

メタ認知を活性化する学習支援システム

Computer-Based Scaffolding of Metacognition

平嶋 宗
Hirashima Tsukasa

九州工業大学情報工学部
Kyushu Institute of Technology

In this paper, we introduce several support methods for reflection in a metacognitive process. Then, we propose a framework for error-visualization in order to pull the trigger of the reflection. If a learner only monitors his/her action or results of it, he/she doesn't reflect them. Only when a learner finds something strange, the learner is motivated to carry out the reflection. In other words, when a learner is aware of a problem in his/her action or results, he/she motivates to reflect his/her knowledge. To visualize the difference is a promising approach to scaffolding the reflection. In this paper, we introduce Error-Based Simulation (EBS) as a method to visualize the difference. Control of the visualization is also described.

1. はじめに

メタ認知とは、自身の認知過程そのものを対象とする認知活動であり、人間の問題解決の遂行や学習において重要な役割を果たしていることが指摘されている[岡本 00]。このメタ認知を行う能力は、発達的に獲得されるものであるが、それを活性化することは必ずしも簡単でないことが知られている。このため、メタ認知を活性化する方法を探ることは、学習、特に課題遂行の熟達化という観点から、重要な課題とされている。本稿では、メタ認知活動の中でもリフレクションと呼ばれる活動を取り上げ、計算機によるその活性化支援を取り上げる。

リフレクションとは、「自分の行った課題遂行やそこで用いた知識を振り返って再検討し、修正・洗練する」活動のことであり、メタ認知活動の一つとして位置付けることができる。学習者にとってのリフレクションの困難さは、対象が自身の認知活動という具現化されていないものであることにある。最も初期に計算機メディアを用いたリフレクション支援の有効性を主張したコリンズら[Collins 88]は、課題遂行プロセスを学習者が直接認識できるようにすることでリフレクションが促進されると考え、代数の式変形や幾何の証明等を対象として、学習者が自身の課題遂行過程を試行錯誤も含めて簡単に記述することのできる環境を実現している。この環境では、自身の課題遂行過程が明示的に記述されており、その吟味や修正といったことを認知活動として行うことができる。つまり、リフレクションの対象となる認知活動を外化し、メタ認知としてではなく認知として処理できるようにすることで、リフレクションを支援していることになる。認知活動の外化によるリフレクションの認知活動化は、計算機メディアを用いたリフレクション支援の基本的なアプローチといえ、本稿では、このアプローチに基づくリフレクションの支援について取り上げる。

以下本稿では、これまでに行われてきている計算機によるリフレクションの支援について分類整理を試みる。さらに、リフレクションの知的支援の一つとして位置付けることのできる、「EBSによる誤りの可視化」に関して説明する。

2. リフレクションの支援

リフレクションは、単なる振り返りではなく、問題点の発見と修

正を含んだ活動である。したがって、問題点を発見したりそれを修正したりすることが、学習者にとって容易な表現を用いることが求められる。コリンズら[Collins 88]はこれを「適切な粒度(grain size)の選択」と呼んでいる。この観点から、リフレクションの支援を分類する指標の一つとして、どのような表現を用いて外化を行っているかを表す、(1)外化表現、の検討が必要となる。さらに、単に外化された表現を提供するだけでなく、必要に応じて問題点の焦点化や外化表現の変換あるいはアドバイスなどの積極的な支援を行うためには、外化されたものから学習者が発見すべき問題点をシステムが把握していることが望まれる。これを(2)制御可能性、と呼ぶ。以下では、この二つの指標に基づいて、リフレクションの支援についての分類を試みる。

2.1 外化表現

外化表現は、(1a)記録・再生レベル、(1b)構造化/抽象化レベル、(1c)写像レベル、の三つに分けることができる。記録・再生レベルでは、記録した学習者の行為を単に再生するだけである。ビデオで学習者の振る舞いを記録し、それを再生して見せるといったリフレクションの支援は、記録・再生レベルである。また、メイルや掲示板における議論を記録し、それをそのまま提示することでリフレクションを支援する場合も、この記録・再生レベルといえる。協調学習の効果の一つとしてリフレクションの促進を挙げることがあるが、これは同等他者の振る舞いを観察することで、記録・再生レベルと同等の外化表現が得られるためである。

外化表現を、学習者の行っている認知活動と親和性の高い表現にしたものが、構造化/抽象化レベルである。コリンズら[Collins 88]の紹介している ALGEBRALAND や Geometry Tutor などのリフレクション支援環境では、課題解決プロセスを記述するツールを学習者に提供し、そのツールを用いて学習者自身が自分の課題解決プロセスを記述することで、外化表現が生成される。この構造化/抽象化レベルの外化表現は、学習者の認知活動との親和性や学習者による記述容易性の向上を目指して盛んに研究されており、計算機を用いたリフレクション支援に関する研究の中心的な課題となっている。

記録・再生レベルや構造化/抽象化レベルでは、学習者が振り返れるようにすることが主な目的であった。これに対して、課題解決過程や知識に存在する問題点を発見できて初めてリフレクションが意味を持つことに注目し、問題点を学習者にとって

分かりやすい形で提示しようという試みが写像レベルである。ここでの写像とは、ある表現上では目立たない問題点を、別の表現上に写像し顕在化することである。筆者らは、学習者の導いた誤りをその誤りが顕在化される表現上に写像することによって可視化するという「誤り可視化」の枠組みを提案し、(1)力学の運動方程式の立式の誤りを不自然な運動に写像することによる可視化[平嶋 98]、(2)ブロッカーボックスモデルを用いた筆算のバグの可視化[平嶋 01]、(3)英作文の誤りのアニメーションによる可視化[Kunitika 03]などを実現している。ある目的を持って物事を伝えたい場合、その物事をありのまま正確に伝えるよりも、その目的に沿って取捨選択や抽象化、誇張などの表現の加工を行ったほうが、伝えたいことがより正確に伝わることが多い。コリンズらは、これを「認知的忠実性 (cognitive fidelity)」と呼んでいるが、この写像レベルは、「認知的忠実性」を実現する試みの一つと位置付けることができる。写像レベルを実現する上で、学習者が発見すべき問題点の把握が重要となるが、これについては次の制御可能性において説明する。

2.2 制御可能性

制御可能性は、外化した表現から学習者が発見すべき問題点をシステムがどの程度把握しているかを表すものであり、(2a)単純提示レベル、(2b)相対提示レベル、(2c)顕在化提示レベルの三つに分けることができる。外化表現を提供するのみで、その表現から学習者がどのような問題点を発見すべきかについてはシステム側で把握しない場合が単純提示レベルである。この場合、システムは学習者の行っているリフレクションに関して積極的な支援は行うことはできない。認知活動を外化した時点ですでにそれ以前に比べてリフレクションに関して大きな補助を行えていることと、リフレクションという高度に個別な活動に対して積極的な支援を行うことは比較的大きなリスクを伴うことを考えた場合、単純提示は現実的な選択肢といえ、多くのリフレクション支援環境は単純提示レベルに留まっている。

相対提示レベルとは、他者や理想的 / 標準的な認知活動についての外化表現をシステムが持っており、それとの比較において学習者がリフレクションの際に発見すべき問題点を把握している場合である。この制御レベルにおいては、学習者が気づくべき問題点や他者との差分を指摘し、考えさせるという積極的な支援が可能であり、リフレクションに対する個別対応が実現できる。

外化の目的は問題点を学習者に気づきやすい形で提示することであり、したがって、その問題点が実際に気づきやすい形で提示されているかどうかは、リフレクションの支援効果に大きな影響を与える。学習者に気づかせようとしている問題点が、気づきやすく提示されているかどうかについての判断をシステムに行わせるのが、顕在化提示レベルである。筆者らは、誤りの可視化において写像レベルの外化表現を採用しているが、この際、写像された誤りが学習者にとって分かりやすい、つまりこの場合明らかに不自然なものとなっているかどうかを診断する手法を実現している[平嶋 98 堀口 01]。認知的な忠実性を重視した外化表現は、物理的には正確でない部分を含んでいる場合があり、学習者に誤解を与える危険性がある。したがって、生成した外化表現が学習者にとってどのように解釈されるのかを見積もることが求められることになり、その運用には顕在化提示レベルの制御可能性は不可欠であるといえる。写像レベルの外化表現を、顕在化提示レベルで運用することは、ユーザに応じた分かりやすい表現を選択提示しようという知的メディアの目指していることと一致しており、人工知能研究という観点からも、リフレクションの支援は追求すべき課題を多く含んでいるといえることができる。

2.3 リフレクション支援の分類

外化表現と制御可能性の二つを軸として行ったリフレクションの支援の整理を表 1 に示した。相対提示以上の制御可能性を満たすためには、外化表現の意味をシステム側が理解している必要がある。記録再生レベルの外化表現では、その意味を計算機に解釈すること自体が極めて難しい課題となっており、相対提示以上の制御可能性を持たすのは極めて困難である。概念マップは、構造化された表現ではあるものの、学習者による記述の自由度を優先することが多く、その意味を計算機が解釈することが困難なものとなっている。このため、制御可能性は単純提示レベルである。

ALGEBRALAND や Geometry Tutor は、構造化された記述を用いて外化を行うと共に、その外化表現をシステムが解釈する機構を備えている。このため、相対提示レベルの制御可能性を有しているといえる。Spatial Reification は、スポーツにおける動作などのリフレクションにおいて、その動作を特徴付けるパラメータのグラフを示すことなどによって、たとえばビギナーの動きとエキスパートの動きを比較できるようにしようというものであり、外化表現としては写像レベルにあるが、システムはその動きの解釈を行っていないことから、制御可能性としては単純提示レベルである。

ブロッカーボックスモデルによる多桁減算のバグの可視化とアニメーションによる英作文の誤りの可視化は、共に写像レベルの外化表現の例であると共に、それぞれどの部分が誤りとなっているかをシステムが把握していることから、相対提示レベルの制御可能性を有している。しかしながら、これらの研究においても、写像されたものが学習者にとって分かりやすい差異の提示になっているかどうかまではシステム側には把握されていない。力学問題に対する誤った立式に基づいて生成される挙動シミュレーションである EBS(Error-Based Simulation)では、学習者に提示されている外化表現による誤りの顕在性を考慮した制御を行っており、顕在性提示レベルの制御可能性を有している。以下、3. においては、この EBS の枠組みと、そこで実現されている知的制御について述べる。

表 1 リフレクションの支援

	単純提示	相対提示	顕在化提示
記録・再生	ビデオ再生		
構造化	概念マップ	ALGEBRALAND Geometry Tutor	
写像	Spatial reification	Block-Box Model 英作文の動画化	EBS

3. EBSにおけるリフレクションの知的支援

以下では、まず EBS において想定されているリフレクションの喚起のモデルについて説明する。そして、EBS による誤りの可視化の枠組みとその適応的制御について概説する。

3.1 リフレクションの喚起のモデル

筆者らが想定しているリフレクションの喚起プロセスを図 1 に示した。まず、ある環境が存在し、その環境についての知識を学習者が持っていることが前提となる。そして、(1) 認知モジュールにおいて何らかの推論が行われ、その結果が得られるとする。これを「実験」とたとえると、知識は「仮説」であり、結果は「予

測」に相当する。この際、必要があれば環境に対する具体的な操作が行われることになる。次に、(2)環境の変化が観測される。そして、(3)この観測結果は「予測」と照合して評価される。この評価において許容できない食い違いが発生していると認識されたとき、認知的葛藤が生じる。そして、(4)この認知的葛藤がメタ認知モジュールを起動し、認知モジュールで行われた推論や、そこで使われた知識を再検討し、知識の再構成が行われることになる。

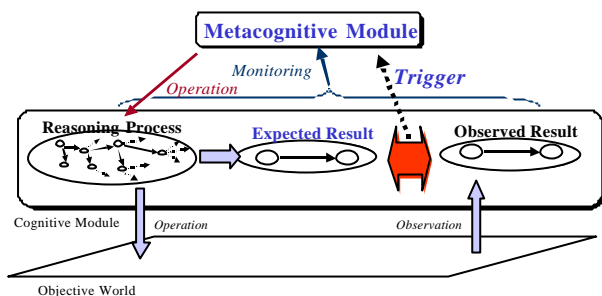


図1 リフレクション喚起のモデル

3.2 EBSの仕組み

観測結果と予測結果にズレが生じていれば、自分の考えや知識を再検討するに十分なはずである。しかしながら、(I)ズレを認識できない、あるいは(II)その重要性を認識できない、といった理由でリフレクションが喚起されない場合が多いといえる。このようなリフレクションを喚起する上での障害を解消する一つの方法として、表現形式を変えてそのズレが学習者にとって認識しやすいものにする方法が考えられる。これを「誤りの写像による誤りの可視化」と呼んでいる。EBSは、力学問題に対する立式を対象とした「誤りの写像による誤りの可視化」の例である。

EBSの仕組みを図2に示した。まず、力学の立式問題に対して学習者が誤った方程式を立てたとする。この方程式の誤りを数式の世界で学習者に気づかせるのは、多くの場合難しいといえ、誤りを直接指摘する否定的フィードバックが一般的である。これに対してEBSでは、学習者の立てた誤った式を、シミュレーション世界の挙動に写像する。具体的には、誤った式より速度あるいは加速度などを計算し、得られた値を用いてその式の対象となっている物体を運動させることにより、生成している。このようにして生成されるEBSは学習者の立てた式に従うとしたら物体はどの挙動してしまうかを提示しており、学習者の誤りを肯定的に捉えたフィードバックとなっている。

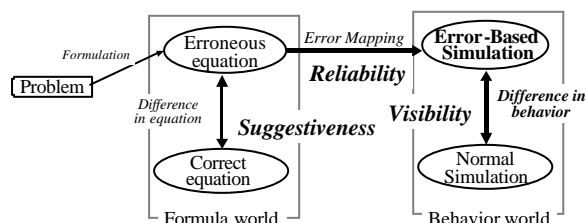


図2 EBSによる誤り可視化の仕組み

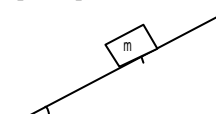
EBSは誤った方程式に従って生成されるために、必ず誤りを含んでおり、したがって、正しい挙動との間に差異を生じる。しかしながら、その誤りが顕在化されるためには、それだけでは不十分である。まず、3.3において、誤りが「顕在化」されるための

条件について述べる。また、EBSは、方程式上の誤りを挙動に写像しているが、この際、パラメータの変動などの様々な工夫を行なっている。この工夫を行なうことにより、EBSによって誤りを顕在化できる範囲が広がるが、その反面、顕在化された誤りが作動的に見られる場合があり、信頼性が落ちることになる。これを誤り写像の「もってもらしさ」と呼び3.4において検討する。誤りの顕在性ともってもらしさを備えたEBSが提示されれば、リフレクションが喚起されることが期待できるが、さらに、そのリフレクションによる知識の修正がスムーズに行なわれるためには、誤り修正への示唆性が重要となる。この誤り修正への示唆性については、3.5で述べる。

3.3 顕在性

EBSによる誤りの可視化においては、学習者が正しい挙動を知っていることが前提となる。また、EBSは誤った方程式から生成されるため、必ず正しい挙動と差を生じる。この差によって、誤りが顕在化されることになる。しかしながら、EBSと正しい挙動との差が常に学習者にとって気づけるものになるわけではない。たとえば、図3の問題で学習者が方程式Bと間違った場合には、ブロックは斜面を登っていくことになり、誤りが顕在化されるが、方程式Cを作ったような場合には、ブロックは斜面を下向きに加速しながら進むことになり、挙動において誤りが顕在化されるとはいえない。学習者が気づけるだけの差を持たない場合にEBSを提示することは、かえって学習者を混乱させることになりかねない。したがって、EBSが誤りを顕在化するかどうかの判断は、EBSを運用する上で不可欠である。また、方程式Cの場合を考えてみると、確かに単純にEBSを生成すれば誤りが顕在化されるような差は生じないが、を小さくすると速度が低下し、を大きくすると、速度が大きくなる。このように、パラメータを変化させると誤りが顕在化する場合もある。

[問題] 運動方程式を立てよ



正答(A) : $ma = mg \sin$
 誤答(B) : $ma = -mg \sin$
 誤答(C) : $ma = mg \cos$
 誤答(D) : $ma \cos = mg$

図3 問題例(1)

本研究では、EBSによって誤りが顕在化されると判断するための基準として以下の二つを用いている。

誤り顕在化条件1)EBSと正しい挙動の間に、速度において定性差が存在する場合

誤り顕在化条件2)EBSと正しい挙動の間に、速度の一階微分量において定性差が存在する場合

誤りの顕在化条件2は、系に存在するパラメータを変動させ、その変動に伴う速度の変化率の定性差によって誤りが顕在化されると仮定している。時間に対する速度の一階微分量は加速度であり、加速度に定性差がある場合、つまり、だんだん速くなる場合と、だんだん遅くなる場合、に誤りが顕在化されるとする。上記の方程式Cの例は、に対する速度の一階微分量で定性差が現れる。

速度および加速度において定性差が存在するか否かを診断するために、定性シミュレーションの手法を用い、また、時間以外のパラメータによる一階微分量において定性差を診断するために比較解析を用いたシステムについては、[Hirashima 98]で

報告している。このシステムでは、誤りの顕在化を速度のみを対象として行っているが、速度以外の属性を用いて誤りを見せるための誤り顕在化属性の拡張（この拡張に伴い、顕在化条件中の「速度」という言葉が、「誤り顕在化属性」という言葉に置き換えられる）、および誤りを顕在化するために行うパラメータの変化の手法の拡張について、それらの人間の認知における妥当性の検証とともに、[堀口 01]で報告している。

3.4 もっともらしさ

誤りの顕在性だけを考慮した場合には、有効な EBS は、（誤り顕在化条件を二つとも満たす）>（誤り顕在化条件 1 を満たす）>（誤り顕在化条件 2 を満たす）といった優先順位をつけることができる。しかしながら、学習者の誤りへの気づき、という観点からすると、単に EBS が正しい挙動と大きな差を持っているというだけでなく、その差の顕在化がもっともらしさを伴っていないといけない。このことを図 4 の例を用いて説明する。

図 4 の問題に対する正解は、 $F = 4mMg / (m + M)$ である。これに対して、 $F = (m + M)g$ という誤った方程式が立てられた場合を考えてみる。この誤りは速度を用いて顕在化することはできない。そこで、ここでは、力の矢印を用いて誤りを顕在化しようとしている。単純な EBS では力の矢印でも誤りを顕在化できないので、パラメータの変動を行い、その変動に伴う力の変化で誤りを顕在化することを試みる。(2b)はmを0とするパラメータ変動を施した場合であり、正しい式に従えばFは0となるのに対して、誤答に従うとMgとなり、力において定性差が生じる。したがって、誤り顕在化条件1を満たす。変化率については、ともに負であり、定性差は生じない。

これに対して、(2c)は総量を保存しながら、mを0にする、というパラメータの変動手法を用いた場合であり、誤答に従うと、Fは0にならないだけでなく、変化率も0となる。このため、誤り顕在化条件のみを考えれば、(2c)の場合が EBS として優れていることになる。しかしながら、どちらの EBS が誤りを指摘する際に有効と思うかをアンケート調査したところ、その結果に偏りは見られず、むしろ、(2b)を有効とする答えが多かった。

(2b)の方が有効とする主な理由としては、(2c)において加えられた変動操作が作為的にみえることがあげられていた。つまり、元の物理系との相違が大きいと、たとえ誤りがより顕在化されたとしても、そのもっともらしさが低下するため、誤りに気づかせるには必ずしも適切とはいえなくなることを意味している。

【 図 4 】 基準にかかる力の方程式を求めよ。

	2a	2b: EBS-b	2c: EBS-c		
		定性値	変化率の定性値	定性値	変化率の定性値
方程式-A (正答): $F = 4mMg / (m + M)$		[0]	[-]	[0]	[-]
方程式-B (誤答): $F = (m + M)g$		[+]	[-]	[+]	[0]
【 誤り可視化条件 1 】					
【 誤り可視化条件 2 】			x		

図 4 問題例 (2)

3.5 示唆性

リフレクションにおける知識の再構成の段階で必要となるのは、修正への手がかりであり、EBS に関していえば、EBS が誤り修正への手がかりを示しているかどうか、ということである。EBS が

学習者に見せるのは、正しい挙動と EBS との差異であり、その差異を解消すべく知識が修正される。したがって、その差異と知識の修正との対応関係が重要となってくる。筆者らは、「誤りへの気づき」を支援する要因として、(a)顕在性、(b)もっともらしさ、だけでなく、(c)誤り修正への示唆性、を考慮する必要があると考えている。

EBS の持つ誤り修正への示唆性を見積もるためには、まず、誤りの原因同定が必要となる。この誤り原因の同定を行なうにあたっては、方程式だけでは確度の高い診断が難しいことから、一般に立式の前段階として必要とされる作図も含めた診断を行う。具体的には以下のようなアプローチで研究を進めている、(1)作図と立式を行なう問題解決を実現する、(2)正解と学習者の解答との差分をとることにより、誤り箇所とその症状を特定する、(3)症状とその原因となる誤概念を結びつけるルールを用意し、それを用いて誤り原因の同定を行なう、(4)誤り原因可視化基準を定め、それを用いて、EBS が示唆する誤り原因と、同定された誤り原因が対応するかどうかを判定する。誤り原因の同定ルールと誤り原因可視化基準については、[堀口 02]で報告している。

4. おわりに

本稿では、これまで行われてきたリフレクションの活性化支援に関して概説するとともに、筆者の行っている誤りの可視化とその適応的制御について述べた。リフレクションの対象は個々の学習者の問題解決活動であり、その適切な活性化も個々の問題解決活動に依存するところが大きいと考えられる。このことから、リフレクションの支援における知的化の有効性は大きいと期待できる。今後、リフレクションの活性化の知的支援について、その方法の追求と体系的な整理を試みてゆく予定である。

謝辞

本研究の一部は、日産科学振興財団の援助による。

参考文献

- [Collins 88] A. Collins and J. S. Brown. *The Computer as a Tool for Learning Through Reflection*. In Heinz Mandl and Alan Lesgold, editors, *Learning Issues for Intelligent Tutoring Systems*, pp.1-18. SpringerVerlag, 1988. (菅井, 野島監訳, 知的教育システムと学習, pp.1-22, 共立出版, 1992)
- [平嶋 01] 平嶋宗, 得能加奈, 竹内章: 多桁減算におけるバグの可視化, 日本教育工学会雑誌, Vol.25, Suppli., pp.173-178, 2001.
- [堀口 01] 堀口知也, 平嶋宗: 誤りの修正を支援するシミュレーション環境: 表現手法と視覚効果を考慮した Error-Based Simulation の制御, 教育システム情報学会, Vol.18, No.3-4, pp.364-376, 2001.
- [堀口 02] 堀口知也, 平嶋宗: 誤りへの気づきを支援するシミュレーション環境: 誤り原因の示唆性を考慮した Error-Based Simulation の制御, 人工知能学会, Vol.17, No. 4, pp.462-472, 2002.
- [Kunitika 03] Kunitika, H., T. Hirashima, A. Takeuchi: A Method of Supporting English Composition by Animations as a Trigger for Reflection, Proc. of AIED2003 (accepted).
- [岡本 99] 算数文章題の解決におけるメタ認知の研究, 風間書房 (1999).