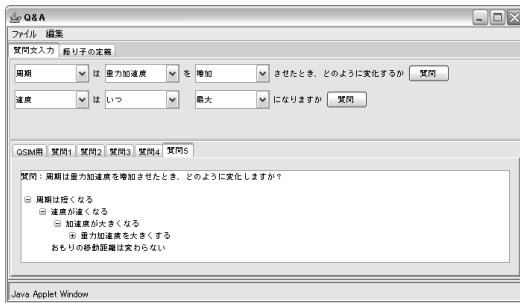


図 5 質問応答システム

Fig. 5 Q & A system.

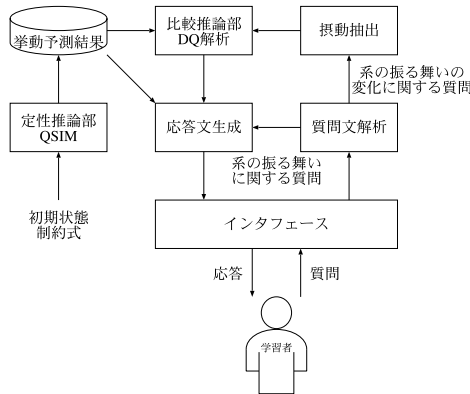


図 6 質問応答システムの構成

Fig. 6 Structure of Q & A system.

理系の振舞いの変化した理由に関してシステムに対して質問を行うことができる。

QSIM は、四則、微分、定性的比例関係により記述された定性微分方程式系、初期状態、各状態変数の領域に対する境界標の初期集合を入力とし、初期状態から始まる状態遷移木を対話的に出力するアルゴリズムである。エネルギー保存則により補強した QSIM によ

表 1 単振り子の定性的挙動

Table 1 Qualitative behavior of pendulum.

時点/時区間	時点 t_0	時区間 (t_0, t_1)
角度 θ	$\{\theta_0, \text{std}\}$	$\{(0, \theta_0), \text{dec}\}$
速度 v	$\{0, \text{dec}\}$	$\{(-\infty, 0), \text{dec}\}$
加速度 a	$\{-a_0, \text{std}\}$	$\{(-a_0, 0), \text{inc}\}$
時点/時区間	時点 t_1	時区間 (t_1, t_2)
角度 θ	$\{0, \text{dec}\}$	$\{(-\pi/2, 0), \text{dec}\}$
速度 v	$\{-v_0, \text{std}\}$	$\{(-v_0, 0), \text{inc}\}$
加速度 a	$\{0, \text{inc}\}$	$\{(0, g), \text{inc}\}$
時点/時区間	時点 t_2	時区間 (t_2, t_3)
角度 θ	$\{-\theta_0, \text{std}\}$	$\{(-\theta_0, 0), \text{inc}\}$
速度 v	$\{0, \text{inc}\}$	$\{(0, \infty), \text{inc}\}$
加速度 a	$\{a_0, \text{std}\}$	$\{(0, a_0), \text{dec}\}$
時点/時区間	時点 t_3	時区間 (t_3, t_0)
角度 θ	$\{0, \text{inc}\}$	$\{(0, \theta_0), \text{inc}\}$
速度 v	$\{v_0, \text{std}\}$	$\{(0, v_0), \text{dec}\}$
加速度 a	$\{0, \text{dec}\}$	$\{(-a_0, 0), \text{dec}\}$

り、単振り子の定性的挙動として表 1 に示す 8 状態における定性的物理量（値あるいはその範囲）とその定性的変化傾向を導く。ただし、定性的状態は時点、時区間を交互に繰り返す。また、物理量の定性的変化傾向は inc（増加）、std（変化なし）、dec（減少）により表現する。

これらの推論結果を自然言語に変換することにより、質問応答を行う。例えば、時点 t_3 において速度 v が極大（最大）であることは、加速度 a が直前の定性的状態である時区間 (t_2, t_3) において正の値（0 から a_0 の範囲）、時点 t_3 において 0、直後の定性的状態である時区間 (t_3, t_0) において負の値（ $-a_0$ から 0 の範囲）で減少傾向にあること、あるいは、速度 v の変化傾向が直前の定性的状態である時区間 (t_2, t_3) において増加傾向、時点 t_3 において変化なし、直後の定性的状態である時区間 (t_3, t_0) において減少傾向にあることから説明できる。

DQ 解析は、ある物理量の値を微小に増減させたとき、挙動の特微量がどのように変化するかについていくつかの因果規則を用いて推論するアルゴリズムである。DQ 解析は、ある系における QSIM の挙動予測結果、初期状態、摂動（微小に増減させた物理量）を入力とする。

例えば、重力加速度の大きさ g のみを小さくしたとすると、単振り子の周期 T は大きくなる（図 4）。このような摂動に対して、DQ 解析により以下に示す推論結果（物理量、変化傾向、視点（区間））を導く。ただし、 t_0, t_1 はそれぞれ初期状態と角度 θ が 0 になる時点を表し、“ \wedge ” は摂動を与えた物理系を表す。また、物理量の変化は \uparrow （増加）、 \parallel （変化なし）、 \downarrow （減少）により表現する。

- (1) $g \downarrow_{(0,1)}^x$: 初期摂動
- (2) $a \downarrow_{(0,1)}^x$: 代数的制約に関する規則（積）
- (3) $v \downarrow_{(0,1)}^x$: 区間導関数規則
- (4) $t_1 - t_0 > t_1 - t_0$: 区間規則

これらの推論結果 (1)~(4) を自然言語に変換することにより、質問応答を行う。

これら三つの理解支援手法には長所と短所がある。しかし、これらは相補的な役割を果たすので、これらを組み合わせて利用できる複合学習環境を作ることにより、長所で短所を補いながら、より効果的な理解支援を行うことができると考えられる。

5. 評価実験

5.1 目的

複数の理解支援手法を複合的に利用することによる効果を検証するために、評価実験を実施した。まず、それぞれの理解支援手法の得意な支援領域、不得意な支援領域を確認する。更に、それらの長所、短所を考慮して複数の理解支援手法を複合的に利用することが効果的であることを確認する。

5.2 実験環境と実験手順

用意した理解支援手法は (1) 単振り子のテキスト、(2) マイクロワールド、(3) 質問応答システムの三つである。これらの特徴を確認し、これらを組み合わせることによる有効性を検証するため、2. の考察（理解支援手法の特徴）に基づき、表 2 に示す 6 種類の問題を用意した。表中の「 \square 」は学習者がその問題について考える際にその理解支援手法による支援は比較的適している（良い効果がある）と考えられること、「 \square 」はあまり適していないと考えられることを示す

表 2 用意した問題
Table 2 Prepared questions.

問題	単振り子のテキスト	マイクロワールド	質問応答システム	問題文
問 1	▲	○	—	いつ加速度は最大になりますか？
問 2	▲	—	○	加速度を増加させると速度はどうなりますか？
問 3	—	▲	○	重力加速度が増加するとなぜ周期は変化しますか？
問 4	—	○	▲	単振り子に働く力を図示せよ。
問 5	○	—	▲	変位 x の微分は何を表しますか？
問 6	○	▲	—	単振り子の周期を重力加速度と糸の長さで表せ。

（「—」の理解支援手法は、比較対象でないことを示している）。

問 1 は、物理量が極値をとり得る時点を問う問題である (1) 単振り子のテキストは、物理量に関する数式を提示することができる。学習者は、提示された数式を微分し、変化傾向を調べる必要があると考えられる (2) マイクロワールドでは、物理量を可視化し、実験を行うことにより、学習者は容易に理解できると考えられる。問 2 は、ある物理量を変更した場合の物理系の振舞いの変化を問う問題である (1) 単振り子のテキストは、物理量に関する数式を提示することができる。学習者は、提示された数式に複数の数値を代入し、比較する必要があると考えられる (3) 質問応答システムでは、学習者は質問に応じた説明を容易に理解できると考えられる。問 3 は、ある物理量を変更した場合に物理系の振舞いが変化する理由を問う問題である (2) マイクロワールドでは、物理量を可視化し、実験を行うことにより、学習者が因果関係を推測することは困難であると考えられる (3) 質問応答システムでは、学習者は質問に応じた説明を容易に理解できると考えられる。問 4 は、物理量を図示する問題である (3) 質問応答システムでは、学習者が説明から物理量の向きを理解することは困難であると考えられる (2) マイクロワールドでは、物理量を可視化し、実験を行うことにより、学習者は容易に理解できると考えられる。問 5 は、物理量の因果関係に関する知識を問う問題である (3) 質問応答システムでは、物理系の振舞いやその理由、ある物理量を変更した場合に物理系の振舞いが変化した理由に関する説明から因果

関係を理解することは困難であると考えられる。(1) 単振り子のテキストは、物理量に関する数式を提示することができる。学習者は、提示された数式を容易に理解できると考えられる。問6は、物理量に関する知識(数式)を問う問題である。(2) マイクロワールドでは、物理量を可視化し、実験を行うことにより、学習者が数式を導出することは困難であると考えられる。(1) 単振り子のテキストは、物理量に関する数式を提示することができる。学習者は、提示された数式を容易に理解できると考えられる。

情報系の学部所属の大学生と同専攻に所属する大学院生(20~24歳)12名を被験者とし、事前テストにより成績が均等になるようにグループ分けを行った(実験への影響を避けるため、事前テストには本研究の複合学習環境が対象としている単振り子に関する問題ではなく、初等力学一般の問題を使用した)。以下に示す二つの評価実験を各問題において行い、その様子を撮影した。二つの評価実験が終了した後に、各問題において利用した理解支援手法が役に立ったかどうかを5段階で評価してもらった。その際、評価結果が成績の影響を受けることを避けるために、被験者には解答の正誤を知らせていない。

実験1: 一つの理解支援手法だけを利用 まず、Aグループに「 」の理解支援手法のみ、Bグループに「 」の理解支援手法のみを利用させ、解答させる。この結果を比較し、理解支援手法の長所と短所を確認する。

実験2: 複数の理解支援手法を複合的に利用 次に、A、B両グループに「 」と「 」両方の理解支援手法を利用させ、解答させる。一つの理解支援手法を単独で利用した場合と複数の理解支援手法を複合的に利用した場合とを比較し、複数の理解支援手法を複合的に利用する効果を検討する。

6. 実験結果と考察

実験を行った6問に関して正解率を表3に示す。学習者の理解を支援するためには、個々の知識項目まで踏み込む必要がある。しかし、評価実験において学習者の理解状態を詳細に把握するのは困難である。また、結果が煩雑になるおそれもある。よって、今回は正解・不正解のみで区別し、分析を行った。

6.1 理解支援手法の長所と短所

理解支援手法には長所と短所が存在するため、利用する理解支援手法が異なれば、正解率に差が生じるは

表3 実験結果
Table 3 Result of experimentation.

グループ	実験	理解支援手法	問題	正解率
A	1	▲	問1	0.33
			問2	0.83
			問3	0.00
			問4	0.33
			問5	0.50
			問6	0.00
			平均	0.33
	2	▲+○	問1	0.83
			問2	0.83
			問3	0.67
			問4	0.50
			問5	1.00
			問6	1.00
			平均	0.81
B	1	○	問1	0.83
			問2	1.00
			問3	0.33
			問4	0.33
			問5	0.83
			問6	0.67
			平均	0.67
	2	○+▲	問1	0.83
			問2	1.00
			問3	0.50
			問4	0.33
			問5	1.00
			問6	0.83
			平均	0.75

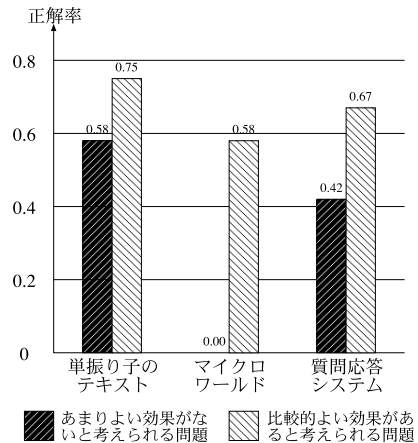


図7 正解率

Fig. 7 Rate of correct answer.

ずである。表3のA-1(Aグループ実験1)とB-1とを比較すると、Mann-Whitney検定により、母代表値に差があることが有意水準5%で判定できる。また、理解支援手法ごとに集計し直した結果を図7に示す。これらから、比較的適していると考えられる理解支援手法による支援の効果が確認できる。

6.2 被験者による理解支援手法に対する評価

図8は利用した理解支援手法が役に立ったかどうかを5段階で評価してもらった結果である。「 \triangle 」の理解支援手法を利用した場合はそれが役に立たないと評価した人が多く、「 \square 」の理解支援手法を利用した場合はそれが役に立ったと評価した人が多い。また、理解支援手法ごとに集計し直した結果を図9に示す。これから、あまり適していないと考えられる理解支援手法による支援が低く評価され、比較的適していると考えられる理解支援手法による支援が高く評価されており、被験者自身も利用した理解支援手法の効果を認識して

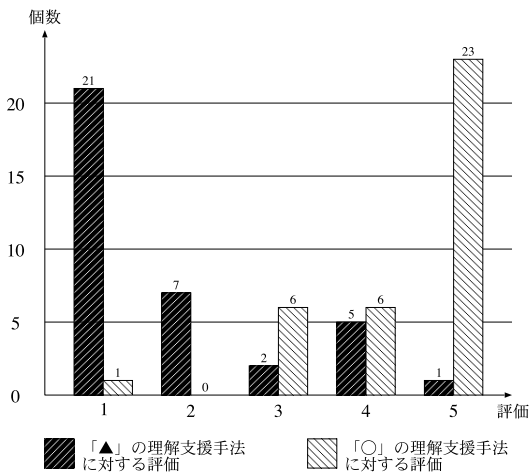


図8 被験者による理解支援手法に対する評価(1)
Fig. 8 Evaluation of comprehension support methods #1.

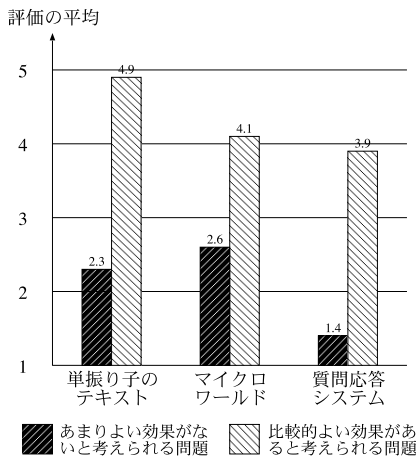


図9 被験者による理解支援手法に対する評価(2)
Fig. 9 Evaluation of comprehension support methods #2.

いることが分かる。

6.3 複数の理解支援手法を複合的に利用した効果

複数の理解支援手法を複合的に利用した効果について検証する。理解支援手法には長所と短所が存在するが、理解支援手法がお互いに長所で短所を補い、一つの理解支援手法による支援よりも効果的な支援が期待される。

まず、表3のA-1とA-2を比較する。Aグループの被験者には、はじめに「 \triangle 」の理解支援手法が提供された。このとき、効果的な支援は期待できず、正解率は比較的低い。その後、「 \square 」の理解支援手法が加えられる。この理解支援手法が加わり、二つの理解支援手法を利用することで正解率は大幅に上昇するという結果が得られた。A-1とA-2とを比較すると、Wilcoxon検定により、母代表値に差があることが有意水準5%で判定できる。同様に、A-1とB-2とを比較すると、Mann-Whitney検定により、母代表値に差があることも有意水準5%で判定できる。

次に、B-1とB-2、A-2を比較する。「 \triangle 」の理解支援手法のみよりも「 \triangle 」と「 \square 」の理解支援手法を複合的に利用した場合の方がわずかながら正解率が高い。Bグループの被験者には、はじめに「 \triangle 」の理解支援手法が提供された。このとき、理解支援手法の長所が効果的に働くため、一つの理解支援手法による単独の支援ではあるが、正解率が高い。しかし、B-1より「 \triangle 」と「 \square 」の理解支援手法を複合的に利用したB-2、A-2の方が正解率が高い。つまり、比較的適していると考えられる理解支援手法だけを提供するよりも、あまり適していないものも用意した方が正解率が高い。このように、一つの理解支援手法を単独で利用した場合よりも複数の理解支援手法を複合的に利用した場合の方が効果的であるという結果が得られた。ただし、これは複数の理解支援手法を複合的に利用した効果ではなく、理解支援手法を複数回利用した効果である可能性もある。しかし、後述するように、二つの評価実験において問題を解くまでに行った作業に違いが観察された。このような違いは一つの理解支援手法を複数回利用した場合にはあまり観察されず、その結果、正解率に変化は生じないのではないかと考えられる。これに関しては、本研究では十分に検証しておらず、今後の課題とする。

AグループとBグループは、最終的には用意された二つの理解支援手法を利用している点では等しい。しかし、理解支援手法の提供順序が異なることによ

て A-2 と B-2 の結果にわずかではあるが差が生じた。Mann-Whitney 検定により、母代表値に差があることが有意水準 5% で判定できる。問題を解くまでに行った作業に違いが観察された。「」の理解支援手法がはじめに提供される A グループでは、それを利用していかに正解にたどり着くか苦勞しているような場面が多く観察された。その後、「」の理解支援手法が提供されると、それを利用することにより解答が正しいことを確認したり、内省する作業も観察された。一方、「」の理解支援手法がはじめに提供される B グループでは、最初の段階である程度正解に近づける。その後、「」の理解支援手法が提供されると、困惑する場面が多く観察された。これにより、理解支援手法をただ数多く用意すればよい結果が得られるとは限らないことが考えられる。ただやみくもに多くの理解支援手法が提供されれば、学習者が困惑する原因となり得るからである。また、異なる学習プロセスを経るため、学習効果に差が生じる可能性もある。これらに関しては、本研究では検証しておらず、今後の課題とする。

6.4 被験者の成績と理解支援手法に対する評価
特徴的な結果が見られた被験者について考察する。

まず、B グループのある被験者について述べる。「」の理解支援手法だけを利用したときには正解に到達できなかったものの、「」と「」の理解支援手法を利用したときに正解に到達した被験者が数名確認できた。このうち 1 名の成績と理解支援手法に対する評価を図 10、図 11 に示す。例えば、問 5 において「」の理解支援手法を利用したときには不正解であったが、その後、「」と「」の理解支援手法を利用したときに正解に到達した。しかし、「」の理解支援手法に対

する評価はあくまでも低い。よって、後から提供された「」の理解支援手法による支援はそれほど効果的ではなかったものの、正解を導くきっかけになったのではないかと考えられる。これも複数の理解支援手法を複合的に利用した効果だと考えられる。

次に、A グループのある被験者の成績と理解支援手法に対する評価を図 12、図 13 に示す。問 2 に着目すると、この問題において被験者は二つの理解支援手法両方を低く評価している。これは、「」の理解支援手法のみが提供された段階で正解に到達しているだけでなく、特に支援されなくても正解に到達できたのではないかと考えられる。よって、被験者の理解度に応じた適応的な支援を提供する必要があると考えられる。

6.5 評価実験のまとめ

以上の結果より、本研究で確認できたことを以下に示す。

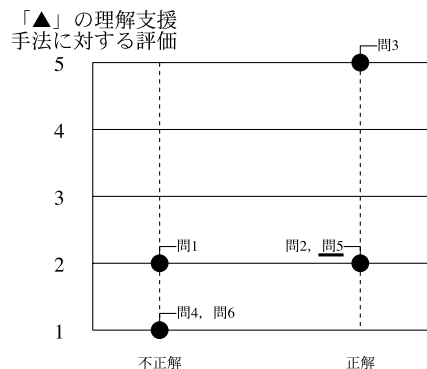


図 11 B グループ実験 2 におけるある被験者の成績と理解支援手法に対する評価
Fig. 11 Testee's record and evaluation #2.

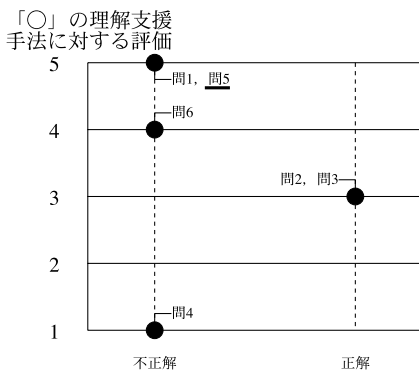


図 10 B グループ実験 1 におけるある被験者の成績と理解支援手法に対する評価
Fig. 10 Testee's record and evaluation #1.

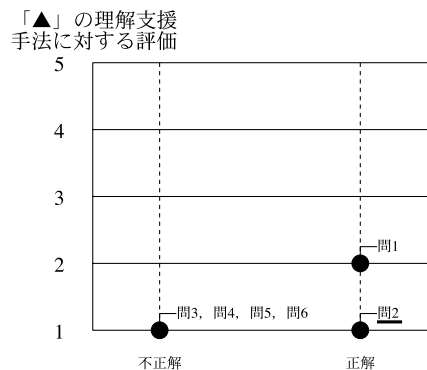


図 12 A グループ実験 1 におけるある被験者の成績と理解支援手法に対する評価
Fig. 12 Testee's record and evaluation #3.

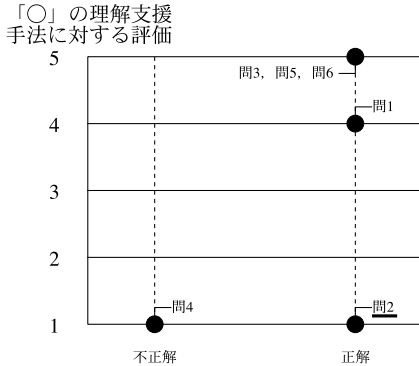


図 13 A グループ実験 2 におけるある被験者の成績と理解支援手法に対する評価

Fig. 13 Testee's record and evaluation #4.

(a) 理解支援手法の長所と短所のいくつかを確認できた (1) 振り子のテキストでは、比較的容易に知識を直接伝達できた (2) マイクロワールドでは、力、速度のような直接的には目に見えない自然現象など、現実世界では見ることができなかった対象も含めて視覚化することにより、学習者は物理量が極値をとり得る時点などを理解できた (3) 質問応答システムでは、システム自身が正しい解答を導出でき、その導出過程に基づき、学習者の質問に応じた説明を提示することにより、学習者はある物理量を変更した場合に物理系の振舞いが変化する理由などを理解できた。逆に、他の理解支援手法では、あまり良い効果がなかった。

(b) 一つの理解支援手法を単独で利用した場合よりも、複数の理解支援手法を複合的に利用した方が効果的であることが実験により示された。

(c) (a) (b) より、学習環境を構築するためには (1) 単振り子のテキスト (2) 単振り子シミュレータをもつマイクロワールド (3) 定性推論 QSIM, 比較推論 DQ 解析による質問応答システムなどの理解支援手法による単独の支援では効果的な支援が期待できない面がある。より多面的、総合的な理解を支援するには、それぞれの理解支援手法の特徴を考慮し、相互補完が望める複合学習環境を構築することが望ましい。

7. むすび

本論文では、理解支援手法の複合化による効果的な理解支援について述べた。まず、様々な理解支援手法がもつ短所を別の理解支援手法の長所で補うことにより、学習の行き詰まりを防ぎ、より効果的な支援を行うため、複数の理解支援手法をもつ複合学習環境を提

案した。また、複合学習環境の効果を検証するため、初等力学 (単振り子) の複合学習環境を作成した。複合学習環境は (1) 単振り子のテキスト (2) 単振り子シミュレータをもつマイクロワールド (3) 定性推論 QSIM, 比較推論 DQ 解析による質問応答システムの三つから構成される。この複合学習環境を用いた評価実験を行い、それぞれの理解支援手法の得意な支援領域と不得意な支援領域を確認した。また、この理解支援手法の長所と短所を考慮した相補的な組合せにより複数の理解支援手法を複合的に利用することで、一つの理解支援手法を単独で利用する場合よりも効果的な支援が可能であることを示した。この結果より、より多面的、総合的な理解を支援するには、単独の理解支援手法による支援より、複数の理解支援手法を組み合わせて支援を行うことが望ましいことを確認した。今後の課題として、本研究で作成した三つの理解支援手法以外の理解支援手法を複合学習環境に取り入れ、更に理解支援手法同士の相互補完の関係を築くことが挙げられる。これにより、複合化する理解支援手法が多ければ多いほどその効果が上がるのか、逆に学習者が困惑し逆効果となるのかを検証する。また、今回は学習対象を単振り子とした複合学習環境を試作したが、更に別の学習対象に関しても実験を試みるが残されている。更に、理解支援の効果に対するインタフェースのデザイン (見せ方) の影響は大きいので、今後これらも考慮する必要がある。

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究 (15020247) による。

文 献

- [1] R. Mizoguchi, "Intelligent tutoring systems—The current state of the art," IEICE Trans., vol.E73, no.3, pp.297–307, March 1990.
- [2] 坂元 昂, 清水康敬, "教育工学の展開," 信学論 (A), vol.J75-A, no.2, pp.159–163, Feb. 1992.
- [3] 岡本敏雄, "ITS/知的 CAI システムの概観," 日本教育工学会誌, vol.15, no.4, pp.197–204, 1992.
- [4] T. Okamoto, "The current situations and future directions of intelligent CAI research/development," IEICE Trans. Inf. & Syst., vol.E77-D, no.1, pp.9–18, Jan. 1994.
- [5] 溝口理一郎, "知的教育システム," 情報処理, vol.36, no.2, pp.177–186, 1995.
- [6] 坂元 昂, "電子情報通信技術の教育応用研究開発の現状と課題," 信学論 (D-II), vol.J80-D-II, no.4, pp.829–834, April 1997.
- [7] 大槻説乎, "知的学習環境の構成論," 信学論 (D-I), vol.J83-D-I, no.6, pp.515–522, June 2000.

- [8] B. Kuipers, "Qualitative simulation," *Artif. Intell.*, vol.29, pp.289-338, 1986.
- [9] D.S. Weld, "Comparative analysis," *Artif. Intell.*, vol.36, pp.333-373, 1988.
- [10] 中村 学, 吉村 洋, 川口佳樹, 岩根典之, 大槻説乎, 松原行宏, "複数の単振り子シミュレータを持つ初等力学のマイクロワールド," *ヒューマンインターフェイスシンポジウム論文集*, pp.667-670, 2003.
- [11] Y. Kawaguchi, H. Mori, M. Nakamura, and S. Otsuki, "A study on assistance in acquiring meta-cognition through assorting support methods for comprehension," *Proc. International Conference on Computers in Education*, vol.I, pp.104-105, 2002.

(平成 16 年 4 月 1 日受付, 8 月 6 日再受付)



中村 学

1995 九工大・情報工卒。1997 同大学院・同研究科(博士前期課程)了。同年同大学院・同研究科(博士後期課程)退学。同年広島市立大学情報科学部助手。博士(情報工学)。知的教育システム等の研究に従事。教育システム情報学会, 人工知能学会,

情報処理学会各会員。



川口 佳樹

2002 広島市大・情報科卒。2004 同大学院・同研究科(修士課程)了。同年(株)エネルギー・コミュニケーションズ入社。在学中は知的教育システム等の研究に従事。



岩根 典之 (正員)

1983 広島大・総科卒。1986 同大学院修士課程了。同年沖電気工業(株)入社。1994 広島市立大学情報科学部助手。1997 同助教授。工博。知識情報処理の研究に従事。情報処理学会, 人工知能学会各会員。



大槻 説乎 (正員)

1955 京大・理卒。京都大学助手, 名古屋大学助手, 九州大学助教授, 九州工業大学教授, 広島市立大学教授を経て, 現在広島市立大学名誉教授。工博。教育情報工学, 知識情報工学, 知的マルチメディア情報処理等の研究に従事。教育システム情報学会理事, 人工知能学会評議員, 情報処理学会, 教育工学会各会員。1989 山内記念会業績賞, 情報処理学会 1991 年度研究賞, 人工知能学会 1992 年度, 1995 年度及び 1997 年度研究奨励賞, 1993 ICCE "BEST PAPER AWARD", 人工知能学会 2003 年度業績賞各受賞。



松原 行宏 (正員)

1987 広島大・工・第二類卒, 1989 同大学院工学研究科博士課程前期了。同年同大・工・助手, 1998 香川大・工・助教授を経て, 2003 広島市大・情報科学部・教授。博士(工学)。知識工学, 知的教育システム, 感性工学, ヒューマン・インタフェースに関する研究に従事。1997, 2000~2001 ノッティンガム大学(英国)客員研究員。情報処理学会, 人工知能学会, 教育システム情報学会, 日本人間工学会, 日本感性工学会, IEA, AACE 各会員。