

学習状況把握機構を備えた
対面的協調学習支援システムに関する研究

小尻 智子

名古屋大学図書



11441343

概要

近年の計算機や情報ネットワークの普及に伴い、教育を知的に支援することを目的とした教育支援システムの構築が盛んに行われている。教育支援システムは小中学校や高校、大学などの学校教育だけではなく、社内教育や在宅学習など、様々な学習環境・学習形態・学習目的に対して構築されている。CAL(Computer Assisted Learning)では、計算機内に様々な学習コンテンツを構築することで、現実世界で学習者が教科書や問題集などを利用して独自に学習するような個別学習環境を計算機内に実現している。ITS(Intelligent Tutoring System)では、学習者の理解状態を表す学習者モデルを基に学習者に適した指導を展開する教授戦略部を計算機内に構築することで、学習者とシステムの1対1の個別教授を可能としている。CAI(Computer Assisted Instruction)では、学習コンテンツに提示順序を定義することで特定のシナリオに沿った教材提示を実現し、教師が多数の学習者に対して一度に一般的な知識を伝授する集団教授を達成することができる。また、CSCL(Computer Supported Collaborative Learning)では、情報ネットワーク環境を利用して複数の学習者が共有できる学習空間を構築することで、学習者が相互に意見を交換しながら問題を解決する集団学習を実現できる。現実世界ではこのような様々な学習形態がそれぞれ独立して存在するのではなく、学習者は学習目的や学習状況に合わせて動的に学習形態を変更する。学習者は複数の学習形態を効率的に利用することで、効果的に知識を獲得する。しかし、従来の教育支援システムは個々の学習形態を支援するものが多く、複数の学習形態を考慮して開発されているものはほとんど存在しな

い. 我々の目的は, 仮想空間上で様々な学習形態を支援するために, ウェブ上に学習形態を自由に変更可能なシームレスな仮想学習空間を構築することである. 特定の学習形態に支援対象を限定しないことで, 学習者は一つの仮想空間上で永続的に学習することが可能となる. このような学習環境で学習者の学習効果をより向上させるためには, 単に様々な学習形態を実現しているだけでなく, 様々な学習形態にまたがる学習を継続的に支援することが要求される.

学習者がいつでも適切な学習形態で学習できるために, 我々が提案する仮想学習空間は Learner, Coordinator, Assistant の3種類のエージェントを導入する. Learner は擬似学習者であり, 学習者に仮想学習空間へのインタフェースを提供する. Coordinator は学習グループに対する教師の役割を担い, 学習グループ全体に対して知識を提供する. Assistant は個々の学習者の個人教師であり, 個々の学習者の学習状況に応じて異なる指導を行う. 学習者は Learner を通して適切なエージェントとコミュニケーションすることで, 様々な学習形態に応じたコミュニティを形成する. 本論文では, 協調学習を基本学習形態とし, 協調学習を補助する役割として他の学習形態を捉えたときの, Coordinator と Learner の学習支援機能について議論する.

協調学習とは, 様々な理解状態の複数の学習者が同一の論理空間を共有し, 議論を通してお互いの意見を交換することで, 共通の目的を達成しようという学習形態である. 協調学習の目標は学習グループの目的を達成することであるため, 学習グループの管理や知的な学習支援を通して学習グループの学習効果を保証することは有用である. このような学習グループ支援の立場では, 個々の学習者ではなく, 学習グループを一つの支援対象として扱うことが効果的であると想定される. 本論文では, 協調学習において学習グループの目的達成を支援するため, 正解と正解に至る導出過程が存在する問題を対象に, 学習グループの議論の状況を観察し, 必要に応じて効果的な助言を生成するための Coordinator の機構を述べる. Coordinator が適時適切な助言を生成するためには, 支援対象, すなわち学習グループの膠着状態を瞬時に検出できる学習状況モデルが重要となる. Coordinator は, 正解とその導出過程を「正解導出の進捗状況」と「議論の広がり」の2つの視点で扱い, それぞ

れの視点に沿って変換したものを「解導出シナリオ」と「経路木」としてモデル化して正解導出に関する知識として保持する。議論中の発言内容から「解導出シナリオ」と「経路木」における導出箇所を特定することで、学習グループの学習状況モデルを構築する。また、検出された学習の膠着状況に対し、学習対象を高校数学の2次関数問題に限定し、新しい発想を誘発するための助言の生成方法について述べる。我々は補助図形が解法導出の方向性を反映していると仮定し、学習者の導出している解法と異なる方向性を示す補助図形を提示することで、図から異なる視点を発想させることを目的とする。学習グループの描いた多様な図から学習グループの正解導出の方向性を把握するため、図中の図形を概念的な関係で表現した概念モデルを導入する。

一方、議論を円滑に進行させるために、現実世界で対話しているような対面感をインタフェース上に実現させることは有用である。協調学習空間内で他の学習者の個性や理解状態を把握できることは、対話の相手を個人として認識することにつながり、人間の学習者と一緒に学習していると実感させる。また、学習者の視点から他の学習者を位置づけることは、効率のよい知識の獲得を導く。現実世界では、他の学習者の個性や理解状態を観察し、認識することで、個々の学習者を識別・意識している。他の学習者の観察は学習者同士の直接的なインタラクションではなく、観察する学習者の一方的な情報の取得である。このようなインタラクションを実現するために、個々の学習者の個人情報をも個人学習情報としてモデル化し、モバイルエージェントを用いて特定の学習者の個人学習情報を獲得できるようにする。また、学習者の他の学習者に対する興味の割合を推測し、特定の学習者への「注目」をインタフェース上の情報に反映することで、現実世界における視野に対応する face-to-face な学習環境を構築する。現実世界で我々は常に全ての学習者を観察しているわけではなく、特定の学習者に焦点をあてていることが多い。全ての学習者の情報をインタフェース上に同等に表示するのではなく、注目対象となる学習者の情報のみを提供することで、仮想空間内での注目行為が容易になり、正解の導出に沿ったコミュニケーションが可能となる。我々は、学習者の議論への参加状態から学習者の

注目の対象学習者を特定し、自動的に対象学習者のカメラ画像を取得して表示する
インタフェースを構築する.

目次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	本研究の目的	5
1.3	本論文の構成	11
2	協調学習環境 HARMONY	13
2.1	はじめに	13
2.2	協調学習支援の要求分析	16
2.2.1	環境構築支援	16
2.2.2	学習内容支援	19
2.3	HARMONY の枠組み	22
2.4	エージェントの機能	25
2.4.1	Coordinator	25
2.4.2	Learner	27
2.4.3	Assistant	28
2.5	おわりに	29
3	複数の解導出過程が存在する問題における学習状況把握機構	31
3.1	はじめに	31
3.2	枠組み	34

3.2.1	導出割合による学習状況把握	35
3.2.2	議論の広がりによる学習状況把握	37
3.3	正解導出支援機構	39
3.3.1	解導出シナリオ	39
3.3.2	インディケータ	43
3.4	議論拡張支援機構	44
3.4.1	経路木	45
3.4.2	議論評価マップ	47
3.5	プロトタイプ・システム	49
3.5.1	インタフェース	50
3.5.2	学習支援機能	52
3.6	評価実験と考察	55
3.6.1	Coordinator の学習状況と現実世界の比較による評価	55
3.6.2	学習支援機構を含まないシステムと比較することによる評価	59
3.7	おわりに	61
4	補助図形を利用した助言生成機構	65
4.1	はじめに	65
4.2	関数の問題における図の有効性の調査	68
4.3	2次関数問題に対する助言生成のアプローチ	69
4.4	図の概念モデル	71
4.4.1	概念モデルの構成要素	71
4.4.2	図形間の位置関係の決定方法	73
4.5	おわりに	75
5	個人学習情報を利用した相互理解促進のためのインタフェース	77
5.1	はじめに	77

目次	vii
5.2 Learner の個人学習情報管理機構	79
5.2.1 会話画面の情報整理機能	80
5.2.2 他の個人学習情報獲得機能	82
5.3 プロトタイプ・システム	84
5.4 おわりに	87
6 協調学習における face-to-face インタフェース	89
6.1 はじめに	89
6.2 予備的考察	91
6.2.1 対面感	91
6.2.2 予備実験	92
6.2.3 注目過程	93
6.2.4 アプローチ	96
6.3 対話制御	100
6.3.1 発言関連ツリー	100
6.3.2 注目者決定ルール	101
6.4 評価実験	105
6.4.1 プロトタイプ・システム	105
6.4.2 実験結果	106
6.5 おわりに	109
7 結論	113
7.1 まとめ	113
7.2 今後の課題	116
7.2.1 シームレスな協調学習支援環境	116
7.2.2 Coordinator の正解導出支援	117
7.2.3 Learner のコミュニケーション支援	118

viii

目次

謝辭

121

參考文獻

123

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

近年の計算機や情報ネットワークの普及に伴い，教育を知的に支援することを目的とした教育支援システムの構築が盛んに行われている [1, 2]. 「生涯学習」という言葉が定着した今日，教育支援システムは小中学校や高校，大学などの学校教育だけでなく，社内教育や在宅学習など，様々な学習環境・学習形態・学習目的に対して構築されている.

現実世界において，学習者は教科書などを通して独自に知識を獲得する個別学習を中心に，学習状態や学習目的に合わせて他の学習形態に推移することで効果的に知識を獲得する. 図 1.1 に，学習環境の構成人員とその役割に着目して分類した，現実世界の学習形態とその関係を示す. 図中の矢印の太さは学習形態間の推移可能性の度合を表している. 個別学習 (private learning) は，学習者が教師の存在しないプライベートな空間で一人で行う学習であり，最も基本的な学習形態である. この学習形態では，学習者は教科書，ウェブページ，ビデオなどの様々な学習教材を用いて自律的に学習し，知識を獲得する. 個別教授 (private lesson) は学習者のプライベートな学習空間に個別教師が介在する学習形態である. 学習者は個別教師から自分の性格や理解状態に合わせて知識を教授されることにより，効率的に問題を解決

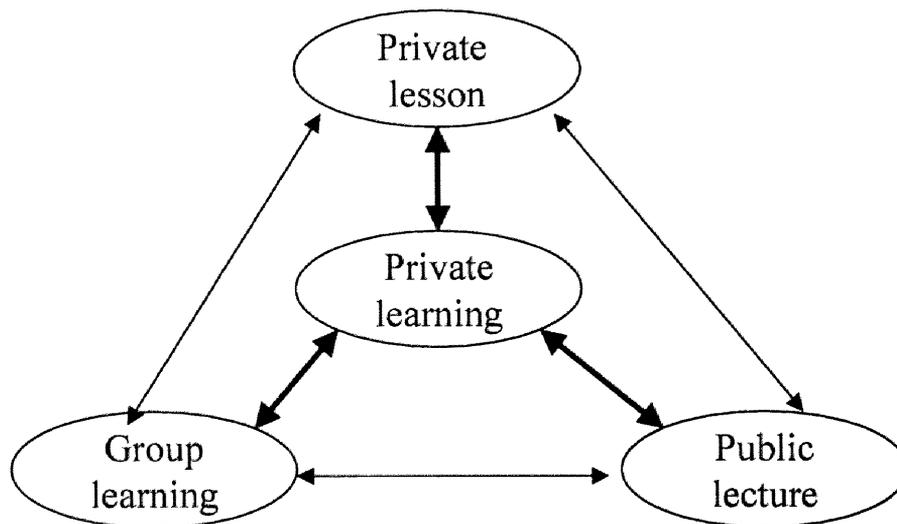


図 1.1: 現実世界における学習形態

し、知識を深める。集団学習 (group learning) は、学習空間内に複数の学習者が存在する学習形態である。学習者は必要に応じて他の学習者と知識を交換しながら協調して問題を解決したり、競争して自分の知識を向上させる。集団教授 (public lecture) では、教師が多数の学習者に対して一度に一般的な知識を伝授する学習形態である。集団教授では全ての学習者に対して共通の教授方法を採用するのに対し、個別教授は学習者に適した指導をする。

教育支援システムは、計算機技術の発展に伴い、支援対象とする学習形態を様々に変化させてきた。1970年代からは、計算機の一般利用の増加に伴って、計算機を用いた個別学習を可能にするため、計算機内に学習コンテンツを構築することに焦点をあてた CAL (Computer Assisted Learning) が主に研究された。CAL では学習者がシステムの機能を理解してシステムを操作することで、自律的に知識を獲得す

る [3] ことができる。例えば、瀧口らは、Java などのオブジェクト指向プログラミングの基礎教育を行うため、オブジェクト指向の重要な概念を身につけさせるためのロールプレイング・ゲームを開発した [4]。このシステムでは、ゲーム中で利用する魔法命令を作成する際に、継承やカプセル化などの概念を使用させることで、オブジェクト指向の概念を体験から学習させる。また、佐合らはゲームを楽しみながら自然に英会話能力を高めることを目的とした RPG 型英会話学習システムを構築している [5]。学習者はフィールド内に存在するキャラクタと英会話のドリル学習を行うことにより、問題を解決していく。このように、学習効果を狙ったシステムを計算機内に構築することで、計算機を個別学習のための媒体として定着させることに成功にした。

1980 年代になると、ローカルエリア・ネットワークの普及、また人工知能技術の発達も伴って、講義支援、すなわち集団教授を提供するための CAI (Computer Assisted Instruction)、さらには学習者の個性に応じた個別教授を実現するための知的教授システム、ITS (Intelligent Tutoring System) が注目されてきた [6]。CAI では教材内に教材データと教材提示の制御が含まれているのに対し、ITS では教材提示が教材とは独立した教授戦略部において制御される [1, 7]。教授戦略部では学習者の学習状態を表す学習者モデルを構築し、学習者モデルに応じて教材の提示方法を変更したり助言を生成することで、CAI に比べて柔軟な指導が可能となる。仲林らは WWW (World Wide Web) を利用した個人適応型 CAI システム CALAT を構築している [8]。CALAT の WWW サーバはテキスト、アニメーション、音声から成るマルチメディア教材を保持しており、演習問題の解答内容に応じて次に選択する教材データに変化を持たせている。一方、ITS を指向する研究に関して、Wing らは教授戦略を小さい教授単位に分割して再構成することで、一つの知的教授システム内で様々な教授戦略を実現する手法を提案している [9]。様々な教授単位を組み合わせることにより、教授戦略作成者の負担を軽減しながら、多様な教授戦略を実現可能としている。また、堀口らは学習者モデルを基に学習者の理解状態を向上させるため、高校物理の力学の問題を対象に、学習者に誤りを気づかせるための問題空間の

シミュレーション・システムを構築している [10]. このシステムは, 学習者が立式した誤方程式を基に物体の不自然な動きをシミュレーションすることで, 学習者に解法の誤りを認識させている. このように, 学習支援システムを用いた個別学習環境に「学習指導」を実現する教師的役割を導入することで, システムと学習者との個別教授環境が実現され, 学習支援システムを用いた学習効果が著しく向上した.

1990 年代後半にはインターネットの急激な普及により, インターネットのワールドワイドな特徴を利用し, 計算機内で他の学習者と共にグループで学習する集団学習を実現しようという試みがなされてきた. 集団学習の中で, 特に共通の問題を保持する複数の学習者が議論を通してお互いの知識を交換し, 問題を解決することを目的とした学習形態は協調学習と呼ばれ, 協調学習を支援するシステムは CSCL(Computer Supported Collaborative Learning) と呼ばれて盛んに研究されるようになった [11]. Constantino-Gonzalez は ER(Entity-Relationship) 図の作成問題を対象とした協調学習環境において, 個々の学習者にコーチエージェントを導入し, 学習を支援する枠組みを明らかにした [12]. コーチエージェントは対応する学習者の作成した ER 図とグループの ER 図を比較し, 相違点があればそれらを解消するように発言を促すことで, グループの議論を活性化させている. 一方, Heh らは team server, team manager, member の 3 階層で学習参加者を管理することで, 多数の学習者が参加し, 多数の学習グループが存在することのできる協調学習環境を構築している [13]. CSCL の発展に従って, 教師からの一方的な知識の提供ではなく, 学習者間の相互の意見交換による知識の構築を計算機が支援するようになった.

教育支援システムは, 最新の計算機技術を巧みに取り入れ, 支援対象となる学習環境を拡大している. また, 教育支援システムは, その発展に伴って, 現実世界の学習活動の補助的役割から, CSCL のように新しい学習環境を提案し, 普及させるなど, 現実世界の学習活動にその影響力を増大させつつある. 情報ネットワークが普及し, 学習データが全て計算機内に蓄積可能となった今日, 学習者が同時に学習環境に存在するような同期環境のみではなく, ビデオなどを用いて時間的に異なっ

た空間で情報を交換できるような非同期環境下での学習など、これまでにない学習形態での学習も想定される。従って、次世代の教育支援システムの構築には、最新の計算機技術を意識し、今後普及する学習形態を予測しながら、その学習効果を高めるような支援を提供する必要がある。

1.2 本研究の目的

21世紀になり、政府の e-japan 政策 [14] でも提唱されているように、全ての教育機関にインターネットが整備され、近い将来、学習者は学校や塾などの制約された物理空間上のみで学習するのではなく、計算機環境を利用した仮想学習空間内で学習するようになることが予想される。すなわち、学習者は先生がインターネット上に提供した授業を受け、ウェブ上にある学習コンテンツを基に自主学習し、理解できなかった事柄にはインターネットを通じて友達と相談したり、仮想空間上の家庭教師である知的教授システムの指導によって解決する近未来の活動が想像される。事実、近年インターネット上で講義を実施したり、レポートを課すことで大学講義の受講証明を与えることのできる仮想大学や、複数の小学校の教室をインターネットで結んで共同作業を実現する教室間交流が試みられるなど、学習の場が仮想空間上へ移行しつつある。このような学習環境で学習者の学習効果をより向上させるためには、単に様々な学習形態を実現しているだけでなく、様々な学習形態にまたがる学習を継続的に支援することが要求される。

我々の目的は、仮想空間上での学習を支援するために、学習形態を自由に変更可能なシームレスな仮想学習空間をウェブ上に構築することである。学習者がいつでも適切な学習形態で学習できるように、我々が提案する仮想学習空間は、仮想空間内で個々の学習者に対応して設定された疑似学習者 Learner、複数の学習者による協調学習を支援し、学習グループの教師的役割を果たす Coordinator、個々の学習者の学習状況に合わせて1対1で指導する Assistant の3種類のエージェントを導入し、マルチエージェント・パラダイムの下に実現される。我々が提案する仮想学習空間

において、学習者は Learner を通して適切なエージェントとコミュニケーションすることにより、複数の学習形態で学習することができる。

マルチエージェント・システムは、ある目的のために知的に相互作用する複数のエージェントで構成されるシステムである [15]。マルチエージェント・システムにおけるエージェント間の相互作用は、その協調性の視点から以下の 2 つの種類に分類することができる。

- 協調

共通のゴールを達成することを目的に、複数のエージェントが知識や能力を共有しながら協調してタスクを実行する。

- 競合

異なる目的を持った利己的な複数のエージェントが反目してタスクを実行する。個々のエージェントは自分の利益をできるだけ高めながら、システムとしての目的を達成する。

我々の提案する仮想学習空間では、個々のエージェントは「学習効果を向上させる」ことを目的に協調して作用する。学習環境を構成するエージェントは学習者の要求する学習形態に応じて異なるため、Learner によって学習者の学習履歴を保持し、Learner を通して適切な他のエージェントと学習者の学習状況を共有することで、学習形態を超えた継続的な学習支援を実現する。

本論文では、様々な学習形態を構成可能なシームレスな学習環境を提案する。また、協調学習を基本学習形態とし、協調学習を補助する役割として他の学習形態を捉えたときの、個々のエージェントの役割・機能について議論する。協調学習とは、様々な理解状態の複数の学習者が同一の論理空間を共有し、議論を通してお互いの意見を交換することで、共通の目的を達成しようという学習形態である [16]。協調学習の目標は学習グループの学習目的を達成することであるため、学習グループの管理や知的な学習支援を通して学習グループの学習効果を保証することは有用

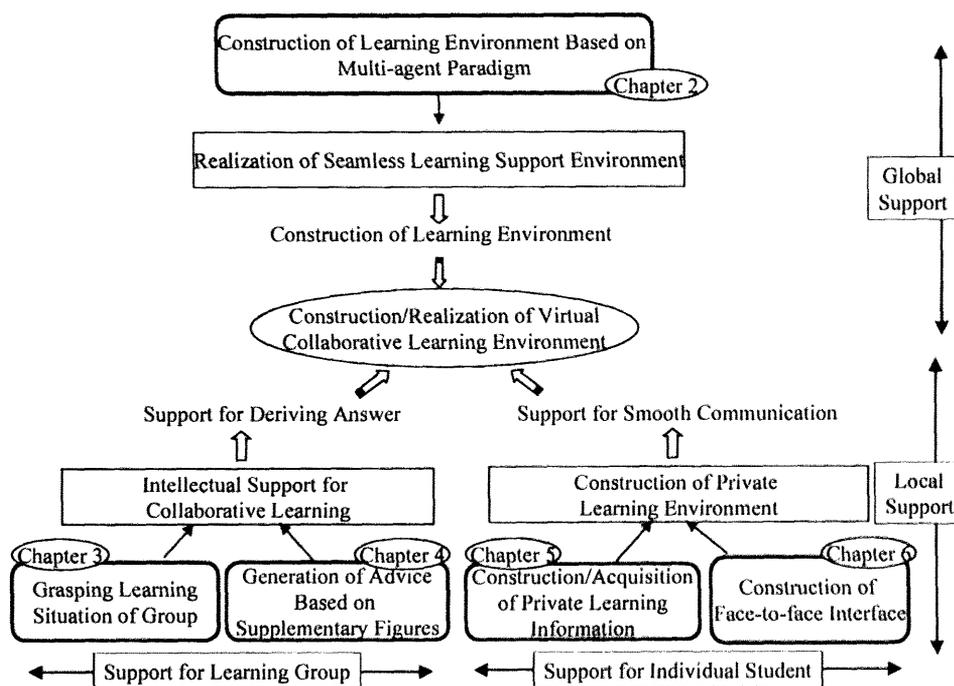


図 1.2: 本論文におけるシステムの全体像

である。このような学習グループ支援の立場では、個々の学習者ではなく、学習グループを一つの支援対象として扱うことが効果的であると想定される。また、仮想学習環境では、学習者に自分で学習していると直接意識させることが学習効果を誘発する [17]。学習者は自分の知識を他の学習者の知識と関連づけることで、他の学習者の存在を意識でき、自分で学習していると実感することができる。従って、学習者の個人学習空間を確立し、他の学習者の個人学習空間を意識させることは、他の学習者の存在を実感させることであり、学習者に現実世界に近い議論空間を提供できる。

図 1.2に本論文におけるシステムの全体像を示す。本研究では効果的な仮想協調学習空間を実現することを目的としている。まず、学習者が協調学習を基準に様々

な学習形態を実現できるシームレスな学習環境の構築を目指す。シームレスな学習環境では、マルチエージェント・パラダイムの下に複数のエージェントが相互作用することで、個々の学習形態を実現する。また、協調学習を効果的に進行させることを目的に、様々な学習形態の実現だけではなく、学習内容に踏み込んだコミュニケーション支援・正解導出支援について探求する。協調学習の正解導出支援では、学習者を一つの目的を達成するための学習グループの一員と位置づけて、学習グループが目標を達成できるように、学習内容を把握して知的に学習を支援する。一方、コミュニケーション支援では、学習者が他の学習者の個性を意識して議論を円滑に進行できるように、学習者の情報を保持する学習空間の構築と、個々の学習者の視点を反映したインタフェースの構築を目指している。以下、効果的な協調学習空間を実現するために、本論文で実現する目的について説明する。

- シームレスな学習環境の構築

学習者は学習者自身が快適であると感じる学習形態で学習することで、学習意欲が高まり、学習に集中できる。従って、学習者に特定の学習形態における学習を強制するのではなく、学習者の要求に応じて学習形態を自由に変更可能とすることは重要である。

- 正解導出支援

協調学習の学習内容を把握し、学習活動自体を知的に支援することは、学習グループの共通目的の達成を容易にする。図 1.3は協調学習を知的に支援するための、おおまかな手順を示す。「学習状況の把握」では、議論の状況からグループの学習状況を表す学習グループ・モデルを構築する。「膠着状態解消のための知的支援」では、単に正解を教授するだけではなく、問題に利用された概念を習得させるような助言を生成する。学習の主体はあくまで学習者自身である。Sedigら [18] は、「教育的なソフトウェアの目的はパフォーマンスのスピードをあげるのではなく、ユーザに学習している概念に集中させ、その知

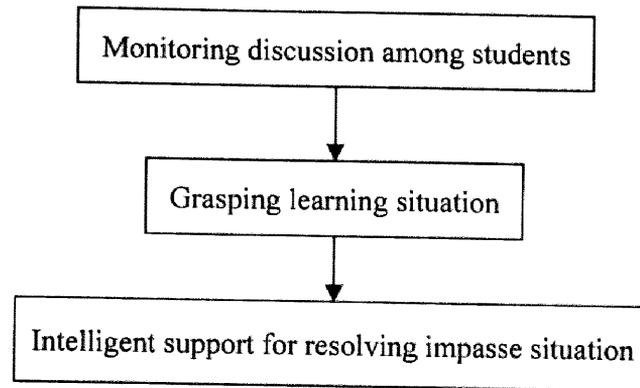


図 1.3: 協調学習の知的支援の手順

識を獲得させることである」と述べている。従って、目的に対して学習グループを積極的に誘導する手取り足取り型の支援ではなく、学習グループの主体性を確立し、学習グループの議論に対して補助的に知識を提供することが重要である。

- コミュニケーション支援

協調学習空間内に個々の学習者の個性を反映した個人の学習空間を構築し、他の学習者の学習空間を意識させることは、他の学習者を個人として認識させることにつながる。学習者を個人として意識することで、学習者に有益な情報をもたらしてくれる学習者を特定できるため、議論における効果的な情報の取得を導く。また、個々の学習者を特徴づけることで、無味乾燥な仮想学習空間ではなく、人間の学習者と一緒に学習していると実感できるため、学習に対する集中度が高まる。「個人学習情報の構築と獲得」では、個々の学習者独自の情報を Learner 内にモデル化することで、個人学習空間とみなす。他の学習者の

表 1.1: 研究課題

課題	アプローチ	基本技術
シームレスな学習 環境の構築	マルチエージェント・ パラダイム	グループウェア 環境の構築
協調学習の知的 支援	大まかな学習グループ・ モデリング 発想支援	ユーザモデリング 問題の知識表現
個人学習空間の 構築	学習者の個人情報モデル 化と個人情報の交換 注目者推定による特定の カメラ画像の自動取得	ユーザモデリング エージェントの学習

独自情報を獲得することは、他の学習者を客観的に観察することを意味しており、個々の学習者を識別・意識することにつながる。一方、学習者の意識を反映した情報をインタフェース上に提示することは、インタフェース自身が個人学習空間に対応する。「Face-to-face インタフェース」では、他の学習者に対する学習者の注目行為をインタフェース上に反映させることで、他の学習者と同一空間を共有しているという対面空間を実現する。我々の目的は、物理学習空間を仮想学習空間に再現することではなく、学習を円滑に、かつ効果的に進行するために必要なコミュニケーションの側面を仮想学習空間で実現可能にすることである。

表 1.1にこれらの課題をまとめる。

1.3 本論文の構成

本論文では、まず2章で我々が提案する仮想協調学習環境 HARMONY(Heartful Agent foR Making cOllaborative learNing effectively)の枠組みを示す。HARMONYは、Learner, Coordinator, Assistantの3種類のエージェントで構成される。個々のエージェントは「学習効果を高める協調学習環境を学習者に提供する」という共通の目的の下、協調学習を中心に適切なエージェント間のコミュニケーションによって構成される様々な学習形態における学習効果を高めるよう、協調して作用する。2章ではエージェント間のコミュニケーションで実現できる学習形態を明らかにする。また、協調学習支援環境で達成すべき問題点を述べ、それを実現するために個々のエージェントに必要とされる機能を挙げる。

3, 4章では2章で提案された学習環境内で正解導出支援を実現するため、正解と正解に至る導出過程が存在する問題を対象に、学習グループの議論の状況を観察し、必要に応じて効果的な助言を生成するためのCoordinatorの機構を述べる。Coordinatorが適時適切な助言を生成するためには、支援対象、すなわち学習グループの膠着状態を瞬時に検出できる学習状況モデルが重要となるため、3章では、正解とその導出過程を「正解導出の進捗状況」と「議論の広がり」の2つの視点で扱い、それぞれの視点に沿って変換したものを「解導出シナリオ」と「経路木」としてCoordinatorの正解導出に関する知識として導入する。そして、議論中の発言内容から「解導出シナリオ」と「経路木」上における導出箇所を特定することで、学習グループの学習状況モデルを構築する。また、4章では、3章で検出された学習状況に対し、学習対象を高校数学の2次関数問題に限定し、新しい発想を誘発できる助言の生成方法を議論する。我々は補助図形が解法導出の方向性を反映していると仮定し、学習者の導出している解法と異なる方向性を示す補助図形を提示することで、図から異なる視点を発想させることを目的に図形概念モデルを導入する。概念モデルは、図中の図形を概念的な関係で表現しており、学習グループの描いた多様な図を概念的に表現することで、学習グループの正解導出の方向性を把握でき

ることを明らかにする。

一方、5、6章では学習者と仮想学習空間のインタフェースである Learner 上に、学習者のコミュニケーション支援を実現する。5章では、他の学習者の個性や学習状況を把握することで人間の学習者と学習していると実感でき、また学習者の視点から他の学習者を位置づけることで議論中に知識を効率よく獲得できるという前提をとる。現実世界の学習者同士の直接的なインタラクションではなく、他の学習者の個性や理解状態を一方向的に観察・認識することを実現するため、個々の学習者の個人情報モデル化したものを個人学習情報として導入する。特定の学習者の個人学習情報を Learner を通してモバイルエージェントを用いて獲得することで、個々の学習者を識別・意識できる機構を明らかにする。6章では、特定の学習者に対する学習者の継続的な「注目」をインタフェース上の情報に反映することで、特定の学習者を意識することができる face-to-face の学習環境を構築する。現実世界で我々は常に全ての学習者を観察しているわけではなく、特定の学習者に焦点をあてていることが多い。全ての学習者の情報をインタフェース上に同等に表示するのではなく、注目対象となる学習者の情報のみを提供することで、仮想空間内での注目行為が容易になり、正解の導出に沿ったコミュニケーションを実現する。6章では学習者の議論への参加状態から学習者の注目の対象学習者を特定し、自動的に対象学習者のカメラ画像を取得して表示するインタフェースを構築する。

最後に、7章で本論文をまとめ、今後の課題を述べる。

第 2 章

協調学習環境 HARMONY

本章では我々が構築するシームレスな協調学習環境 HARMONY の枠組みを述べ、HARMONY で実現できる学習形態を明らかにする。また、個々の学習形態を効果的に支援するためのエージェントの役割を述べる。

2.1 はじめに

近年の計算機の普及に伴い、教育分野における計算機の利用が注目されている。学習には一緒に学習する人数、理解状態、学習目的、学習の進捗方法などによって様々な形態が存在する。現実世界では、我々は自分の学習状態、学習目的にあった適切な形態を自主的に選択することで、効果的に知識を獲得している。例えば、学校で先生から授業を受けることによって、大まかな知識を獲得できるが、授業による受動的な学習だけでは知識を定着させることは不十分であるため、しばしば事前に予習をしたり、関連する問題集を用いて復習する。また、自分一人では解消できない疑問があると、先生に質問したり、友人に相談する。このように、その時点の学習状況、学習目的に合った学習形態が存在し、適切な形態を選択しなければ期待する学習効果が得られない可能性がある。図 1.1 で示した現実世界の 4 種類の学習形態、すなわち個別学習 (private learning)、個別教授 (private lesson)、集団学習

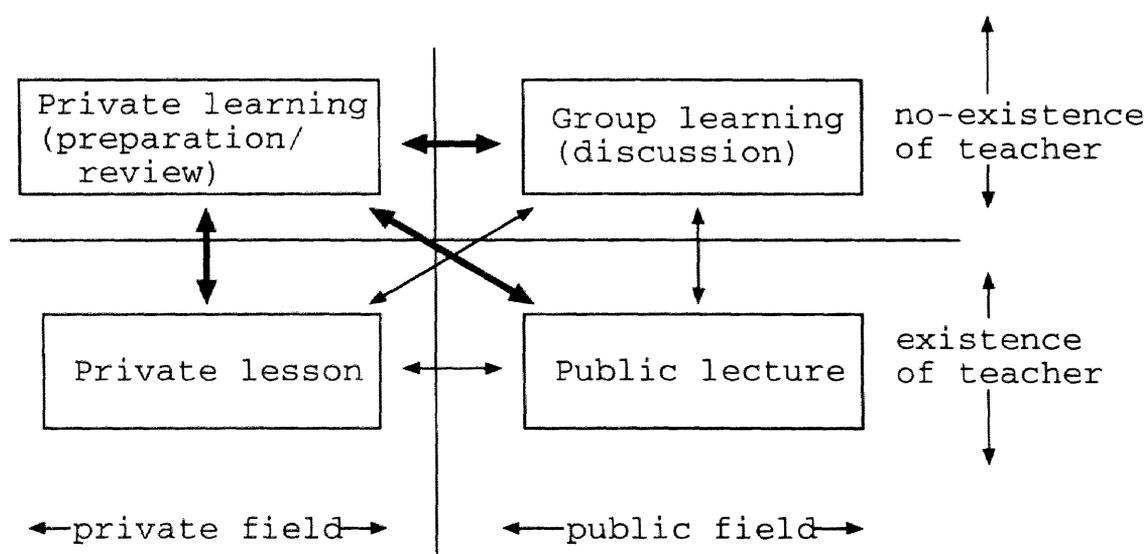


図 2.1: 現実世界の学習形態の分類

(group learning), 集団教授 (public lecture) は, 参加者の役割と参加人数を基準とすると, 図 2.1 のように分類することができる [19]. 個別学習は学習者が一人で個人の学習空間内で試行錯誤を繰り返しながら知識を獲得する学習形態であり, この個人の学習空間内に教師が介在して学習者の学習状況に合わせて学習を補助するのが個別教授である. それに対し, 複数の学習者が存在する学習空間で複数の学習者が協力し合って一つの目的に対処するのが集団学習であり, 集団教授では教師が複数の学習者に対して共通した知識を提供する. 図 2.1 は, 学習形態間での学習者の遷移可能性の強さを表している. 学習者は家庭での個別学習を中心に主に学習しており, 必要に応じて適切な学習形態で学習することで, 効率的に知識を獲得する.

1.1 節で述べた従来開発されてきた教育支援システムは, 図 2.1 で分類した学習形態に対して図 2.2 のように対応付けることができる. CAL は学習者が独自に教科書, あるいはインターネット上の教材などを利用して知識を獲得する個別学習を想定しており, 計算機上での語学学習支援ツール [20] を初めとする様々なインタラク

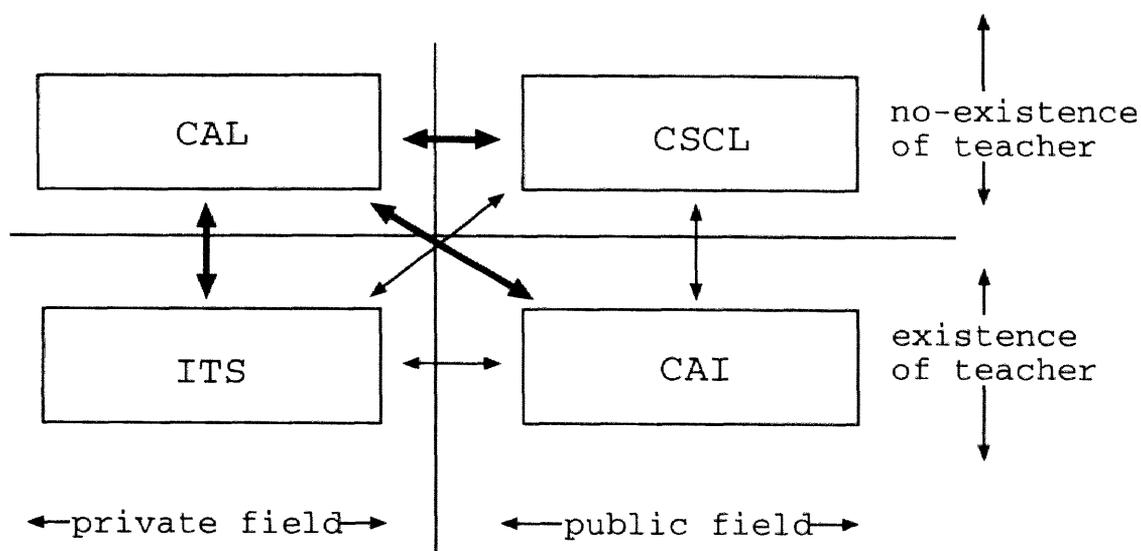


図 2.2: 現実世界の学習形態の分類

ティブなシステムが盛んに開発されてきた。ITSは、一人の学習者と一人の教師による、教師指導型の学習であるため、個別教授に対応する。ITSでは学習者の状態に応じた指導を提供するため、バイズのネットワークを用いた学習者の状態モデル [21] の研究などがある。一方、一人の教師による複数の学習者への集団教授は、講義シーケンスを組み込んだ教材を提供することを目的としたCAIに対応する。この分野では情報ネットワークの普及に伴い、様々なマルチメディアデータを用いた教材が提供されている [22]。また、インターネットで接続された複数の学習者による集団学習が想定しているCSCLでは、学習者の行動履歴を外化することによる議論の促進 [23] や、個人に対するエージェントを用いた学習の理解状態の把握 [24] に関する研究がある。これら従来のシステムは個々の学習形態に特化したものが多く、複数の学習形態を支援する研究はほとんど行われていない。また、現在開発されつつあるシステムも、特定の学習形態の範囲で新しいアイデアを提案する試みは見られるが、分類された学習形態の壁を取り除く試みはあまりなされていない。

本章では、ウェブ上の協調学習を基本とし、学習者が必要に応じて他の学習形態へ動的に学習形態を推移できるシームレスな協調学習環境 HARMONY の概要を述べる。

2.2 協調学習支援の要求分析

CSCCL は協調学習支援システムと呼ばれており、工学の分野だけではなく、協調学習の有効性の理論を提唱している教育学、心理学、社会学などの学問分野でも広く研究されている [25]。学習者は自分が能動的に学習していると実感できたときに学習に集中でき、知識を効果的に獲得できる [17]。協調学習では単に複数の学習者が存在する空間内で学習しているというだけではなく、他の学習者を意識でき、多量の情報の中から自分で意識的に必要な情報を取得していると学習者が実感できる学習環境の構築が必要になる。一方、計算機を利用した協調学習では、同一の物理空間を共有していないため、現実世界のように顔をつき合わせた議論やメモを用いた意思疎通ができず、円滑なコミュニケーションが困難である。そのため、学習者間で意見の合意が取れなかったり、正解の導出が膠着することが考えられる。そのような状況に対し、学習者が円滑に議論を進行できるよう、議論の進捗や内容に踏み込んだ支援も要求される。

以下、協調学習支援システムを環境構築支援と学習内容支援の視点から分析し、HARMONY で実現する学習支援の立場を明らかにする。

2.2.1 環境構築支援

協調学習は複数の学習者が存在する環境で初めて実現する。インターネットの普及に伴って、複数の学習者が同一の仮想学習空間を共有することが可能となった。しかし、インターネット上には様々な理解状態の学習者が存在するため、適切な学習者によってグループが構成されない場合、効果的な協調学習を期待できない可能性がある。また、適切にグループが構成されても、学習者に提供されるインタ

フェースの機能によっては、学習者間のコミュニケーションを円滑に運ぶことができず、学習者の能力に見合った学習効果を得ることができない可能性もある。

稲葉らは、協調学習中に相互作用する形態とそこで期待される学習効果を整理し、個人の学習目的達成のために効果的な協調学習グループの構成方法について報告している [25]。稲垣らはNHKの教育番組と連動したホームページを構築し、番組のビデオの配布や学習者間のチャット、掲示板などを提供することで、教育番組に興味を持った学習者間で協調学習するための学習空間を実現している [26, 27]。これらの研究は、インターネット上に共に協調学習できる学習者が存在するという仮定が前提であり、インターネットを通して複数の学習者がコミュニケーションするための環境の構築を目的としている。

一方、Kasaiらは、問題の不完全な知識を保持するコンピュータ・コンパニオンと、問題の専門知識を保持してHELPメッセージに応じて協調学習に介入するファシリテータ・エージェントの2種類のエージェントを導入した協調学習環境を構築した [28]。また、Floreaは協調学習空間に4種類のエージェントを導入し、エージェントに学習状況に応じた学習指導や、インターネット上から学習情報の検索を実現させている [29]。これらの研究は、インターネット上に適切な理解状態の参加者が必ずしも存在しないという前提の下、様々な能力を保持する参加者をエージェントという形で補足している。

我々は、多くの学習者が計算機や情報ネットワークを利用して学習することを想定しているが、現実世界の協調学習のように、学習が膠着した状態に対して学習者が質問することのできる専門知識が豊富な人や、議論が発散した状態に対してうまく調整することのできる人は必ずしも存在するとは限らない。そこで、KasaiらやFloreaらのように、学習状況に応じて学習を効果的に誘導できる役割を果たすエージェントを導入し、マルチエージェント・パラダイムで学習空間を構築することが適切であると提案している。

一方、効果的な協調学習を実現可能なグループ環境が構築できても、協調学習するための適切なインタフェースが提供されなければ、十分な学習効果を得ることが

困難である。斉藤らは BBS を討論のツールとして提供し、投稿記事の検索機能を設けることで、投稿しようとする内容の新規性を学習者に自己評価させ、議論の深化・発展を促進させている [30]。また、稲見らはグループに対して課題を割り当てるプログラミング演習において、グループチャット機能とホワイトボード機能を構築することにより、グループ間の意思疎通を支援している [31]。これらの研究は、単に意見を伝達するという目的において、有用である。

協調学習では、意見の伝達だけではなく、議論でお互いの意見に対して相互作用することが多い。議論では、表情や動作、口調など、発言内容以外の要素から、相手の意思を把握することができる。現実世界の物理空間に近い仮想空間の構築として、中村らは学習者が自由に操作し、特定の学習者とコミュニケーションを行うことを可能とした 3D 空間を構築している [32]。また、福井らは、個々の学習者の注目行為を、仮想学習空間内で個々の学習者に対応しているキャラクターの顔の方向と注目対象者の大きさを変化させることで実現している [33]。このような学習空間の物理的特徴を現実世界に反映させることは、学習者に現実世界に近いコミュニケーションを可能とする。

協調学習の目的は知識の獲得であり、議論は知識獲得のための手段である。現実世界では他の学習者が同一物理空間に存在するため、言葉などを通して直接知識をやりとりするだけではなく、目で動作を観察したり耳で話し方を聞くなどして、間接的に他の学習者から情報を得ることができる。効率的に情報を獲得するために、直接的な会話の交換だけではなく、知識獲得に影響を与える間接的な相互作用を仮想空間で実現することは有用である。我々は、以下の要素を効果的な知識獲得のために必要なインタフェースの特徴として挙げる。

- 個々の学習者の個性の反映

現実世界において、我々は個々の学習者を「個人」として認識し、暗に自分の学習状態を基準に他の学習者を位置づけている。そして、高く評価している学習者に関しては、その言動に注目して積極的に情報を収集しようとするが、

あまり重要視していない学習者の情報は無視することが多い。このような「個人」の認識は、現実世界では、学習者の発言や動作だけでなく、顔の表情や服装など、物理的に観察可能な姿形からも行うことができる。仮想空間内で「個人」の認識を容易にするために、個々の学習者の個性や理解状態を反映した情報をインタフェース上に提示することは効果的である。個々の学習者に特化した情報を見ることで、現実世界の観察と同様に、個々の学習者を「個人」として意識できる。

- 学習者独自の視野場の実現

学習者は独自の視点で学習空間を見ることによって、自分の学習状況に適した情報を取得する。現実世界では、学習者の視野が映し出す情景に学習者の注目や興味を反映した「視野場」が、学習者の独自の視点を反映している。協調学習中に、個々の学習者の学習状況に合うような情報を選別して提供することは、学習者の「視野場」の実現を意味しており、容易な情報の取得を支援する。このような「視野場」を構築するためには、個々の学習者の学習状況や視点をモデル化し、得たいと思っている情報を特定する必要がある。

2.2.2 学習内容支援

協調学習は、対象としている問題の性質に従って、達成すべき目的が異なる。正解が存在する問題であれば議論を通して正解を導出することが要求され、反対に正解が存在しない問題であれば活発な議論を通して問題を考察したり、グループで統一した意見を構築することが目的となる。従って、協調学習支援システムは、対象としている問題に従って、異なる支援アプローチをとる。

林らは、複数の学習者が革新的なアイデアを創出するための協調学習を想定し [34]、野中らの SECI モデル [35] を基に個人とグループ（組織）の知識創造プロセスを捉えて、組織学習における知識管理システム Kfarm を構築している。Kfarm では、知識の内容を記述するためにオントロジー [36] を用いることで、組織全体の知

識を体系化し、学習者間の知識の交換や、組織内での知識の構築などを容易にしている。神田らや遠藤らは個々の学習者がアイデアを列挙でき、それらを関連付けることができるツールを構築している [37, 38]。学習者間の知識交換と提示された知識の体系付けを支援するための、これらのツールは、学習者間である程度知識創造能力を有し、協力的に作用し合うグループで有効である。

一方、正解が存在しない問題におけるグループ内の意見の集約や、円滑な議論の促進など、議論のコーディネーションに焦点をあてた研究では、加藤らがグループ間の合意形成のための代替案の選択を試みている [39]。参加者に案選択の基準とする要素を入力させ、個々の案に対する全ての参加者の非合意度と妥協度を計算している。稲葉らは、グループ間の合意形成を目的として、議論中の発言を「発言意図」に基づいて分類し、「発言意図」間の関係を利用した議論モデルを構築している [40]。さらに、議論モデルに基づき、参加者間の協調の状態を同定し、各状態に適した助言を提示するシステムを構築している。同様に、Tedesco らも意見の矛盾を検出するためのインタラクション・モデルを提案し、そのモデルを用いて議論における矛盾を検出して通知することで、議論状況の改善を試みている [41]。Saitoh らは発言を形態素解析し、名詞、動詞、接続詞の内容と発言中のキーワードから、議論中の主要な話題の遷移を表現したキーワードマップと、議論中にまとめられた知識を表現した概念マップを自動生成して表示することで、円滑なインタラクションを促進している [42]。

正解が存在する問題を対象とした協調学習の場合、議論の表層的な状況だけでなく、内容を把握して正解と比較することによる知的支援が必要である。Nakamura らは協調学習にプライベートエージェントを導入し、プライベートエージェントに個々の学習者の学習状況を観察させ、対応する学習者の問題点を解消するような発言をエージェント自身にさせることで、個々の学習者の理解を促進する方法を示している [24]。Rosatelli らは学習の進捗状況を容易に把握するための手段として、問題解決の過程を7つのステップに分割している [43]。全てのステップに goal とそれを解決するために行わなければならない activity を定義し、ステップ毎の goal と

activity の達成率に従って、学習の進捗を判断している。

我々の対象は、個別学習を基本とし、学習者が自律的に他の学習形態へ移行することができるシームレスな学習環境である。そのような学習環境では、学習者が正解の存在している問題に対し、独自の学習に行き詰まりを感じてそれを解決するという明確な課題を保持してグループを形成することが多い。従って、我々の想定している協調学習環境では、正解が存在する問題に対する学習支援を行う。上述したように、正解が存在する問題では、グループの意見を統一するためのツールや議論の表層情報のみによる支援ではなく、議論の内容を把握し、かつ学習の進行状況を把握し、管理するような支援が必要となる。

インターネット上で、学習者がお互いに意見を交換することによって共通の問題を解決するという協調学習では、

- 学習参加者の理解状態をあらかじめ特定できないため、学習者間で正解を導出できない

という問題が考えられる。このような問題に関して、これまでは個々の学習者の学習状況を把握し、個々の学習者の理解を向上させることを目的とした研究が多くなされてきた [44, 24, 43]。しかし、インターネット上では不特定多数の学習者が協調学習に参加すると考えられるため、個々の学習者の学習状況を管理するのは効率的ではない。我々は、個々の学習者ではなく、支援対象をグループとし、グループ全体を一つとして管理することで、グループの構成人数に捉われずに支援する必要があると考える。

一方、グループを大域的に管理した場合、

- 発言できず、理解が遅れ、議論に参加できない学習者が存在する

という問題が危惧される。将来、仮想学習空間で主に学習されるような状況を想定したとき、性格や理解状態が原因で協調学習の効果を得ることのできない学習者に対して個人的に支援する必要がある。協調学習支援を補足するための個人の学習支

Learnerは疑似学習者であり、学習者と仮想学習空間とのインタフェースを提供する。学習者はLearnerを通して他のエージェントと相互作用したり、Web上に存在する学習コンテンツにアクセスしたりする。協調学習における議論は、複数の学習者がLearnerを通して共有スペースで意見を交換することで実現される。現実世界では、学習者が同一空間を共有するため、他の学習者の表情や動作を見ることが可能である。学習者固有の情報や反応を客観的に観察することで、他の学習者の性格や理解状態を推測することが可能となり、コミュニケーションや学習の進行が円滑になる。個々の学習者間の観察はLearner間のプライベートトーキングラインによって実現する。Learnerは対応する学習者の理解状態や興味をモデル化した情報を保持しており、観察する学習者の要求に応じて学習者を特徴付ける情報をLearner間で交換する。学習者は興味を持った学習者の個人的な情報を把握することで、対応する学習者に対する理解を深めることができる。また、Learnerはモデル化した情報を基に、学習者が注目していると予測される他の学習者に関する情報をプライベートトーキングで自動的に取得して学習者に提供することで、学習者の興味を反映したインタフェースを実現し、学習者の観察行為を容易にする。

Coordinatorは共有スペースを観察して学習状況を把握する。また、必要に応じて助言を生成することによって、学習グループが正解を導出することを支援する[45, 46]。協調学習では議論を通して他の学習者の意見を聞くことで新しい知識を獲得したり、自分の意見を他の学習者に伝えることで自分の考え方を整理できる。議論は学習者の理解状態に大きな影響を与えるため、Coordinatorは議論を促進する助言をグループに対して与える。グループ全体を助言の対象とすることで、Coordinatorの助言に対する多様な反応を期待できる。従って、Coordinatorはグループを大域的に管理し、グループを一つの支援対象とみなす。協調学習空間にCoordinatorを導入することにより、グループ内で正解を導出でき、大半の学習者がその導出過程を理解することが可能になる。

一方、Assistantは個人の学習者の支援を目的とする。協調学習では理解状態が遅れている、あるいはグループに対して意見を言うことが苦手であるなどが原因で議

論についていけない学習者が存在する。グループによる正解の導出が円滑に進んでいる場合には、理解が遅れている学習者にグループ全員で対処するのは他の学習者に大きな負荷となったり、あるいは学習者自身が他の学習者に遠慮するという状況が考えられる。そこで、Assistant は理解が遅れている学習者に対し、グループの議論に参加できる状態まで、個人的に指導する。Coordinator と Learner による協調学習環境から Assistant と Learner による個別学習環境へは学習者の個別指導要求に応じて動的に変化する。個々の学習者が適当である学習環境で学習することが、学習者の学習意欲、効果を高める。従って、Assistant は学習者の要求に応じて生成され、学習者がグループの議論に再び参加すると意思表示した時点で自動的に消滅する。

シームレスな協調学習環境である HARMONY は、個々の学習者が独自で学習する個別学習と、他の学習者との集団学習（協調学習）、集団学習が円滑に進行するようにグループに対して知識を提供する集団教授、そして理解状態が遅れてグループの議論についていけない学習者のための個別教授を実現する。Coordinator, Assistant, Learner は、HARMONY での様々な学習形態を実現するために機能する。個々の学習形態を構成するエージェントを表 2.1 で示す。個別学習形態は、学習者が Learner を通して Web 上の教材データベースにアクセスすることにより、実現可能である。個別教授は学習者と教師の 1 対 1 の学習形態であるため、Learner と Assistant の 1 対 1 の環境で構成される。集団学習は Learner を通した複数の学習者間で実現できるが、HARMONY では学習を誘導する理解状態が高い参加者として Coordinator を組み込むことで円滑な学習を促進している。集団教授は複数の学習者に対して教師が知識を提供するため、Coordinator と不特定多数の Learner で構成される。HARMONY は協調学習環境が中心であるため、Coordinator と Learner で構成される学習形態が基本となる。個別教授環境は協調学習を補佐する形で機能するため、Assistant は Coordinator から学習の進捗状況を取得し、グループの学習状況に沿うように指導を展開することで、協調学習を中心とした仮想学習環境を学習者に提供することができる。

表 2.1: 学習形態とエージェント

学習形態	学習形態を構成するエージェント
個別学習	Learner
個別教授	Learner と Assistant
集団学習	Learner(必要に応じて Coordinator)
集団教授	Learner と Coordinator

2.4 エージェントの機能

2.4.1 Coordinator

Coordinator の目的はグループ内で問題の正解を導出させ、全ての学習者に正解とその導出過程を理解させることである。従って、Coordinator は正解の導出過程を保持し、グループの議論から状況を把握して、学習者間で問題を解決できない場合に助言を生成する。正解の導出経路は一つの問題に対して一般に複数あり、それぞれが複雑に依存している場合が多い。しかし、協調学習では学習者の個々の発言に応じて頻繁に学習状況が変化するため、Coordinator が正解の導出経路を複雑な形式で保持していると学習状況の同定に膨大な時間を要し、適時適切に助言できない場合がある。従って、Coordinator は問題の正解の導出経路を、正解を 100% としたときに導出された箇所への到達割合を表す「正解までの導出割合の変化」、導出経路間の視点の相違」の二つの側面で表現したものを問題に対する知識として保持し、「正解導出の進捗状況」と「議論の広がり」の二つの側面から学習状況を把握する [45, 46]。

正解導出の進捗状況とは、正解を 100% としたときに導出できた割合を表す。一般に問題の導出経路はいくつかのサブゴールを保持しており、個々のサブゴール間を、そのサブゴールを導出するための段階とすることができる。そこで、全ての導出経路を構成する段階に正解に対する割合を割り当て、その割合を基準に全ての段

階を整理したものを解導出シナリオとする。解導出シナリオはステートのリスト構造を成し、正解が導かれるまでの導出過程の度合である導出割合に沿った正解の導出過程を表している。個々のステートは個々の導出割合と対応しており、同様の導出割合にある段階の集合である。個々の段階の導出割合は、そのサブゴールの導出経路中における位置とみなすことができる。個々のステートは、ステートワードと呼ばれる識別子を保持しており、Coordinator は学習者の発言にステートワードが含まれると、対応するステートについて議論されていると認識し、その時点の学習状況を把握する。

一方、議論の広がりは何れだけ異なった視点から意見が導出されたかを表す。協調学習では様々な意見を議論し合うことで柔軟な考え方や発想力が身につくことが期待されるために、問題を様々な角度から議論することが必要となる。用いられた導出手法を基に導出経路間の類似度を定義し、導出された経路の類似度の大きさから議論の広がりを検出する。我々は、導出経路間の類似度を導出経路が分岐している位置と定義する。導出経路中の段階はそれぞれ前の段階に依存しているため、一度異なった導出手法を適用するとそれ以降の段階は異なった考え方を基に導出されたと、みなすことができる。よって、早い段階で分岐した導出経路間はあまり類似しておらず、正解に近い段階で分岐した導出経路間は比較的良く似ていると言える。そこで、議論の進行に従って導出されたそれぞれの経路間の類似度を瞬時に計算するため、全ての導出経路をそれぞれの分岐点を基準とした経路木で表現する。経路木の個々のパスはそれぞれの導出経路に対応しており、個々のノードは経路間の分岐点を表している。また、ノードは正解を 100% としたときの分岐点の導出割合も保持している。Coordinator は議論中に導出された経路を特定して分岐点の導出割合から類似度を特定し、類似度が大きい経路しか導出されていなければ、類似度の小さい経路へ誘導するように助言を生成する（3 章参照）。

2.4.2 Learner

Learner は個々の学習者の仮想協調学習空間へのインタフェースである [46]. また, 仮想学習空間内での個々の学習者の注目行為を実現するため, 対応する学習者の理解状態, 性格, 注目状態などを獲得して個人学習情報としてモデル化する. 個人学習情報は学習の進行に伴って Learner によって構築, 管理される.

Learner は対応する学習者の要求に応じて他の学習者の個人学習情報を獲得する. この際, Learner 自身が他の Learner と交渉すると, その間学習者は協調学習に参加できなくなったり, 他の学習者からの個人学習情報の獲得要求を無視してしまう可能性がある. 従って, Learner は個人学習情報の獲得の際, メディエータを生成して対応する Learner からの個人学習情報の獲得を依頼する. メディエータの目的は要求された個人学習情報を獲得するだけであるため, 学習者の個人学習情報の獲得要求に応じて生成され, 指定された個人学習情報を獲得し, 要求が完了すると消滅する. Learner は情報ネットワーク上に分散しているため, メディエータはモバイルエージェントとして実装される. モバイルエージェントとは情報ネットワークの計算機を移動しながら処理を進めるプログラムで, エージェント自身が移動先や移動タイミングを決定しながら主体的に計算機間を移動する [47]. 学習者の個人学習情報の獲得要求に対し, 移動先の情報を与えられて生成されたメディエータは, 生成元の Learner の位置情報を保持したまま, 対象となる Learner が動作する計算機へ情報ネットワークを通して移動する. 移動先では Learner に個人学習情報を要求し, 個人学習情報を獲得すると, 生成元の Learner が存在する計算機に戻る. 最後に, 生成元の Learner に獲得した個人学習情報を渡し, 消滅する.

他の学習者に注目することは学習者の自発的な動作であるため, Learner は学習者の要求があったときのみ個人学習情報を獲得する. しかし, 協調学習の手段としてよく用いられているチャット機能などでは, 個々の発言は全て同様の形式で表現されており, 個人を明確に識別して特定の学習者に注目するのは困難である. そこで, Learner はチャット機能を備えた議論ツールに対する学習者の発言を整理する

機能も保持する。普段、我々は自分の発言のきっかけとなった発言や、自分の発言に反応した発言を発した相手など、直接会話した相手を注目することが多い。従って、Learner は学習者の発言と関係のある発言を抽出し、話題別に構造化して提示する。

また、Learner は学習者の個人学習情報から学習者の他の学習者に対する注目行為を推定する。注目対象となる学習者を決定すると、対象となる学習者の情報を自動的に取得することで、学習者の注目行為をインタフェース上に実現し、円滑な情報獲得を支援する。協調学習では学習者は議論を通して自分の理解状態を伝えるため、学習者は他の学習者の発言から理解状態や性格を把握し、個々の学習者を位置づける。Learner は他の学習者に対する個々の学習者の注目傾向を、注目者決定ルールとして個人学習情報内に保持する。他の学習者への注目傾向は、発言の種類に応じて異なると考えられるため、注目者決定ルールは発言の種類に応じて整理される。発言が生じると、個人学習情報の対応する注目者決定ルールを用いて全ての学習者に対する注目度を計算し、学習者の注目対象者を決定する。そして、Learner は注目対象者のカメラ画像を自動的に取得してインタフェース上に表示することで、学習者の注目対象者に関する情報収集を容易にする。

2.4.3 Assistant

Assistant は理解状態が遅れている学習者に対し、疑問点を解消したり、議論に再び戻れるように個人的に指導する [48]。Assistant は従来の ITS の枠組みと同様、教材知識を持ち、学習者モデルに基づいて学習者に適切な教授戦略をたてて指導する。学習者が快適だと思える環境で学習させるため、Assistant は個別学習を要求する学習者全てに対し、瞬時に対応しなければならない。従って、Assistant は静的に存在するのではなく、学習者の要求に応じて動的に生成、消滅される。

Assistant の目的は学習者に正解を導出させることではなく、グループの議論に参加できる理解力を学習者に個別に獲得させることである。従って、Assistant は正解

までの教授戦略を作成するのではなく、その時点のグループの導出箇所までの教授戦略をたてる。そのため、AssistantはCoordinatorと一定間隔で通信し、グループの議論の進行に沿って動的に指導ゴール、教授戦略を更新する。

一方、複数の学習者が存在する場合、多くの学習者にとって理解が困難な箇所、疑問に思うことが共通している場合が多い。頻繁に問題となる個所を知ることは、より適切でわかりやすい指導につながる。また、多くの学習者を指導すればするほど学習者間に共通の誤り、共通の疑問点を見つけることができる。Assistantは指導対象の学習者の学習者モデルをそれぞれで構築するため、全てのAssistantが生成した学習者モデルから共通の特徴を統計的に検出したものを、Assistantのヒューリスティックな知識として保存する。Assistantはこのヒューリスティックな知識を考慮して教授戦略を作成することで、より賢く、より適切な指導が可能となる。

2.5 おわりに

我々は仮想学習空間での様々な学習形態の実現を最終目標として、本章はその序章として第一ステップを示した。教師的な役割を果たすCoordinatorと擬似学習者に対応するLearnerによって支援された協調学習に対し、個別教授を実現するAssistantを導入することで、理解が大幅に遅れている学習者など、個人的な支援を必要とする学習者が協調学習と個別指導環境を自由に移行可能な適応型協調学習環境HARMONYを提案した。仮想学習空間内で効果的に学習するためには、学習空間内に様々な学習形態を構成するために必要な役割を構築するだけでなく、個々の役割がそれぞれの学習形態を支援するために効果的に振る舞うことが必要である。3章～6章では、本章で簡潔に述べたCoordinatorとLearnerの協調学習機構について詳しく述べる。

第 3 章

複数の解導出過程が存在する問題における学習状況把握機構

3.1 はじめに

協調学習とは複数の学習者が意見を交換し、協力して解を導出する形態の学習である。複数の学習者から提案された様々な意見を議論することにより、問題に対する深い洞察力の獲得と、個々の問題に適した解の導出過程を自ら構成できる創造力の育成が可能となる。近年情報ネットワークの普及に伴い、情報ネットワーク上で複数の学習者が仮想学習空間を共有可能となり、協調学習が注目されている。学習者が同じ場所に存在することなく、他の学習者と意見を交換できるという利点があるため、これまで学校の教室など、限られた場所で行えなかった協調学習を、学習者の存在場所に関わらず実現可能となる。しかし、同一場所における学習と比べて意思疎通が困難であり、また学習者の問題に対する理解レベルが様々であるために、学習の進捗が膠着するといった課題も生じる。この課題を解決し、協調学習を支援する研究が数多く報告されてきた。

意思疎通の困難さに対処するため、細谷ら [49] は仮想学習空間内の教材の動的な変化を厳密に管理する仮想 3 次元の学習空間を構築した。学習活動の結果を全ての

学習者が共有することによる協調学習の実現を目的に、学習空間内の全ての学習者がアクセスできる教材を構築し、学習者の意思を教材オブジェクトの変化として捉えて表出している。しかし、教材オブジェクトに対する操作履歴を管理していないため、学習者間で意見が対立したり議論が円滑に進行せずに学習が膠着している状況には対処できず、意思疎通の困難さのみを解決しても効果的な協調学習を保証することはできない。一方、良本ら [50] は個々の学習者の学習状況をモニタした上で、適時適切な理解状態の学習者から成る学習グループを形成し、効果的な協調学習を支援するというアプローチを提案した。このアプローチでは、学習者の理解状態をあらかじめ把握しているため、共通の知識・理解状態の学習者から成る学習グループを構成することはできるが、協調学習の内容には関知していないため、学習が膠着している場合には対処できない。学習をいつでも効果的に進めるには学習状況を把握して支援することが必要不可欠である。従って、適切な支援を可能にするための学習状況の表現方法が重要である。

Inaba ら [51] は発言の内容ではなく、発言の種類に焦点をあてて学習状況を同定し、議論の膠着状態を検出して円滑な議論の実現を支援している。議論の状態に着目することにより、意見が交換されず、正解が導出されない状況には対処できるが、誤った導出手法のまま議論が進行する状況には対処できない。Nakamura ら [24] は個々の学習者の理解状態を把握する疑似学習者を導入し、学習グループが活発に議論していない場合や学習者の理解が遅れている場合には、学習者に代わって疑似学習者が発言することで議論を活性化し、学習者の理解を助けるというアプローチを示した。同様に、Nishimoto ら [52] は会話が停滞しているときに新しい話題の展開となるきっかけを与えて、活発な議論を支援するエージェント・ベースの協調学習環境を提案した。Nakamura らと Nishimoto らによる研究は個々の学習者の理解状態を把握するため、学習者の正解に対する理解活動は助長できるが、様々な導出経路を議論することで得られる創発力の育成は期待できない。

我々は、学習の進捗状況を把握して正解の導出が困難な状況や議論が不十分な状態に対して助言を生成し、活発な議論を促進する、すなわち教師的役割を果たす

エージェント Coordinator の構築を目的としている。協調学習では議論を通して他の学習者の意見を聞くことで新しい考えを導出し、個々の学習者では導出できなかった考え方を発見して、創発力を養うことができる。議論の活性化は正解の導出だけでなく、創発力育成のための重要な要素であり、Coordinator は助言が必要な状況に対し、議論のきっかけとなる発言をする。

情報ネットワークのような分散環境下では学習グループの構成はその時々で変化するため、個人の理解状態から学習グループの学習状態を把握することは困難であり、また Coordinator による適時適切な支援の実現を妨げる。従って、Coordinator は学習者個人の理解状態を把握して学習グループを支援するのではなく、学習者の学習グループへの働きかけに応じて学習グループの学習状況を把握する。学習グループの議論を観察することによって、積極的に学習に参加しない学習者も問題に対する知識を獲得できる。

協調学習において、全ての学習者の理解状態を問題の導出経路上で特定し、学習状況を把握することは困難である。そこで学習状況を、

- 1) 導出割合
- 2) 議論の広がり

という2つの視点から把握する。視点1) は正解を導出するまでの進行の度合を、視点2) は導出された経路に対して学習グループ内で議論された発言の幅を表す。様々な正解の導出状況をこれら2つの視点で近似し、学習が効果的でない状態に対して大まかに助言し、学習者に話題の転換や新しい考え方のひらめきを誘発させる。議論は自分の意見を整理したり、他の意見を理解するための重要な意思疎通の手段であるだけでなく、深く議論することで創発力の育成にもつながる。

本研究における Coordinator の立場を明確にするために、学習状況把握の対象を以下のように限定する。

- 1) 理解状態が中程度の学習者による学習グループ

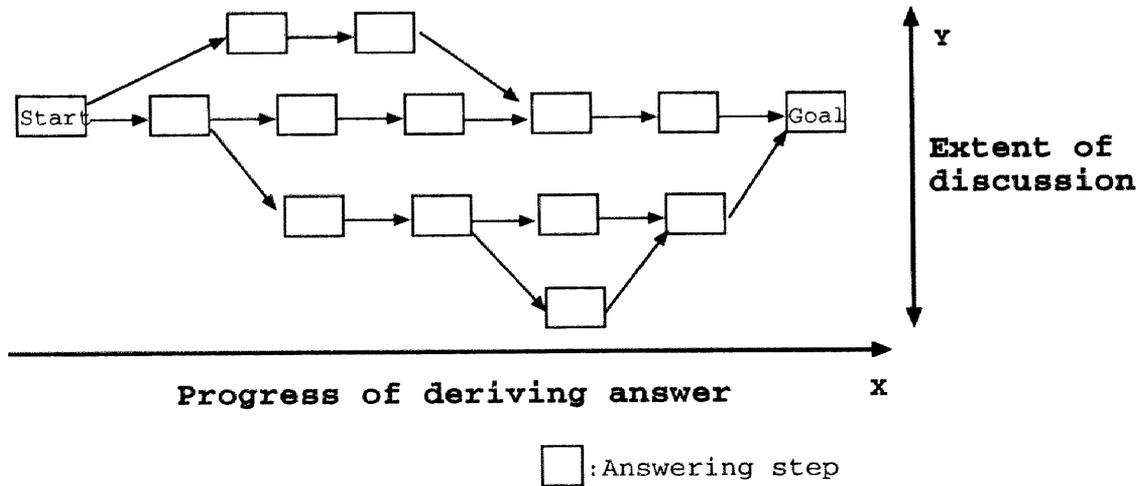


図 3.1: 学習状況

2) 学習グループが一体となった学習活動

「理解状態が中程度の学習者」とは、自分だけでは十分に正解を導出できない学習者を示す。学習者を制限 1) のように限定することで、極端に理解が遅れる学習者が存在する状況や、少数の学習者で正解を直ちに導出してしまふ状況は発生しない。また、制限 2) は正解導出中に話題が分散することによって、学習グループがいくつかのサブグループに分裂しないことを仮定する。複数の意見が同時に発生したときには、その時点で意見を統一する議論が起こり、結果として学習グループ内で共通の導出経路に沿って学習が進行することを前提とするためである。これらの制限の下、高校数学の方程式解法問題を対象とする。

3.2 枠組み

導出経路が複数存在するとき、問題の正解導出過程は図 3.1 のように二次元で表現できる。この導出過程で、X 軸方向は導出経路中の導出段階を基にした正解導出の進捗状況を表し、Y 軸方向は議論の広がりを表している。図 3.1 のように表現された

導出過程で、複数の学習者の理解状態を特定して学習状況を把握することは複雑であり、また個々の学習者よりも学習グループ全体の学習状況が重要なために有意ではない。学習グループは複数の学習者から構成されているが、グループ全体の学習活動を研究の対象としているために、正解の導出過程を導出経路中の導出段階を基準とした導出割合と、正解を導いた導出経路を基準とした議論の広がり度で学習状況を把握する。導出割合は、学習の開始から正解が導かれるまでの導出過程の割合である。学習者は議論することで疑問点を解消したり、理解を深めることができ、学習が円滑に進行していない状況でも議論によってその状況を解消できる。従って、学習の膠着状態に対して正確に膠着箇所を特定しなくても、膠着状態を検出して関係する助言、発言を与えることにより、膠着状態から脱却できる場合が少なくない。一方、学習者がどの導出経路において発言したかを特定し、幅広い議論を展開させることは創発力を育成するためにも有効である。異なった導出経路を議論することに意味があり、導出経路間における議論の相違を瞬時に判断できることが大切である。以下、これら2つの視点に基づいた学習状況の把握方法を説明する。

3.2.1 導出割合による学習状況把握

解を導出する過程では、学習グループ内で正解を導出できればよいが、誤った導出手法で学習が進行したり、意見や議論がないことがある。このような状況に対して、正解の導出経路を理解し、その時点の対応箇所を導出経路内で特定して、必要に応じて次の導出段階を誘発する助言を与え、膠着状態を解消するように支援することは有効である。また、状況に応じて理解が進んでいる学習者に発言を促し、膠着状態を解消させることも重要である。

そこで、解導出シナリオを導入して正解に至る学習過程を表現し、その時点の解導出中の導出箇所をインディケータ `current` で特定する手法を提案する [53, 54, 55]。図 3.2は解導出シナリオの概念図である。解導出シナリオは解の導出が始まってから正解が導出されるまでの時間経過に沿った正解の導出過程であり、現実世界の正

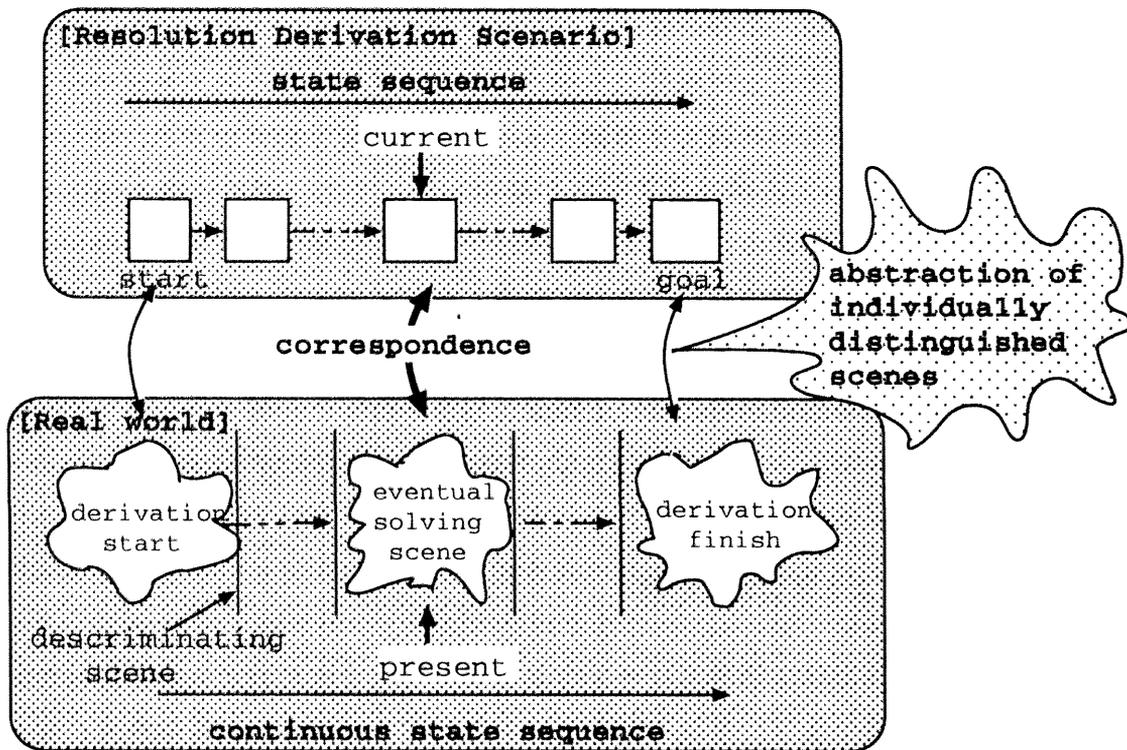


図 3.2: 解導出シナリオの概念図

解の導出段階に対応したステートのリスト構造で表現される。すなわち、最初のステートは問題が提示されて学習が開始した状態を表し、最後のステートは正解が導出されて学習が終了した状態に対応している。導出箇所に対応するステートを `current` で指示することにより、膠着状態に対して適切な助言を生成できる。

一方、学習グループは理解の異なる複数の学習者で構成されているため、正解が導出されても全ての学習者がある導出過程を理解できているとは限らない。理解が遅れ、導出過程を十分に理解できない学習者を学習グループ内で検知して理解を促すことができればよいが、それに対処することなく学習が進行する状況も考えられる。理解が遅れている学習者を支援するために、`current` に加えてインディケータ `lower` を導入する。`lower` は学習グループの理解状態の下限を表現しており、`current` と `lower` の指示するステートの幅から理解が大幅に遅れている学習者を検出することができる。同様に、インディケータ `upper` は学習グループの理解状態の上限を指示しており、理解が優れている学習者が存在する場合は発言を促すなど、学習グループ内の理解状態の範囲を把握することで学習グループの理解状態に応じた助言を生成することが可能となる。

3.2.2 議論の広がりによる学習状況把握

協調学習では様々な問題解決法を理解することも重要であり、同じような解法手順を有する導出過程を何回も議論しても効果的でない。従って、導かれた導出経路を特定し、関連する別の解法について議論されていないと判断された場合、導かれた導出経路とは異なる導出経路へ議論を誘導することは理解を促進できる。全ての導出経路を各々の導出手法に基づいて評価できれば、より広がりのある議論を展開できる。議論の広がり进行评估するために、議論評価マップを導入する。

図 3.3 は議論評価マップの概念図を示す。図中の丸は問題の導出経路に対応しており、黒丸は議論中に導出された導出経路を示している。議論評価マップは問題の解空間に対応し、類似度を尺度として表現される。議論評価マップでは、ある導出経

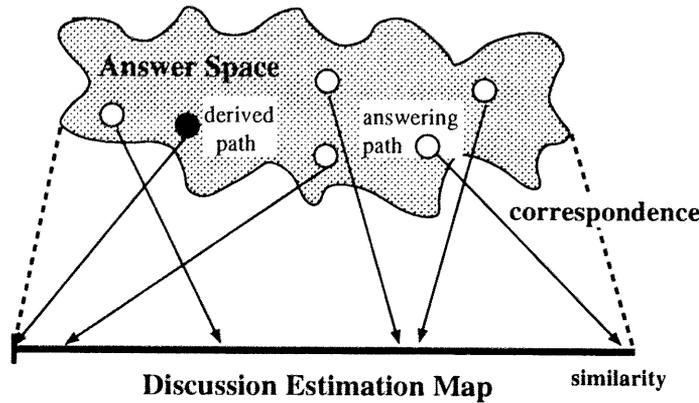


図 3.3: 議論評価マップの概念図

路が学習グループの導いた導出経路と類似しているときは類似度が大きいとして、異なるときは類似度が小さいとして配置される。類似度を基に整理された議論評価マップにより、様々な導出経路が特定され、多様な解法を指導可能とする。

導出経路間の類似度は、それらの導出経路が有する共通の導出ステップの数によって決まる。導出ステップとは、導出経路を構成する個々の導出段階を意味する。共有する導出ステップが多ければ類似しており、少なければ類似していない。導出経路が共有する導出ステップは文字列や記号列のような表層的な記述からではなく、解の導出に用いた考え方によって決まる。同じ記述であっても導出手法が異なれば、それらは異なった導出ステップである。従って、一度異なる記述が現れた後の記述は必ずしも同一の手法を用いて導出されたとは限らない。そこで、導出経路で最初に異なった記述が出現する直前の導出箇所を分岐点と呼び、導出経路の最初から分岐点までを共通部分、分岐点から正解が導出されるまでを非共通部分とする。図 3.4は導出ステップ 1 から導出ステップ 8 へ到達する 2 つの経路、 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 8$ と $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ における共通部分と非共通部分を示している。導出ステップ 3 の次の導出ステップが 4 と 6 で異なるため、2 つの導出経路の分岐点は導出ステップ 3 となり、共通部分は導出経路 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 、導出ステップ 3 よ

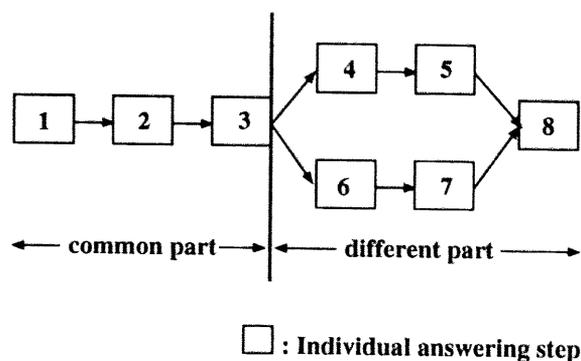


図 3.4: 解法間の共通部分

り後の導出経路は非共通部分となる。

解の導出経路間の類似度を把握するために、導出経路間の分岐点に基づいて学習状況を再構成し、経路木と呼ぶ木構造で全導出経路を表現する。正解が導出された際、経路木によって導出経路と他の導出経路の分岐点を特定して共通部分と非共通部分の割合から類似度を求める。

3.3 正解導出支援機構

正解導出の進捗状況は、正解の導出過程である解導出シナリオと、解導出シナリオ上で学習の進捗状況を指示するインディケータを用いて表現される。まず、解導出シナリオの構成とインディケータの役割を説明し、続いて学習が効果的に進行しない状況の検出方法について述べる。

3.3.1 解導出シナリオ

解導出シナリオは時間経過に沿った正解の導出過程を表しており、正解導出の進捗状況に対応する状態のリスト構造である。各状態はその状態を特徴づける状態ワードを保持している。学習者が状態ワードを入力すると、対

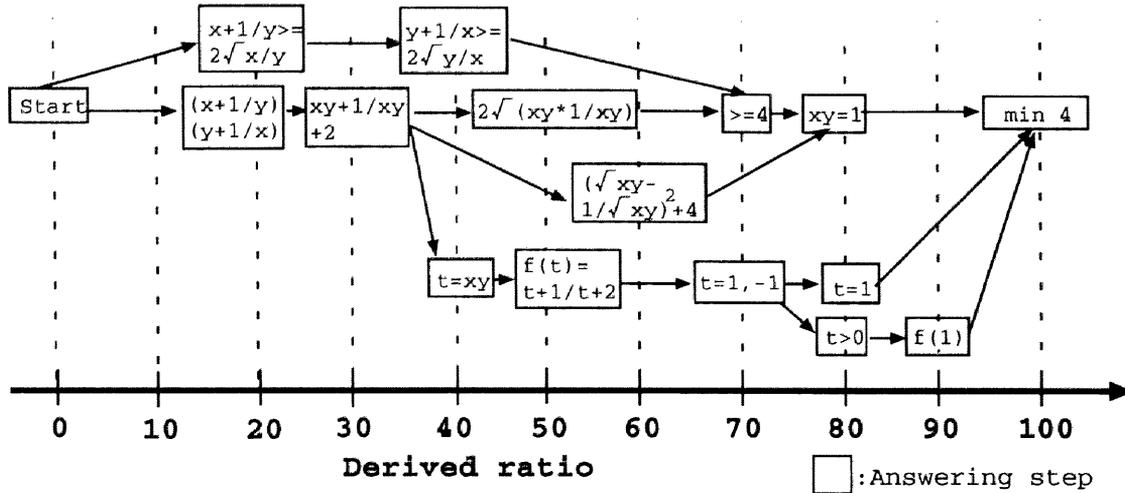


図 3.5: 導出割合を基準に整理した表 3.1 の問題の全導出経路

応するステートが検出され、その時点の正解導出の進捗状況が特定される。正解の導出経路が複数存在する場合には、様々な導出手法が議論されながら正解が導出されるため、一つの導出経路に沿って正解が求められるとは限らない。そこで、問題の全導出過程を一つの解導出シナリオで表現して対処する。

導出経路の種類やステップ数に依存せず、どのような問題に対しても正解の導出過程を解導出シナリオで一意に表現するために、解導出シナリオを構成する個々のステートに対して全導出過程における割合を導出割合と定義する。正解の導出経路は導出に用いられる公式や導出手法を基に分割された導出ステップの順序集合とみなすことができ、各導出ステップは対応する導出手法で導かれた結果によって特徴づけられる。また、個々の導出ステップに対応する正解導出の割合は、導出経路における導出ステップの種類やステップ数に応じて決定される。複数の導出経路を一つの解導出シナリオで表現するため、ステートは個々の導出経路中で同一の導出割合を有する導出ステップの集合で、ステートワードは導出ステップを決定する記述の集合として構成される。

表 3.1: 問題例

問題

$x > 0$ かつ $y > 0$ のとき, $(x + 1/y)(y + 1/x)$ の最小値を求めよ.

表 3.2: 表 3.1 の問題の導出経路の例

< 解法 >

ステップ 1: 与式を計算すると, $(x + 1/y)(y + 1/x) =$

$$\underline{xy + 1/xy + 2} \dots (30)$$

ステップ 2: $xy > 0$ より, 相加相乗平均を用いると,

$$\underline{xy + 1/xy \geq 2\sqrt{(xy \times 1/xy)}} \dots (50) = 2.$$

ステップ 3: よって, $xy + 1/xy + 2 \geq \underline{4} \dots (80)$

ステップ 4: $\underline{xy = 1} \dots (90)$ のとき等号が成立し,

ステップ 5: 最小値 4 $\dots (100)$

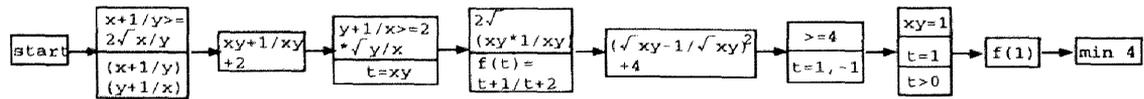


図 3.6: 図 3.5 の導出経路を有する問題の解導出シナリオ

方程式解法問題を用いて解導出シナリオの例を挙げる. 表 3.1 の問題の正解導出経路の一つとして, 表 3.2 の導出経路は, 導出に用いられた手法を基に 5 つの導出ステップから構成されている. 個々の導出ステップは導出手法の結果として下線の数式を保持しており, これらの数式は問題を採点する際, 部分点の基準とみなされる. この問題では正解を求めた導出ステップ 5 を 100 点としたとき, 下線の数式は対応するカッコ内の数字のように部分点が与えられているとする. 個々の導出ステップの導出割合は, 正解の導出を 100 点としたときに個々の導出ステップが保持する数式に対応する部分点と等しく, ステートは同じ部分点を持つ導出ステップの集合となる. また, ステートワードはこれら導出ステップの数式とする. 図 3.5 は表 3.1 の問題について, わかっている全ての導出経路を表 3.2 のように割り当てられた部分点を基準に整理したものである. この問題の解導出シナリオは図 3.6 のようになる. 解導出シナリオのステートは導出割合で統合された導出ステップに対応している. 異なる導出経路に導出割合が同じ導出ステップが存在する場合, これら全ての導出ステップを対応する導出割合のステートとする.

このように構成された解導出シナリオは, 導出経路に沿った個々の導出ステップの関係情報を保持していない. しかし, グループ内での議論によってお互いに疑問点を解消することが期待できる. 膠着状態に対して特定の導出ステップを把握して助言しなくても, 学習が進行していないことを示唆したり, あるいはその状況を解消できる発言者に発言を促すことにより, 議論の転換を与えて議論を先に進めることができる.

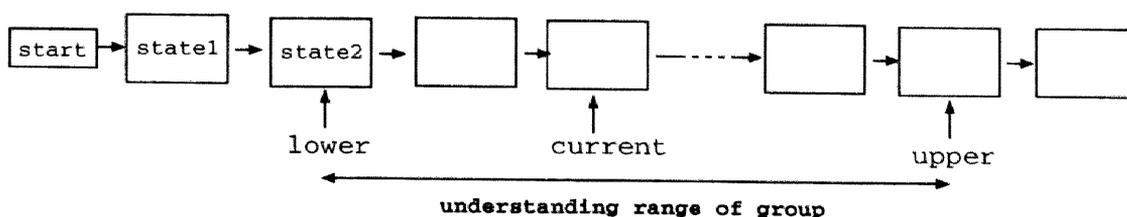


図 3.7: インディケータ

3.3.2 インディケータ

インディケータは解導出シナリオ上で学習グループの学習の進捗状況を表示する指示子であり、current, upper, lowerの3つがある。currentはその時点の導出箇所を指す。upperは一番理解している学習者の導出ステートに対応し、lowerは一番理解が遅れている学習者のステートを指す。その他の学習者の理解状態はupperとlowerの間のいずれかのステートに相当する。図3.7はインディケータを用いた学習の進捗状況の表現例である。個々のインディケータはそれぞれの役割に応じてステートを指示する。

ステートワードが入力されると、インディケータは対応するステートへ移動する。currentはその時点の導出箇所を指示するために、記述中にステートワードが存在すればそれに対応するステートに移動する。また、currentは会話中で導出箇所を前や後に変化させる発言にも反応する。すなわち、導出箇所を前へ進める提案、以前に導出されたステートに戻る質問などにも反応する。一方、最も理解している学習者のステートはupperによって指示され、最も議論が進んだステートである。新しい導出手法の提案、あるいは記述中にステートワードが存在し、それがその時点でまだ導出されていないステートに対応すればupperは移動する。一方、質問や意見が出ない導出ステートを、学習グループの理解の下限とする。学習者が他の学習者の理解を確認すると、疑問がある学習者は何らかの意思を表示することが予想される。また、そうでなくても、他の学習者間の議論を観察することで、疑問を解消

することが可能となる。従って、lower は学習グループの理解を確認する発言に反応する。

Coordinator は、インディケータが指示するステートの位置関係やインディケータの移動状況から学習の進捗状況を把握する。例えば、current と lower の間の距離が開き過ぎていたら、理解が遅れてその時点の導出箇所を理解できない学習者が存在する可能性があり、current が変化しなければ学習の進行が滞っている可能性がある。また、全てのインディケータが最後のステートを指示していれば特定の導出経路に沿って正解が導出されたと判断できる。これら 3 つのインディケータは学習者の個々の発言に対して変化する細かな学習状況を表現することはできない。しかし、学習グループ内ではきっかけとなる助言によって議論が進行し、お互いに疑問点を解消し合って理解を深めることが可能である。これら 3 つのインディケータを用いて、学習の進行が膠着している場合や理解が大幅に遅れている学習者が存在する場合を検出し、そのような状況を示唆することにより議論を展開させることができる。

3.4 議論拡張支援機構

経路木は導出経路間の類似度を特定するために、導出経路の分岐点を基準に木構造で表現される。経路木のノードは導出経路の共通部分の導出ステップの集合であり、エッジはノードの順序関係を表している。すなわち、根ノードから葉ノードまでに含まれる導出ステップは、問題の提示から正解が導出されるまでの正解の導出経路に対応する。

3.2.2 節で述べたように 2 つの導出経路間の共通部分は学習開始時点から最初に異なった記述が現れる直前までである。一度異なる記述が現れた後は、たとえ同じ記述があってもそれを導出した考え方が異なるとして、異なる記述と認識される。従って、導出経路の分岐点は、最初に異なる記述が現れる直前の導出ステップとなる。すなわち、根ノードを構成する導出ステップは学習の開始から最初の分岐点ま

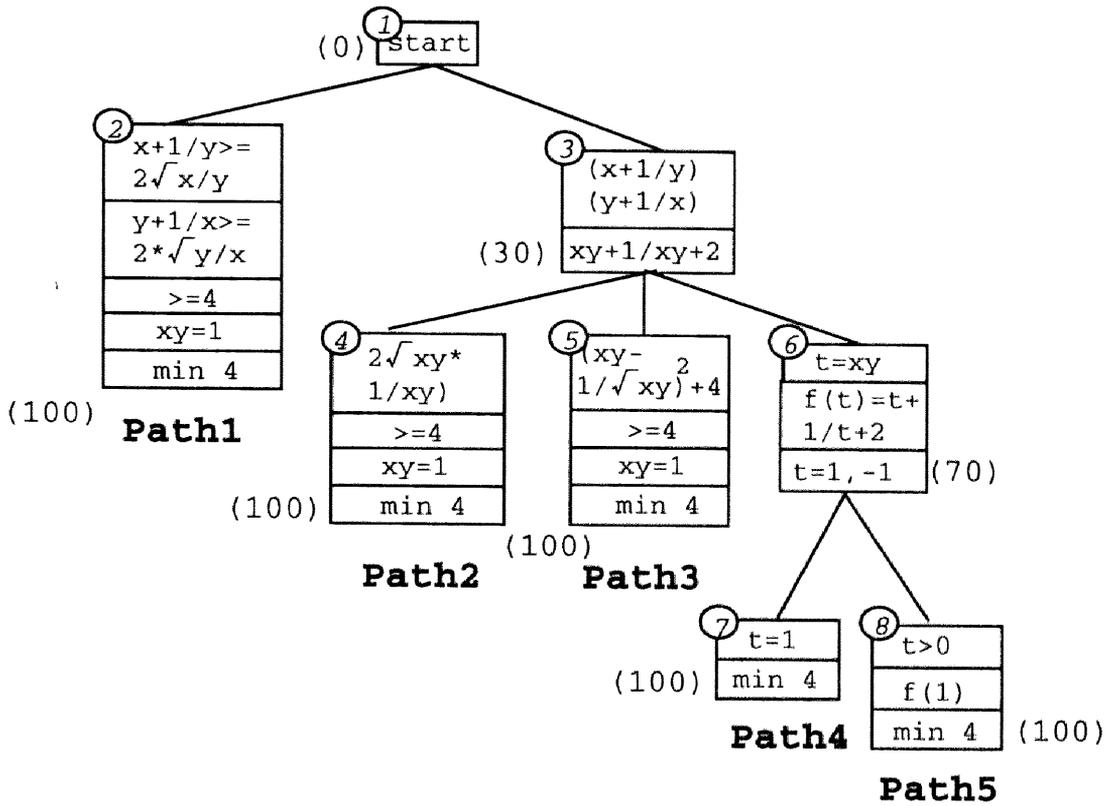


図 3.8: 図 3.5 の問題に対応する経路木

であり、最初の分岐点の次にくる導出ステップからその次の分岐点までは根ノードの子ノードとなる。同様に、個々の分岐点の直後から次の分岐点までを一つのノードとして木を構成し、最後の分岐点から正解を導出するまでの導出ステップを葉ノードとする。

3.4.1 経路木

各ノードはノードワードとノードに含まれている分岐点の導出割合を保持する。このとき、各分岐点の導出割合を分岐割合と定義して、対応する導出経路間の類

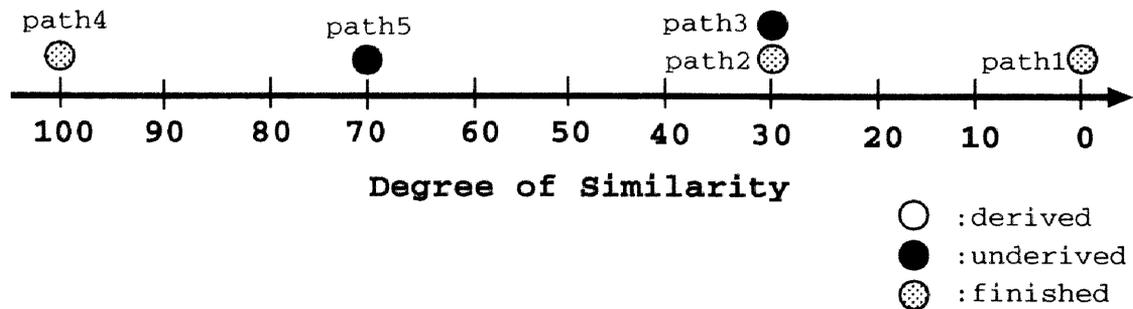


図 3.9: 議論評価マップ上への配置例

似度とする。ノードワードは各ノードに含まれる導出ステップ中の記述であり、ステートワードを決定する際に用いた記述と等しい。ノードワードの入力があると、対応するノードを特定し、その時点で正解を導いている導出経路を把握する。導出経路が特定されると、経路木を用いて特定された導出経路と他の導出経路との類似度を求める。類似度は導出経路における共通部分のステップ数に比例し、共通部分は学習の開始から正解の導出までの分岐点の位置に依存する。分岐点の位置は、分岐割合に等しいので、各ノードに含まれる分岐割合を各ノードの構成要素とする。正解が導出されると、特定された導出経路と個々の導出経路に対して、ノードの分岐割合を個々の導出経路の類似度とする。

例を用いて経路木の構成方法を説明する。図 3.5 で示された導出経路を持つ問題の経路木は図 3.8 のようになる。図 3.8 の各ノード内の記述はノードワードであり、ノードに付帯したカッコ内の数字は対応するノードに含まれる分岐割合を示す。各ノードの識別子は丸付きの数字で示されている。この経路木の根ノードは“学習の開始”に対応する導出ステップで構成され、ノード 1 の分岐割合は 0 となる。導出経路 1 は分岐後、他の導出経路に分岐しないため、分岐後の導出ステップから正解が導かれる最後の導出ステップまでを葉ノードとする。一方、導出経路 2～5 に対応する導出過程では分岐割合が 30 の導出ステップの次に分岐する。従って、ノー

ド3は分岐割合が0の導出ステップから、次の分岐割合が30の分岐点までで構成され、ノード3の分岐割合は30となる。導出経路2, 導出経路3はこれ以上分岐を含まないため、それぞれノード3の子ノードとなる(ノード4, 5)。導出経路4, 5に対応する導出過程は次の分岐点である分岐割合70に対応する導出ステップまででノードを生成し(ノード6)、分岐割合が70から正解が導出されるまでの導出ステップで対応する個々の葉ノードが生成される(ノード7, 8)。葉ノードは分岐を含まないため、分岐割合は100となる。

3.4.2 議論評価マップ

議論評価マップは類似度を尺度とした問題の解空間の写像である。導出経路間の類似度は分岐割合によって決まる。導かれた導出経路と等しければ類似度は100となり、最初から全く異なる手法を用いていれば類似度は0となる。全ての導出経路を議論評価マップ上に配置することで、導かれた導出経路に対して他の導出経路の導出手法の違いを把握でき、新しい導出経路が存在すればその導出経路に沿った議論を促すことが可能となる。

正解が導出されると、個々の導出経路は議論評価マップ上に類似度によって配置される。まず、学習グループの最終的な導出経路に対応する経路木の葉ノードを選定し、そのノードから根ノードへ向かって木をたどる。途中、その導出経路から分岐する導出経路の類似度を分岐点となるノードの分岐割合とし、議論評価マップ上の対応位置に導出経路を導出状態と共に配置する。個々の導出経路は derived, underived, finished のいずれかの状態を持つ(配置例: 図3.9)。derived は対応する導出経路に関して議論中に発言があったことを、underived は発言がなかったことを、finished はすでに十分議論されたことを表し、学習グループの最終的な導出経路に対応する。

導出経路が配置された議論評価マップを基に、議論されていない導出経路に対して必要に応じて助言が生成される。すでに理解した考え方について議論しても新

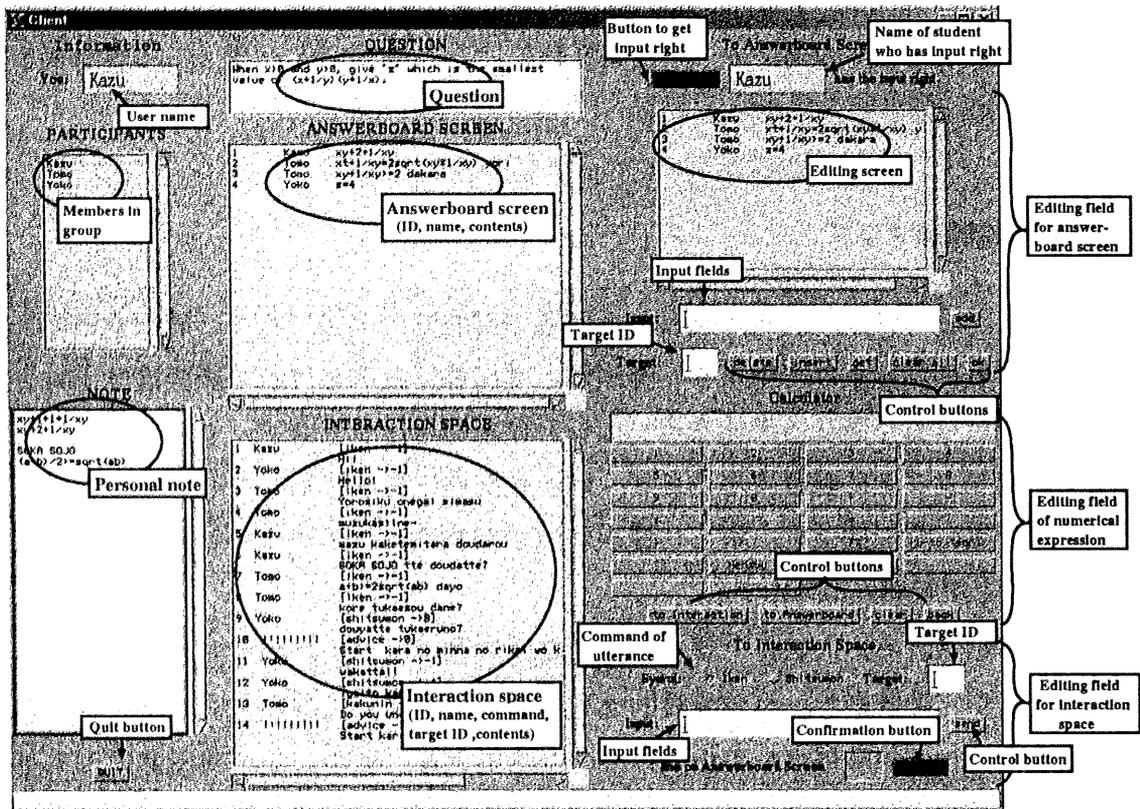


図 3.10: インタフェース：黒板画面と会話画面

しい知識は得られない。十分議論された finished 以外の導出経路が助言の対象となる。議論評価マップ上で導かれた導出経路と類似度が小さく、状態が underived の導出経路があれば、導出に用いられなかった導出経路が存在し、その導出経路に対して意見を持っている学習者がいないと判断できる。このような導出経路に対して導出手法を示唆することで、学習者が新しい視点から正解を導出することを誘発できる。また、導出経路の状態が derived であれば、最終的に正解の導出に用いられなかったが、対応する導出経路について意見を持っている学習者が存在すると考えられる。このような場合に、対応する導出経路に関して発言した学習者に意見を求めることで、様々な導出経路に沿った議論を促す。全ての導出経路の状態が finished になるか、導かれた導出経路と類似度が小さい導出経路が存在しなくなれば、正解が導出できて全ての導出手法について議論が終了したと判断され、協調学習は終了する。

3.5 プロトタイプ・システム

提案する協調学習支援空間のプロトタイプ・システムについて説明する。本プロトタイプ・システムは学習者間の議論から、正解の導出状況と議論の広がり把握し、必要に応じて簡単な助言を生成する。

本システムはウェブ上ではなく、プロトタイプ的に UDP 通信を用いたサーバ・クライアントシステムとして構成した。学習者はクライアントを介してサーバや他のクライアントと通信することにより、学習に参加できる。サーバ・クライアント間の通信には通信回数が多く、一回でやりとりするデータ量が少ない通信に適している UDP 通信を用いた [56]。本章で提案した学習支援機能はサーバ上に構築された。学習支援機能は学習者からの会話、黒板への入力を取得して学習状況を把握し、必要に応じて助言を生成して学習者全員に送信する。

3.5.1 インタフェース

図 3.10 に本プロトタイプ・システムのインタフェースを示す。学習グループが議論する問題は図 3.10 の中央上段に表示され、学習者は図 3.10 の左下段に位置するノートに自由に記述することにより、個人の解答を作成する。学習者は図 3.10 の中央中段にある黒板画面 (ANSWERBOARD SCREEN) と下段にある会話画面 (INTERACTION SPACE) を用いて意見を交換しながら他の学習者と協調学習する。

黒板画面は記述による学習活動を支援するための画面であり、導かれた導出経路をまとめたり、まとまった意見を提示するための画面である。一度に一人の学習者のみが記入可能であり、記入権が設定されている。黒板画面への記入を希望する学習者はまず記入権を獲得する要求を出す。記入権を保持している学習者の名前が図 3.10 の左上段に表示されるため、学習者はそれによって記入権が占有されているか否かを判断し、記入権の取得を要求できる。記入権を獲得すると図 3.10 の右上段に記述可能となり、その時点で黒板に記述されている内容が複写される。学習者は複写された黒板画面の記述に追加するだけでなく、消去、挿入することで独自の解法を作成し、ok ボタンを押して黒板画面の内容を書き換えることができる。黒板画面の内容を入れ換えると記入権は自動的に解放される。システムは黒板画面の記述が学習グループの解答であると判断し、黒板画面に記述された内容から学習グループの用いた導出経路を特定して、他の考え方からなる導出経路の存在を判断する。

会話画面では、学習者はチャット・システムのようにいつでも好きなときに意見を記述できる。システムがインディケータを用いて正解の導出状況を特定する際、発言内容を明確にするために、コマンドを用意した。学習者はコマンドを指定して会話画面へ意見を入力する。コマンドには Shitsumon, Kakunin, Iken がある。Shitsumon は以前に議論された導出箇所に対する質問であり、current はこの発言内にステートワードがあれば指示するステートを変更する。この発言に以前に導出されていないステートのステートワードが入力された場合、学習者が意図してステートワードを入力したのではなく、偶発的に該当するステートワードが入力されたと

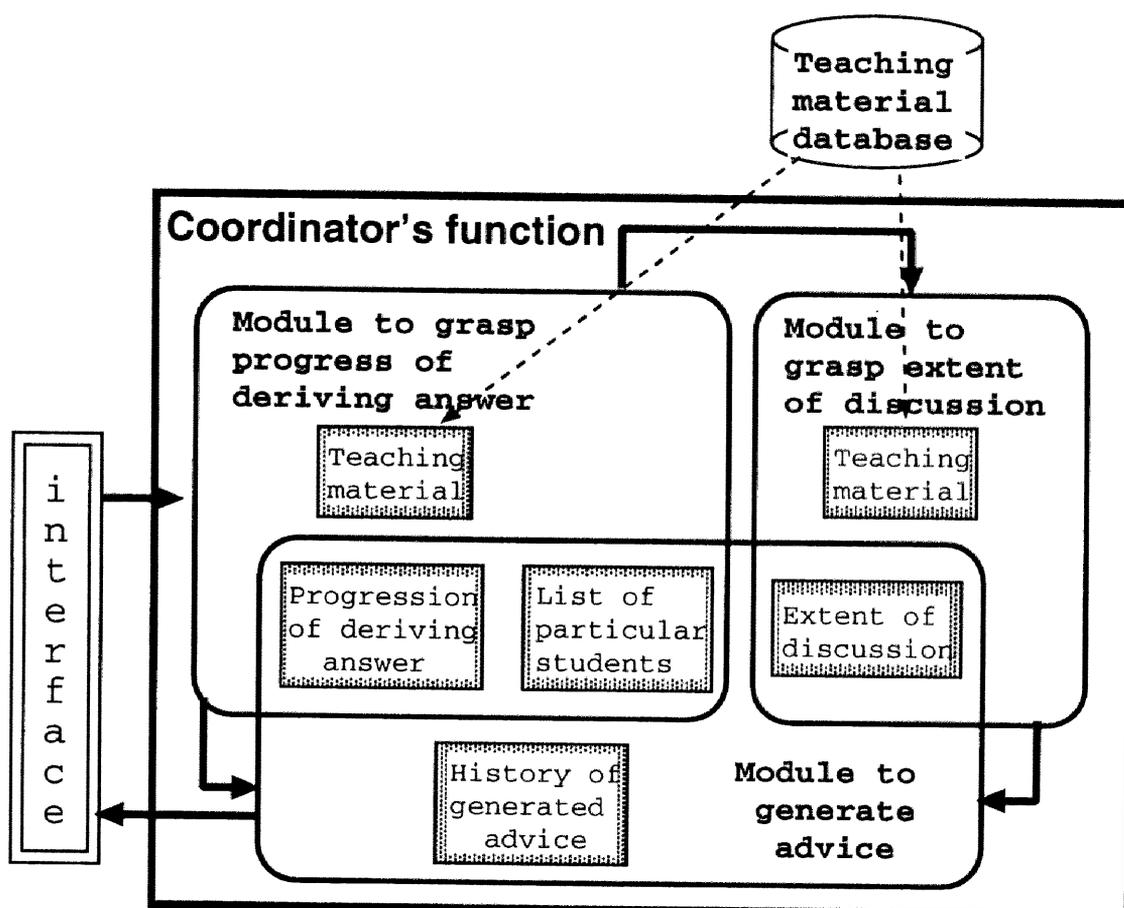


図 3.11: 学習支援機能の構成図

判断し、upper は移動しない。Kakunin は黒板画面上の記述を指定し、他の全ての学習者に特定の導出ステップに対する理解を確認する発言であり、理解が遅れている学習者に発言のきっかけを与える。lower は全ての学習者に理解を確認する意見に反応するため、Kakunin で指示された記述にステートワードがあれば、lower は対応するステートへ移動する。また、その他の発言は Iken で総括される。この発言内にステートワードが存在すれば解の導出が進んだとして、upper と current は対応するステージへ移動する。この会話では、個々の発言間の関係を示し、学習者間の意思疎通を容易にするために、会話画面上の識別 ID を指示して発言する。会話画面の発言内容を発言の ID、コマンド名、発言者名と発言対象の識別 ID を伴って表示することで、円滑な議論を支援できる。

さらに、学習者の数式の入力を助けるため、図 3.10 の左中段に数式エディタを用意した。数式エディタはボタンを押すと対応する内容が表示される。学習者は入力した数式を黒板画面、あるいは会話画面を選択して送信する。学習者は送信ボタンを押すと対応する画面の入力フィールドに数式が複写され、内容を確認した上で必要ならば変更を加え、それぞれの画面へ表示することができる。この数式エディタを用意することで、キーボードに慣れていない学習者でも容易に意見を述べることができる。

3.5.2 学習支援機能

Coordinator の協調学習支援機構の構成図を図 3.11 に示す。正解導出状況把握モジュール、議論状況把握モジュール、助言生成モジュールの 3 つのモジュールで構成される。正解導出状況把握モジュールは、導出割合に沿った進行状況を、解導出シナリオとインディケータを用いて表現する。このモジュールで正解が導出されたと判断された場合、導出されていない他の導出経路に沿った学習を促すために、議論評価マップを用いて問題の解空間を表現する議論状況把握モジュールへ制御を移す。正解導出状況把握モジュールと議論状況把握モジュールで学習の進行状況の把

握が終了すると、助言生成モジュールに制御が移動し、状況に応じて助言が生成されて学習グループに提示される。

正解導出状況把握モジュールは教材知識を参照して学習者の入力から正解導出状況を把握し、注目学習者リストを作成する。教材知識は問題の導出過程を解導出シナリオで表現したものであり、学習支援機能が実行されると同時に教材データベースから作成される。また、必要に応じて学習者に発言を促すことは効果的な議論を支援するために有用である。理解が進んでいる学習者や議論を活性化させる学習者など、目立った特徴を持った学習者を注目学習者リストに記憶させる。本システムでは最初に upper を移動させた学習者を、その時点で理解が最も進んでいる学習者として保持する。議論状況把握モジュールは正解導出状況把握モジュールと同様に教材知識を参照して議論の広がり把握する。このモジュール上の教材知識は経路木であり、教材データベースから作成される。助言生成モジュールは個々の学習状況に応じて適切な助言を生成する。正解導出状況と議論の広がりから学習状況を把握し、注目学習者リスト、助言履歴を参照しながら助言を生成する。助言履歴はシステムがそれまでに提示した助言の集合である。以前に助言の対象となったステートと導出経路について同一の助言を提示しても議論の発展は期待できない。従って、以前に生成した助言をチェックすることにより、状況に応じた助言を生成する。

表 3.3 に本システムで用意した助言を示す。状況に応じた学習活動の終了、学習者への発言の催促、適当な導出段階への議論の誘発の 3 種類の助言が可能である。上述した助言は会話画面上に他の発言と同様の形式で表示される。

正解導出支援では全てのインディケータが最終ステートを指示すればある導出経路に従って正解が導出され、全ての学習者がその導出経路を理解したと判断できる。従って、システムはある導出経路において正解の導出が終了したことを示唆し、議論拡張支援の視点から学習状況を把握する。また、全てのインディケータが指示するステートが長時間変更されなければ誤った意見を基に学習が進行していると判断される。このような状況では、正しい導出経路に従って最後に導出された記

表 3.3: 助言

状況	助言
正解導出支援	
全てのインディケータが最後のステートを指示	正解が導出されたことを示唆
インディケータの指示するステートが長時間変化しない	最後に状況を変化させた状況から膠着状態であることを示唆
current と lower の距離が大きい	理解していない学習者が存在することを示唆
議論拡張支援	
全ての導出経路の状態が finished	協調学習の終了を宣言
類似度が小さく、状態が derived の導出経路が存在	対応する導出経路に沿った発言の内容を考察することの指示
類似度が小さく、状態が underived の導出経路が存在	対応する導出経路への分岐点を指摘し、導出方法のヒントを提示

述を， current が指示しているステージから取得し，対応する記述から正解を導出させるように支援する． current と lower 間の距離が大きいときは理解が遅れ，その時点の導出箇所を理解できない学習者が存在するため， lower が指示しているステートから詳しく議論し直すように発言する．

一方，議論拡張支援は助言の対象となる導出経路がなくなると終了する．議論評価マップ上で全ての導出経路の状態が finished になるか，個々の導出経路の類似度が導かれた導出手法と類似していれば協調学習を終了する．しかし，類似度が小さい導出経路が存在すれば，未導出の導出経路に沿った議論を促す．助言の対象とな

る導出経路の状態が derived であれば、対応する導出経路に沿った意見を保持している学習者がいるとして、その学習者に発言を促す。反対に、助言の対象となる導出経路の状態が underived の場合、その時点で導かれた導出経路と、助言の対象となる導出経路との分岐点にあたる導出ステップへ議論を戻し、他の導出経路が存在することを指摘する。

このように、助言の対象となる学習状況を検出し、個々の学習状況に応じた助言を提示することで、議論の内容に変更を与え、学習が効果的に進行していない状況を解消することができる。

3.6 評価実験と考察

本プロトタイプ・システムに関して、2種類の評価実験をした。まず、研究室の学生による協調学習中にシステムが把握したグループの学習状況を分析し、現実世界の学習状況と比較することによって、Coordinatorの学習状況把握機構の妥当性を評価した。次に、本システムと同じインタフェースを持ち、学習支援機能を持たない比較用システムを用意し、高校2年生から成る6つの学習グループを3グループずつに分けて本システムか比較用システムのどちらかを用いて協調学習させ、学生のアンケートを比較することにより、本システムの有効性を実証した。以下、それぞれの実験結果について述べる。

3.6.1 Coordinatorの学習状況と現実世界の比較による評価

研究室内の4人の学生を対象に、本プロトタイプ・システムを用いて協調学習させ、評価実験した。全ての学生は計算機を用いたコミュニケーションについてある程度精通している。実験は研究室の計算機室で行ったが、学生は直接コミュニケーションすることはできず、計算機を介してのみコミュニケーションが可能である。

我々はまず、学生にシステムの使い方を説明し、インタフェースの利用方法を把握させてから、表3.1の問題について協調学習させた。表3.1の問題の解法として、

あらかじめ研究室の 10 人の学生から集めた解答を基に 4 種類の異なる解法を用意した。我々は適用する導出手法を基準に解法をそれぞれ異なるステップに分割し、ステートワードとノードワードをそれぞれ定義した。実験後、個々の学生から学習のログを見ながら実際の学習状況の変化を調査し、システムが検出した学習状況と比較した。以後、被験者となる学生を学習者と呼ぶ。

図 3.12 に解導出シナリオと経路木に沿った実験結果を示す。図 3.12 では、個々の学習状況を scene とし、現実世界あるいはシステムの検出した scene の変化を、そのきっかけとなる発言と共に示す。個々の scene は、システムの検出した学習状況と、学習後に調査した個々の学習者の実際の学習の進行状況で描かれている。個々の学習者の実際の学習の進行状況は、円で囲まれたアルファベット A, B, C, D で表現されており、個々のアルファベットがそれぞれの学習者に対応している。本実験では、実際は、学習者 A は問題が提示され、学習が開始された時点で適用すべき解法を理解しており、他の学習者は議論を通して徐々に解法を理解した。

本システムを用いた協調学習では、学習者は自分の意見に確信を持てるようになってからシステムに入力するという傾向が見られたため、解導出シナリオを用いた学習の進行状況把握では (図 3.12(a)), システムは現実世界の学習者の理解状態を少し遅れて把握しているということがわかる。さらに、システムは、学習者 A が意見を入力しなかったためにグループの理解状態の上限を正確に把握することができなかったように、学習者がシステムを通して意見を提示しなければ対応するグループの理解状態を正確に把握することができない。しかし、学習グループが学習を円滑に進行している場合は問題はなく、学習が円滑に進行していない場合には対応する学習者からの発言が期待できるため、問題はないと言える。

本実験では、学習が効果的に進行していない状況が数回検出され、その原因は“長期間学習が膠着状態している”と“理解が遅れていて現在の学習の進行についけない学習者が存在する”の 2 種類であった。学習の膠着状態に対し、システムは COMMENT 1, 2, 4 を助言として生成した。COMMENT 1, 2 の後には、学習者 A がヒントをグループに提示し、他の学習者の理解状態が向上するという現象

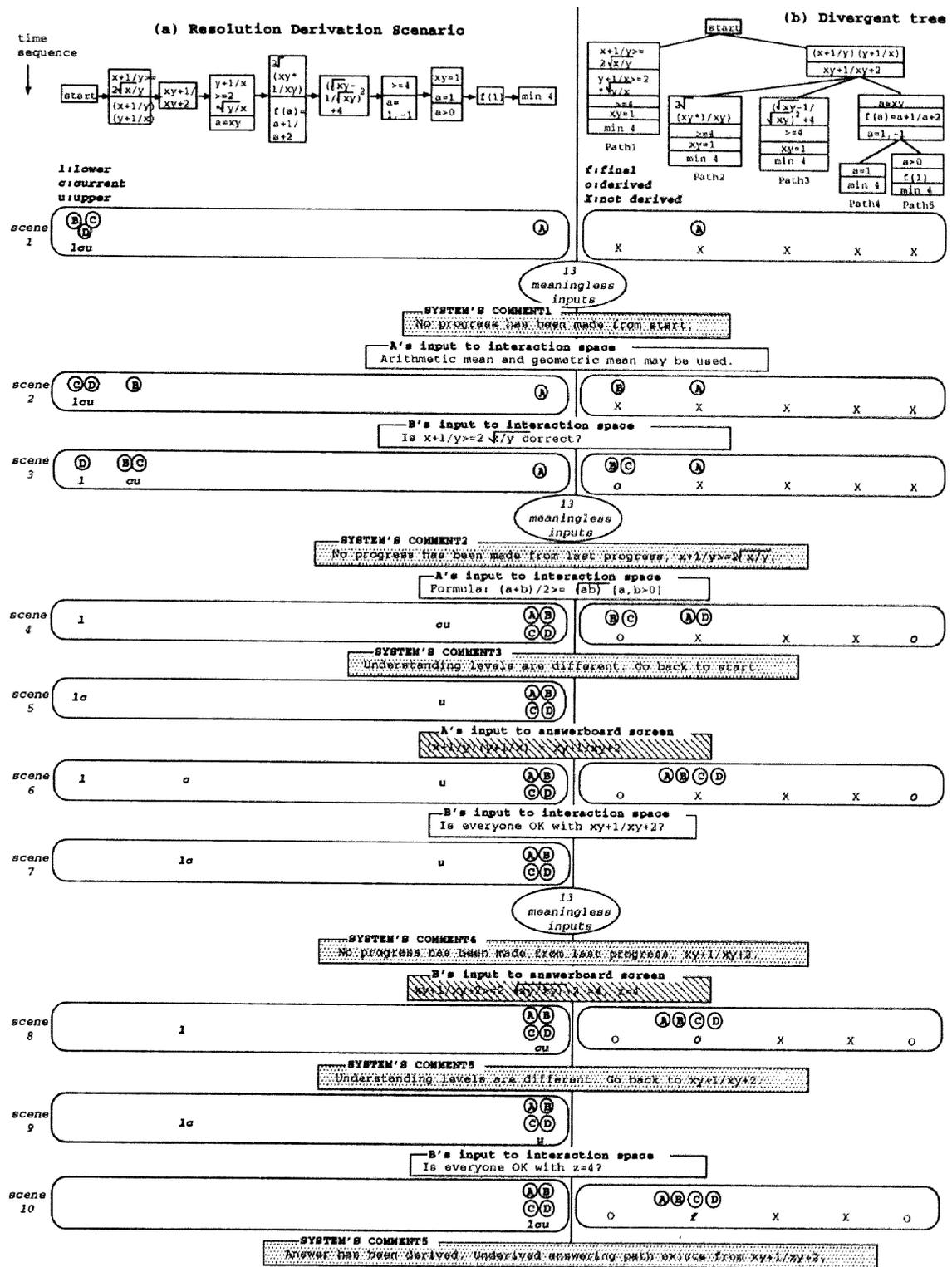


図 3.12: 解導出シナリオと経路木に沿った学習結果

がみられた。また、COMMENT 4が提示されると、学習者Bが黒板画面に解を記述し、学習グループとしての正解の導出が促進したため、これらのシステムの助言は学習の進行に効果的に作用したといえる。理解が遅れている学習者の存在に対しては、システムはCOMMENT 3, 5を生成した。実際、この学習グループでは全ての学習者は議論箇所を理解していたため、これらの助言は必要ではなかった。しかし、我々が対象としているウェブ上での協調学習では、不特定多数の学習者が学習グループを構成するため、学習の進行に従って他の学習者の理解状態を聞くことは、全ての学習者に目標を達成させるという観点から重要である。本実験では、COMMENT 5が生成された後、学習者Bがその時点の議論箇所に対して他の学習者の理解状態を確認している。このように、システムの発言に対して、何らかの反応を得られることが想定され、もし理解状態が遅れている学習者が存在している場合は、その理解状態を高めることができる。

本実験中に個々の学習者によって導出された解法は、解導出シナリオの場合と同様に、経路木上の対応する経路にある円で囲まれたアルファベットで指示されている(図3.12(b))。学習が開始された時点では、学習者Aのみが正解の解法を把握しており、システムはどの学習者も解法を理解していないと判断していた。学習中、経路1, 2が導出されたが、システム中のノードワード・マッチングの曖昧性が原因で、システムは経路5も導出されたと検出した。最後に *scene10* で経路2に沿って解法が導出され、システムは学習中に議論されなかった他の経路、すなわち経路3, 4についても考察するように促す助言をCOMMENT 5で生成した。

本実験では、システムが現実世界の学習状況を必ずしも正確に把握していないという結果が得られた。特に、システムは確認発言に応じてグループの理解状態の下限を特定しているため、確認発言が生じる前に全ての学習者が問題を理解しているような状況を正確に把握することはできない。しかし、全ての学習者が問題を理解している場合、システムの助言は必要ない。我々の目的は学習状況を正確に把握することではなくて、学習の膠着状態を検出して必要時に助言を生成することであるため、学習状況を正確に把握できなくても問題がないと言える。

3.6.2 学習支援機構を含まないシステムと比較することによる評価

高校2年生を対象に本プロトタイプ・システムを評価実験した。本システムの有効性を実証するため、本システムと同じインタフェースを持ち、学習支援機能を持たないシステムと比較した。学習支援機能を持つシステムをシステムA、持たないシステムをシステムBと呼ぶ。2人～6人からなる3つの学習グループに表3.1の問題をシステムAを用いて20分程度学習させ、また同じ問題を3人ずつの2つの学習グループにシステムBを用いて20分程度学習させた。システムA、システムBの学習グループは全く独立に形成し、学習終了後にそれぞれの学習者に問題に対する理解状態をアンケートで回答させた。さらに、システムAの学習者グループにはシステムの助言についてもアンケートに答えさせた。実験に先だって20分程度インタフェースの説明を兼ねて入力練習を行ってインタフェースの使用方法を習得させ、その後学習を開始した。全ての学習者は計算機を用いた学習は初めてで、ほとんどが計算機に慣れていなかった。学習者には同じ室内の異なる計算機を使用させたが、直接会話することを禁止した。また、紙や鉛筆を用いて計算機以外で学習することも禁止しており、積極的に計算機を利用することを促した。

表3.4に学習者の問題理解に関するアンケート結果をシステムA、Bそれぞれについて示した。問題の難易度に関して、システムAでは学習者の7割が難しかったと感じたのに対し、システムBでは学習者の約7割が簡単だったと感じたことから、システムBで学習した学習者の方が問題の理解レベルが高いことがわかる。しかし、学習終了後に問題に対する理解を聞いたところ、システムAでは学習者の8割が理解できたと答えており、そのうち半分の学習者が非常に理解できたと回答している。システムBでは一人しか非常に理解できたと回答しておらず、全く理解できなかったと答えた学習者も一人存在した。システムAを用いた学習者の方が問題が難しいと感じたにも関わらず、全体的に理解状態が良いことから、本システムが学習グループ全体の理解状態の向上に対して有効であると判断することができる。

表3.5にシステムAを用いた学習者に対して助言についてのアンケート結果を示

表 3.4: アンケート結果 1

問題の難易度はどうでしたか？		
	学習支援機能あり (A)	学習支援機能なし (B)
難しかった	2人	1人
ちょっと難しかった	5人	1人
ちょうどよい	0人	0人
比較的簡単であった	2人	2人
非常に簡単であった	1人	2人
問題は理解できましたか？		
	学習支援機能あり (A)	学習支援機能なし (B)
非常に理解できた	5人	1人
まあまあ理解できた	3人	4人
どちらとも言えない	2人	0人
あまり理解できなかった	0人	0人
全く理解できなかった	0人	1人

す。表 3.5は、表 3.4の問題の難易度に関する回答を基準に示しており、表 3.4で問題が難しかった・ちょっと難しかったと答えた学習者を「問題を難しいと感じた」に、比較的簡単であった・非常に簡単であったと答えた学習者を「問題を簡単であったと感じた」に割り当てている。助言のタイミングについては5割の学習者が適切であったと述べている一方で、3割の学習者が全く適切でなかったと回答している。問題を難しいと感じた学習者では半数以上が助言のタイミングが適切であったと答えているのに対し、問題を簡単であったと感じた学習者の多くが助言のタイミングは適切でなかったと答えている。これは、問題を簡単であったと感じた学習者は自分で正解が導出できるため、助言を得る必要がないと感じているからである。一方、助言の内容については全体の2割の学習者が適切でないと感じているのに対し、6割の学習者が適切であったと評価している。特に、問題を簡単であったと感じている学習者は全て、助言の内容が適切であったと答えている。問題を簡単であったと感じている学習者は問題に関して比較的知識がある学習者であるため、この結果から、助言の内容がその時点の学習状況に対して適切であったといえる。従って、本システムは学習状況をほぼ適切に把握し、状況に応じた助言を生成したと判断することができる。

以上のことから、本システムは少数の学習グループの下では、特に理解状態が遅れている学習者にとっては適切なタイミングで効果的な助言を生成できており、学習グループ全体の理解状態を向上させるのに大いに有効であると評価できる。今後は学習グループ参加者数をいろいろと変化させ、より大人数の学習グループにおいて本システムの有効性を実証していく必要がある。

3.7 おわりに

本章では、協調学習の教師の役割を果たす Coordinator エージェントの学習状況把握機構を報告した。Coordinator は、協調学習の進捗状況を、正解の導出割合と議論の広がりとの2つの視点から把握し、個々の導出経路に沿った正解の進捗と、問

表 3.5: アンケート結果 2

助言のタイミングはどうでしたか？		
	問題を簡単であったと感じた	問題を難しいと感じた
適切であった	0 人	0 人
だいたい適切であった	1 人	4 人
どちらとも言えない	0 人	1 人
あまり適切でなかった	1 人	0 人
全く適切でなかった	1 人	2 人
助言の内容はどうでしたか？		
	問題を簡単であったと感じた	問題を難しいと感じた
適切であった	0 人	3 人
だいたい適切であった	3 人	0 人
どちらとも言えない	0 人	2 人
あまり適切でなかった	0 人	1 人
全く適切でなかった	0 人	1 人

題に対する様々な視点からの導出経路の理解を支援することで、正解を導出するだけでなく、創発力の育成を目的としている。本章ではプロトタイプ・システムを構築し、学習状況把握方法の有効性を評価し、明らかにした。

本章で提案した学習状況把握方法は、各導出経路の導出の有無と導出割合による正解の導出の進捗状況しか表現できないため、個々の導出経路別の学習の進捗状況は把握できない。また、学習の状況変化の判断はそれぞれステートワード、ノードワードのキーワードマッチングを用いているため、あいまいである。しかし、我々の目的は、議論に積極的に参加して学習を効果的な方向へ誘導するのではなく、効果的な学習を実施できない状況に対してこれを解消して議論の内容を転換させることである。また、学習グループ内では議論によってある程度学習状況を改善することが可能である。従って、正確な学習状況を把握する必要はなく、評価実験の結果からも本章で提案した学習状況把握方法は我々の目的を十分満足している。

本システムは対象とする学習者を理解レベルが中程度の学習者と制限しているため、評価実験で明らかになったように理解レベルの高い学習者には助言が効果的に作用しない。協調学習には、正解を導出するだけでなく、理解していない学習者に説明することによって理解を確認したり、新しい考え方を発見するという利点もある。しかし、本システムを用いた学習者はそのような協調学習の一面を認識することが困難であったために、良いアンケート結果を得ることができなかった。従って、理解レベルが高い学習者にとっても協調学習の効果を認識させるよう、助言の提示方法を工夫する必要がある。

Coordinatorの目的は、正解を導出させるだけでなく、創発力を育成することである。創発力の育成に関して、本プロトタイプ・システムでは、様々な導出経路に関して議論させることを目的に、異なる導出経路の存在を通知するのみであった。この手法では、同一問題における様々な解法を理解させることはできても、他の様々な問題に対する応用的な発想能力を育成することはできない。そこで、4章では、協調学習の問題を数学の関数の問題に限定し、本章で検出した学習の膠着状態に対して、補助図形を用いて新しい視点を誘発するような助言を生成する手法を

提案する。図を用いることで、同様の図を描くことのできる多様な問題に対する創発力を養うことができる。

また、今回の評価実験で入力複雑さが指摘された。学習システムは計算機に慣れていない学習者も多数利用することが考えられる。柔軟なインタフェースの構築は必要不可欠であるため、学習者が容易に意見を記述できるようにインタフェースを改善する必要がある。5章では、学習者の個性を仮想学習空間に反映することで、他の学習者を「個人」として認識させる協調学習インタフェースを構築する。他の学習者と一緒に学習していると実感させることで、学習に集中させ、議論を円滑に進行させることができる。また、6章では、現実世界の視野場のように、学習者の視点を反映した情報を表示するインタフェースを提案する。学習者が注目したり、興味を持っている情報を特定して自動的に提示することで、多くの発言の中から学習者にとって有用な情報の取得を容易にし、計算機に慣れていない学習者でも現実世界に近い感覚で学習できる。

第 4 章

補助図形を利用した助言生成機構

4.1 はじめに

インターネットを利用した協調学習では，様々な理解状態の学習者が同一の論理空間を共有して一緒に学習する [16] ことで，学習効果を高め合うことが期待されている．このような学習環境では，学習者がお互いに議論しあって疑問を解消することにより，問題の理解が促進される．しかし，学習グループを構成する学習者の理解状態や性格によっては，議論が円滑に進行しなかったり，正解が導出されないといった状況が考えられる．3章では，数学の問題を対象としたウェブ上の協調学習環境に対し，教師的役割を果たす Coordinator を導入し，正解の導出を促進するだけでなく様々な導出経路を議論させることによる創造力の育成を目的に，学習状況の把握方法を提案してきた．

協調学習では，様々な視点に基づいた意見に対して議論を通して，新しい考えを導出したり，問題に対する理解を促進する．従って，学習状況を通知するだけでなく，学習グループの議論を触発するような発想の転換を促す助言が必要となる．正解の存在する問題に対する個別学習において，学習者の発想支援を目的とした研究はこれまでにいくつかなされている．それらは主に，誤っている個所を指摘したり，正解の導出過程中的次のステップを提示するものが多い．高橋ら [57, 58] は化

学の実験を対象としたマイクロワールドにおいて、学習者の実験の操作履歴から学習者の理解状態を把握し、実験の操作が正しく行われていない場合には助言を生成して実験を達成させるシステムを構築している。このシステムでは、一連の実験過程をいくつかのサブ目的に構造化し、次のサブ目的を実行するために必要な知識や、次の操作方法を助言として提示している。また、新ヶ江ら [59] は、化学実験の結果から化学的な性質を発見させることを目的とした実験環境を構築している。このシステムでも高橋らのシステムと同様、実験が膠着すると次の操作を指示することで、実験を完了させる。また、実験結果から学習者がたてた化学的性質の仮説が誤っている場合は、仮説と学習者の実験結果との矛盾箇所を指摘する。このように、導出経路を直接指示するような助言を協調学習に適用した場合、学習の対象となる問題のゴールに到達させることは可能であるが、活発な議論を誘発することは困難である。

3章で我々が構築したプロトタイプ・システムでは、異なる導出経路の存在を学習グループに対して通知することにより、様々な視点に対する議論を促進した。この手法では、特定の問題に対する正解導出の応用力は育成できるが、多様な問題に共通した数学的な概念を獲得させるためには、さらに助言の方法を工夫する必要がある。本章では、Coordinatorの助言機構として、正解が存在する問題、特に高校数学の関数の問題を対象とし、解答を導出するための視点を提示して学習グループの議論を誘発する機構を構築する。高校数学の関数の問題では、しばしば問題やその解答中に現れる式を図示して問題の意味を整理する。伊藤らは、学習者の作図行動の利点として以下の3つを述べている [60]。

- 内部記憶の外化：問題解決過程において人間の記憶の負担を軽減する。
- 操作性の良さ：図形を移動したり挿入することで、問題解決論理の組立てを容易にする。
- 隠れた情報の獲得：文的表現だけでは容易に得られない副次的な情報を得ることができる。

このうち、操作性の良さ・隠れた情報の獲得から、図に図形を挿入することは、面積や図形間の関係などそれまでに得ることのできなかつた情報の獲得につながり、また図形が描かれた視点に沿って問題解決論理を組み立てることを促進する。そこで、我々は協調学習の膠着状態において、特定の視点に沿った正解の導出を促進するため、Coordinator に学習グループの図に対して適切な補助図形を助言として挿入させることを目的とする。補助図形を挿入することで、図に特定の視点を導入し、その視点に沿った活発な議論を促進できる。

高校数学の問題では複数の導出過程が存在するため、学習グループに提示する補助図形は、学習グループの学習状況に応じて異なる必要がある。学習グループが導出経路を全く導出できない場合は Coordinator が最も主要だと特定した導出経路に対応する補助図形を提示すればよいが、学習者が特定の導出経路の導出途中で膠着状態に陥っている場合は対応する導出経路に沿った補助図形を示す必要がある。また、学習グループが一つの導出経路で解を導出し終わっており、その他の導出経路を導出させたい場合は、学習グループが導出していない導出経路に対応する視点を提示する必要がある。そのため、学習グループが取り組んでいる導出経路を認識することは重要である。

本章は、適切な補助図形を提示するために、学習グループの描いた図から学習グループが取り組んでいる導出経路を特定する手法について述べる。まず、4.2節では調査データを基に関数の問題における図の有効性を述べる。4.3節では、我々の想定する環境と学習グループの導出経路を特定するためのアプローチを述べ、4.4節では Coordinator の保持する補助図形と学習グループの図を比較する際に、個々の図形を表現する概念モデルを説明する。最後に、4.5節では本章のまとめと今後の課題を記述する。

表 4.1: 調査に利用した問題

問題 1 : 直線 $l: 5x - 4y + 9 = 0$ と, 放物線 $C: -x^2 - 4x + 3 = 0$ で囲まれた座標平面上の領域 (境界を含む) を D とする. 点 $P(x, y)$ が, 領域 D を動くとき, $5x - 3y$ の最大値, 最小値を求めよ. また, そのときの点 P の座標を求めよ.

問題 2 : $3y^2 - 2x^2 - xy - 17y + 17x + 22 = 0$ が 2 直線を表すとき, それらの直線と $y = 6x - 23$ で囲まれてできた三角形の外接円の方程式を求めよ.

4.2 関数の問題における図の有効性の調査

関数の問題における図の有効性を調査するため, 研究室のメンバー 11 人に被験者になってもらい, 表 4.1 の問題 [61] を解いてもらった. 被験者には単独で問題に取り組んでもらった. 学習終了後, 個々の被験者の正解の導出状況と, それぞれの解答用紙を調査した. この調査を実施するにあたり, 図に関しては何の指示も出さなかった.

表 4.2, 4.3 に調査結果を示す. 表 4.2 は学習者の問題の正誤と, 解答用紙中の図の有無を比較したものである. 問題 1 では正確に図を描いていた学習者の大半が正解を導出していたという結果が得られた. また, 問題 2 では, 図を正確に描くことのできた学習者のみが正解を導出でき, また正解を導出できなかった学習者は図を描くこともできなかった.

次に, 表 4.1 の問題 1 に関して図を正解に描けていた学習者の図に対し, 正解を導出できた学習者と正解を導出できなかった学習者の図を分析した. すると, 表 4.3 に示すように, 正解を導出できた学習者は全員解法に対応する補助線を図中に描いており, 反対に正解を導出できなかった学習者は補助線を描いていない, あるいは誤った補助線を描いていたという現象がみられた.

これらの結果から, 学習者が問題を容易に理解するために図が効果的に作用する

表 4.2: 表 4.1 の問題の正誤と図の存在

	図を正確に描いていた	図を描いていなかった
正解を導出できた	問題 1: 7 人問題 2: 1 人	問題 1: 0 人問題 2: 1 人
正解を導出できなかった	問題 1: 2 人問題 2: 0 人	問題 1: 2 人問題 2: 9 人

表 4.3: 表 4.1 の問題 1 で図を描いていた人の補助線と問題の正誤

	補助線を正確に描いていた	補助線を描けなかった・補助線が正確でなかった
正解を導出できた	7 人	0 人
正解を導出できなかった	0 人	2 人

ことがわかった。また、適切に補助線を描けていれば、正解の導出が促進されることが期待できる。従って、協調学習においても、問題解決の際に学習グループに図を描写させることは有用である。さらに、学習の膠着状態に対して Coordinator が適切な補助線を描写することは、その補助線の意味を考察するような議論を引き起こし、さらには補助線に対応する導出経路へ学習グループの理解状態を誘導することが期待できる。

4.3 2次関数問題に対する助言生成のアプローチ

インターネット上の協調学習では不特定多数の学習者が学習に参加するため、個々の学習者を支援対象とすることは困難である。また、協調学習では、複数の学習者が共通の目的に対して1つになって取り組み、議論することで理解を促進する。従って、個々の学習者ではなく学習グループを一つの支援対象として扱い、学

習グループに対して支援することは妥当である。

関数を対象とする問題において、学習グループの共通理解を促進するために描かれた学習グループの図は、大半の学習者の共通理解を表現していると言える。学習グループのメンバーに受け入れられない図はすぐに変更され、学習グループの大半が認めた図形のみが残ると考えられるからである。従って、Coordinator は学習グループの図を用いて学習グループの理解状態を把握し、学習グループの図に対して適切な補助図形を挿入する。

関数の問題において、問題文中に出てくる式に対応する図形はほとんどの学習者にとって明白であり、図示したときに誤る可能性は少ない。また、学習者はお互いに誤りを指摘することが可能であるため、仮に問題文中の式が誤って描かれた場合でもグループ内で修正可能である。そこで、本章では問題文中の式に対応する図形は、あらかじめ描写して学習グループに提供することにする。学習グループの図にあらかじめシステムが図形を描写しておくことにより、学習グループの図の座標を一意に決定でき、描かれた図形の座標を特定することが可能である。Coordinator は学習対象となっている問題の全ての解法に対し、対応する補助図形を知識として保持する。そして、学習グループが描いた補助図形と保持している補助図形を比較することにより、グループが導出している導出経路を特定する。

図に図形を描く際、補助図形はその式や通る点が必ずしも明確にわかっていない場合が多い。式を把握していても厳密に値をとるのではなく、だいたいの目安で図形を描くことがある。また、補助図形は必ずしも一通りに描写できるわけではなく、特定の条件を満たしていれば何通りでも表現可能である場合がある。従って、Coordinator の保持する図形と学習グループの描いた図形を比較する際に、値が全て等しい図形のみを同一の図形とみなすのは現実的でない。特徴点が等しければ等しい図形とみなしてもよいと考える。そこで、Coordinator が保持する図とグループの描いた図を、それらを構成する図形の特徴で表現した図形の概念モデルで表現する。

補助図形は他の図形と独立に存在するのではなく、他の特定の図形と密接な関係

をもって描写される。また、図中において補助図形以外の図形は問題文中に出てくる式に対応しているため、全ての図で共通である。従って、図の概念モデルは補助図形を中心に、補助図形の種類と他の図形との位置関係で表現する。現時点では、問題の対象を点、直線、2次関数、円を含むものに、学習者が描写可能な補助図形を点と直線に限定する。

4.4 図の概念モデル

4.4.1 概念モデルの構成要素

図の概念モデルは、図に描かれた補助図形を図中の他の図形との関係で表現したものである。図の概念モデルは、図中の個々の図形に対応するノードと、図形の位置関係を示すリンクを用いてネットワーク構造で表現される。個々のノードを識別するため、ノードは対応する図形の種類を保持している。一方、リンクは図形間の位置関係を示すラベルを保持しており、位置関係の視点を表すために方向を有している。

関数の問題において、図の位置関係は上下、左右という関係よりも、接しているか、交わっているか、離れているかという図形同士の相互関係が意味を持つ。図形同士の相互関係は、個々の図形の形状に応じて異なる。例えば、放物線の場合、放物線の凸に対して内側であるか外側であるかが大きな相違であり、円の場合、円の内側であるか外側であるかが意味を持つ。以上のことを考慮して、以下のように図形間の位置関係を設定する。

- contact : 接する
- cross : 1点で交わる
- cross-cross : 2点で交わる。
- overlap : 重複している部分が存在する。

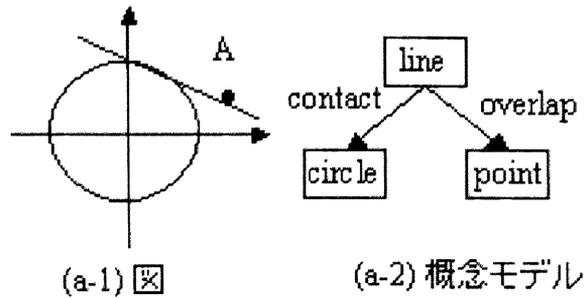


図 4.1: 概念モデルの例

- positive : 図形の負の領域に他の図形が存在している.
- negative : 図の正の領域に他の領域が存在している.

positive, negative は図形同士が離れている場合にのみ考慮される.

図の概念モデルは補助図形を基準に表現される. すなわち, 問題中の式に対応する図形同士の関係は明らかなのでモデル中には表現せず, 補助図形と他の図形との関係のみを表す. 図 4.1 に表 4.4 の問題に対する概念モデルの例を示す. この図中に存在する図形は円, 点 A, 直線の 3 つであるため, 概念モデルはそれぞれの図形に対応する 3 つのノードを保持する. この問題では, 問題中に点 A と円の式が記述されているため, 図 4.1 ではこれらの図形はあらかじめ与えられている図形とし, 点 A を通って円に接している直線を補助図形とする. よって, 概念モデル中では直線を表すノードとその他の図形間のみを表現する. この図では点 A は直線上に存在するため, 直線が点 A を包含している. また, 直線は円と接しているため, 直線と円に対応するノード間のリンクは contact の値を保持する. 位置関係は直線を基準としているため, 矢印の始点は直線に対応するノードとなる.

このように, オブジェクトとその位置関係のみで図を表現することによって, 図の描写に多様性を持たせることが可能となる. 例えば, 表 4.4 の問題に対して描かれた, 図 4.2 の 3 つの図を考える. (b) の補助線は, 図 4.1 に描かれた補助線と傾き

表 4.4: 問題

問題：点 A (3,1) を通り， $x^2 + y^2 = 4$ に接する直線の方程式を求めよ。

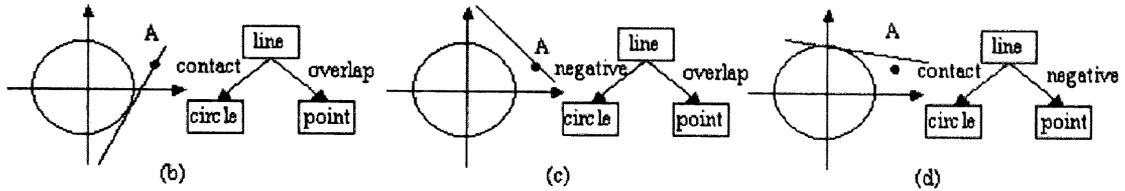


図 4.2: 様々な補助線の例

も存在する箇所も異なるが，図 4.1の補助線と同様，点 A を通り円に接する直線である．よって，この直線概念モデルは図 4.1と同様に表現される．一方，(c)と(d)に描かれた補助線は，(b)と比較すると傾きが図 4.1の補助線と類似している．しかし，(c)では補助線が円と接しておらず，円は補助線の負の領域にあるため，直線と円を表すリンクの値は *negative* となる．(d)では直線が円と接しているが，点 A を通らないため，点と直線との関係は点が直線の負の領域にあるため，*negative* となる．従って，この例では (b) のみが図 4.1と同じ視点であると判断できる．

4.4.2 図形間の位置関係の決定方法

我々が想定している環境では図形の通る座標を特定可能であるため，描かれた補助図形の式を導出することは容易である．現在対象としている補助図形は点と直線である．補助図形が点の場合は，取得した座標の値を比較対象の図形の式を標準化したものに挿入することにより，点とその図形に包含されるか否かを検出可能である．ここで，式の標準化とは式に含まれる全ての値を一方の辺に集め，「式」=0 と

いう形式にしたものである。また、点の対象となる図形上に存在しない場合は、図形の式に座標を代入した値が正であるか負であるかを利用して、点の対象となる図形の正領域、負領域のどちらに存在するかを特定する。

一方、補助図形が直線の場合、学習者は必ずしも直線の式を意識して補助図形を描くわけではないため、必ずしも座標から計算して得られた直線の式が学習者の意図を反映していない場合がある。例えば、学習者は円と接する直線を描いているつもりが、ほんの少しずれたために計算結果からは 2 点で交わっていると判断される、といった状況が考えられる。

協調学習では学習グループ内で議論することで細かい誤りなどは修正可能であるため、Coordinator は大まかに学習状況を把握できればよく、誤った助言を生成してしまった場合は学習グループ内で対処できる。従って、Coordinator は、補助図形が直線の場合には、直線の大まかな存在位置から、ヒューリスティックに補助線と他の図形との位置関係を決定する。

補助線の他の図形との大まかな位置関係を把握するために、補助図形の端点の座標を利用する。補助図形が点のときに行った処理と同様、点の座標を図形の式に代入し、直線の端点が存在する領域を特定する。このとき、2つの端点の存在する領域が異なれば、補助線と対象図形は 1 点で交わっていることがわかる。2つの端点の存在領域が同じ場合、2点で交わっている、接する、離れているの 3つの可能性が考えられる。ここで、感覚的に、補助線が図形と交わっている場合は図形の存在領域と直線の共有部分が多く、離れている場合は共有部分がないとみなすことができる。そこで、補助線と対象となる図形の x 、 y 成分を比較し、重複している割合に応じて図形間の位置関係を決定する。一般的に、図形が交わっている場合は x 、 y 成分共に重複部分が多いと考えられる。図形が接している場合は重複割合がやや少なく、離れている場合は x 、 y 成分のいずれかに重複部分がない、あるいはそれに準ずるくらい少ないと考えられる。従って、図形の x 、 y 成分の重複割合を検出し、ヒューリスティックに図形間の関係を決定する。

図 4.3 に円 $x^2 + y^2 - 4 = 0$ と挿入された補助線との位置関係の決定例を示す。

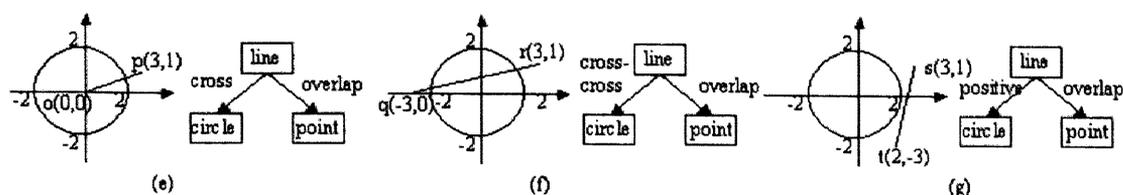


図 4.3: 直線と円の位置関係の例

図 4.3のそれぞれの図には直線の端点座標が記入されている。(e)の場合、円の方程式に補助線の端点をそれぞれ代入すると、点 o に対しては $-4 < 0$ の値が、点 p に対しては $6 > 0$ であるため、符号が異なる。よって、円と補助線は交わっていると検出できる。一方、(f)、(g)の場合には共に端点の値が正となる。そこで、それぞれの図形の存在領域を比較すると、(f)の場合、直線が $(-3 \leq x \leq 3, 0 \leq y \leq 1)$ に、円が $(-2 \leq x \leq 2, -2 \leq y \leq 2)$ の領域に存在している。この場合、 x 成分では補助線の 67% が円の領域と重複しており、 y 成分では、補助線が円の領域と 100% 重複している。一方、(g)の場合には $(2 \leq x \leq 3, -3 \leq y \leq 1)$ であるため、図形の重複が x 成分が 0%、 y 成分 75% である。よって、(f)の場合には直線の大部分が円に含まれているとみなすことができ、2点で交わっていることを想定できる。一方、(g)の場合には x 成分が重複していないため、図形が交わっていないと判断できる。ここで、(g)の円は補助線の正の領域にあるため、直線と円の関係は *positive* と設定することができる。

4.5 おわりに

本章では、関数の問題を対象とした協調学習において、正解導出の進行を促進するだけでなく、創造力を育成するために、導出経路の視点を示す補助図形の提示を目的としている。学習グループの理解状態に合わせた適切な補助図形を提示するため、学習グループが描いた補助図形とシステムが保持する補助図形を、他の図形

との位置関係で表現した概念モデルに変換し、比較する手法を提案した。

現時点では、対象とする図形を点、直線、放物線、円に、補助図形を点と直線に限定している。しかし、関数の問題では、双曲線や楕円を扱ったり、角度の描写を必要とする問題が存在する。補助図形も円や放物線であったり、角度を記述する場合も存在する。本章で提案した概念モデルを用いた図形の比較手法では、図形の詳細な形に捉われず、存在する図形の数と図形間の位置関係のみで図を表現している。従って、双曲線や楕円など、他の種類の図形に対しては、対応する図形の特徴を考慮した他の図形との位置関係の特定に関する知識を記述することで、同様に概念モデルを構築することができる。また、図形間の角度は、図形間の関係の制約条件と位置付けることができる。図形間の角度や距離など、関係に何らかの制約が存在する場合は、概念モデルのリンクに制約条件を付帯し、制約条件を考慮して概念モデルを比較することで、より複雑な図形に対しても適用範囲を拡張することができる。

また、本手法では、学習グループの図を Coordinator が保持している図と比較しているため、Coordinator の知識としてあらかじめ用意された図以外は正しい解法に対する図であると判断することができない。さらに、Coordinator が保持する図形と完全に一致しなければならないため、部分的に正しい図は誤っている図と認識されてしまう。伊藤らが分析したように [60]、学習者の作図の種類は、問題解決の段階に従って異なることがわかっている。すなわち、学習者は一度に導出経路に対応する図を生成するのではなく、まず問題文中の式を図示し、次に問題文中には記述されていない図形や図形間の条件を記入し、さらに試行錯誤的に他の図形を挿入することで正解の導出しようとする。Coordinator は、学習者の作図の種類を判断し、議論内容から把握した学習の進捗状況と作図の種類の同期をとることで、その時点の問題解決段階に適した、より柔軟な図の比較を実現していく必要がある。

第 5 章

個人学習情報を利用した相互理解促進のためのインタフェース

5.1 はじめに

協調学習は複数の学習者が協力しあって問題を解決するという学習形態であり、学習者が一人では気づくことができなかつた考え方を発見したり、ある知識に関するより深い理解を期待できる [50]。議論では、1) 直接的なインタラクションと 2) 間接的なインタラクションを同時に行うことにより、学習者は問題に対する理解を深めていく。直接的なインタラクションとは、相手と直接情報をやりとりすることによって相互の学習者の理解状態が変化することを意味し、言葉を交わすなどが例として挙げられる。一方、間接的なインタラクションとは、相互の情報のやりとりは行われず、働きかけた学習者のみが一方的に知識を吸収することを指し、相手を観察するなどが例として挙げられる。協調学習では議論中に無意識に他の学習者を評価しており、会話などの直接的なインタラクションだけでなく、特定の学習者の言動を注目するという間接的なインタラクションを通して、全ての学習者から生成される情報の中から有益な情報のみを選別して吸収することで、問題の理解を促進する。

以下の 2 種類のインタラクションは、間接的なインタラクションに位置づけられる。

- 1) 個々の学習者を特徴づけるために、学習者の個性を表す情報を獲得する。
- 2) 学習を効果的に進行するため、特定の学習者の学習態度を表す情報を継続的に観察する。

1) では、学習者の発言だけではなく、学習の姿形や学習態度を観察し、学習者の視点から個々の学習者の個性や特徴を形成して、学習者にとって有益な情報を提供してくれそうな学習者を決定する。2) では、1) で決定した、有益な情報を提供してくれそうな学習者の言動などを継続的に観察することで、直接的なインタラクションでは獲得できない情報を取得して、効果的に学習を進行する。現実世界では学習者は同一物理空間を共有しているため、これらのインタラクションは無意識のうちに行われるが、学習者から獲得できる情報が制限されている仮想学習空間では、これらのインタラクションを支援しているインタフェースは少ない。5 章、6 章では、仮想協調学習空間 HARMONY における擬似学習者である Learner に対し、直接的なインタラクションだけでなく、間接的なインタラクションも実現可能とするインタフェースの構築を目的とする。5 章では、学習者の個性の把握を容易にするため、個々の学習者をモデル化し、他の学習者のモデルを獲得可能なインタフェースを構築する。6 章では、学習者が注目している学習者を特定し、対象となる学習者の情報を自動的に獲得・提示することで、特定の学習者の学習態度を表す情報の継続的な観察を実現する。

インタフェースの構築に関する研究では、細谷ら [49] は学習者が教材に働きかけることによって生じる仮想空間内の動的な状態変化を厳密に管理することができる仮想 3 次元空間を構築した。また、Chee ら [62] は実験結果を仮想 3 次元空間上でシミュレーションすることによって学習者の理解を促進する仮想実験室 VirtUOS を構築している。このような 3 次元空間では学習者の意見が可視化されるため、学習

者間のコミュニケーションは円滑になる。しかし、仮想空間上の教材、あるいは実験器具の状態の変化は明確に表現されるが、学習者の動きには焦点があてられていないため、他の学習者の状態を把握することは困難である。一方、Ogataら [63] は協調学習に参加している学習者の知識を Knowledge Awareness Map で可視化することで、他の学習者の理解状態を観察するための間接的なインタラクションを可能とし、議論を誘発するシステムを提案した。このシステムでは、注目する学習者の理解状態を直接会話することなく、把握できる。しかし、Knowledge Awareness Map では学習者の理解状態をモデル化して表示しているため、個々の学習者が他の学習者の理解状態を客観的に評価することはできない。

我々は、学習者の要求に応じて特定の学習者の状態を表す情報をモデル化して提示することにより、学習者の個性を把握するための間接的なインタラクションを実現する。他の学習者に対する評価は個々の学習者によって異なるため、間接的なインタラクションでは学習者の視点から他の学習者を評価できるような情報を提示することが望ましい。従って、学習者の状態を表す情報を、学習者の風貌・学習履歴など、我々が現実世界で観察することができる情報とし、それらを個人学習情報として定義する。Learner は、個々の学習者の個人学習情報を管理し、他の学習者の個人学習情報を学習者の要求に応じて獲得することで、学習者の直接的インタラクションだけではなく、間接的インタラクションを実現するための機能も保持する。

5.2 Learner の個人学習情報管理機構

Learner は個々の学習者の仮想協調学習空間へのインタフェースであり、会話画面で会話するためのインタフェースを提供すると同時に、他の学習者の個性を特定するために、他の学習者に対する「観察」を支援・実現する。「観察」とは、直接相互作用することなしに他の学習者の情報を獲得する行為と定義する。他の学習者を観察することで、学習者は他の学習者の個性を認識でき、有用な情報をもたらしてくれる学習者を特定することができる。Learner は「観察」を支援するために

機能 1) 会話画面の情報整理機能

を持ち、また「観察」を実現するために、

機能 2) 他の個人学習情報獲得機能

を保持する。機能 1 では学習グループ全体の中から特定の学習者の観察を容易にするため、会話画面での会話の流れを整理する。一方、機能 2 では他の学習者の理解を促進するため、他の Learner が持つ個人学習情報を得る。以下、個々の機能について述べる。

5.2.1 会話画面の情報整理機能

会話画面の情報整理機能では、直接的なインタラクションを表示する会話画面の情報を整理する。会話画面はチャット機能であるため、画面上に表示される発言は入力順であり、会話の順序関係を表していない。従って、会話画面の発言を会話の流れを追って整理することで、学習者が「観察」する相手を容易に決定できるように支援する。普段、我々は自分の発言のきっかけとなった発言（親発言）や、自分の発言に反応した発言（子発言）を発した相手など、直接会話した相手を注目することが多い。従って、情報整理機能として会話画面で学習者の発言と関係のある発言のみを抽出し、話題別に構造化して提示する。図 5.1 に学習者 A の発言を基準とした発言の構造化の例を示す。学習者 A の発言の親発言・子発言が話題別に構造化されている。この図では階層の上位に来る発言が親発言であり、下位に来る発言が子発言である。会話画面では発言は ID を伴って表示され、学習者は自分の発言の親発言と種類を明記する。Learner は学習者の発言の親発言情報を基に会話画面の発言を構造化する。この機能では学習者と直接会話した学習者を把握することが目的であるため、他の学習者の発言については内容を表示しない。

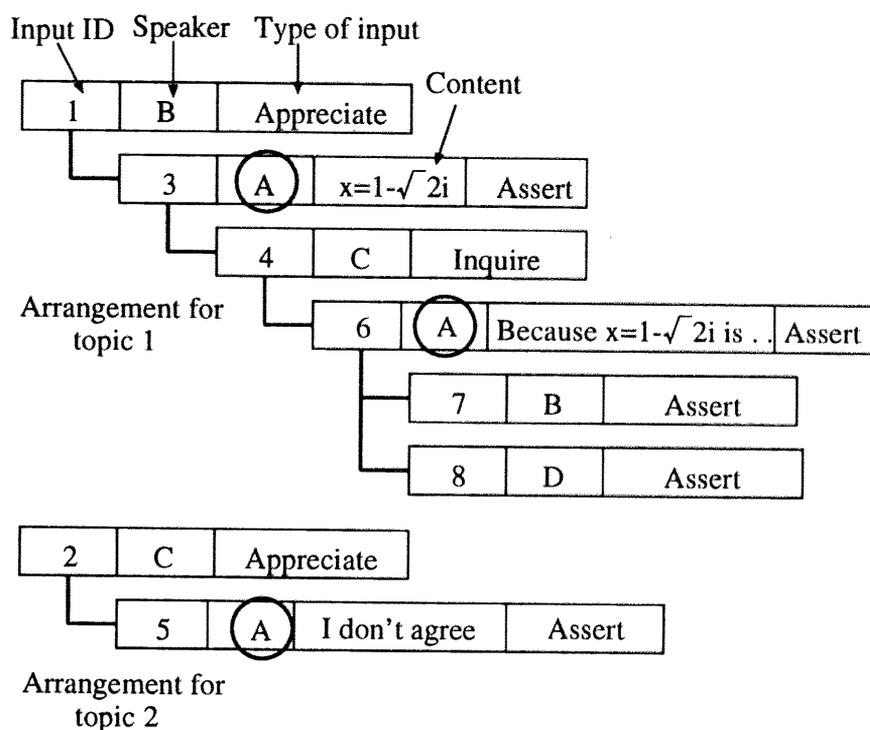


図 5.1: 学習者 A の Learner による発言の構造化

表 5.1: 協調学習の例

発言 ID	発言者	内容	属性
1	B	x の他の解は?	提案
2	C	他の解はない	提案
3	A	$x=1-\sqrt{2}i$	意見
4	C	どうして?	質問
5	A	それは違うよ	意見
6	D	共役の複素数だから	意見
7	B	そうだね	意見
8	A	そう思う	意見

5.2.2 他の個人学習情報獲得機能

個人学習情報は個々の学習者の理解状態・性格など、その時々々の学習者の状態を表現するデータであり、対応する Learner によって管理される。学習者の理解状態は学習者の学習履歴から把握することができる。我々の協調学習空間では、会話画面の会話を基に学習が進行するため、学習者の発言の履歴を個人学習情報の一つとする。学習者の発言はその学習者の理解状態だけでなく、発言の種類・役割によって学習者の特性も判断できる。すなわち、新しい話題をよく提供する学習者は豊富なアイデアを持っていると判断できるし、質問の返答が多い学習者はよく理解しているといえる。従って、個人学習情報では発言の内容と共に発言の前後関係（親発言・子発言）も保持する。会話画面で表 5.1 のような議論が進行しているとする。この議論における学習者 A の個人学習情報は表 5.2 のようになる。Learner は会話画面の内容から対応する学習者の発言と、その発言を親発言に持つ発言を整理し、個人学習情報として格納する。

表 5.2: 表 5.1 の議論における学習者 A の個人学習情報

発言 ID	発言者	内容	属性	親発言	子発言
3	A	$x=1-\sqrt{2}i$	意見	(1,B, 提案)	(4,C, 質問)
5	A	それは違うよ	反対	(2,C, 意見)	null
8	A	そう思う	賛成	(6,D, 意見)	null

一方、学習者の姿形は学習者の性格を表していることが多く、加えて学習者をイメージ的に理解する助けとなる。そこで、発言と学習者の写真を個人学習情報とする。

他者の個人学習情報を獲得する際、Learner はメディエータを生成する。メディエータは学習者の個人学習情報獲得の要求に応じて生成され、指定された学習者の個人学習情報を獲得し、要求が完了すると消滅する。Learner は情報ネットワークに分散しているため、メディエータはモバイル・エージェントとして実装される。モバイル・エージェントとは情報ネットワークの計算機を移動しながら処理を進めるプログラムで、エージェント自身が移動先や移動タイミングを決定しながら主体的に計算機間を移動する [64, 47]。メディエータは図 5.2 のように動作する。メディエータは学習者の個人学習情報獲得要求に対し、移動先の情報と共に、Learner によって生成される。生成されたメディエータは生成元の Learner の位置情報を保持したまま、対象となる Learner が動作する計算機へ情報ネットワークを通して移動する。移動先では対象となる Learner に個人学習情報を要求し、個人学習情報を獲得すると、生成元の Learner が存在する計算機に戻る。最後に、生成元の Learner

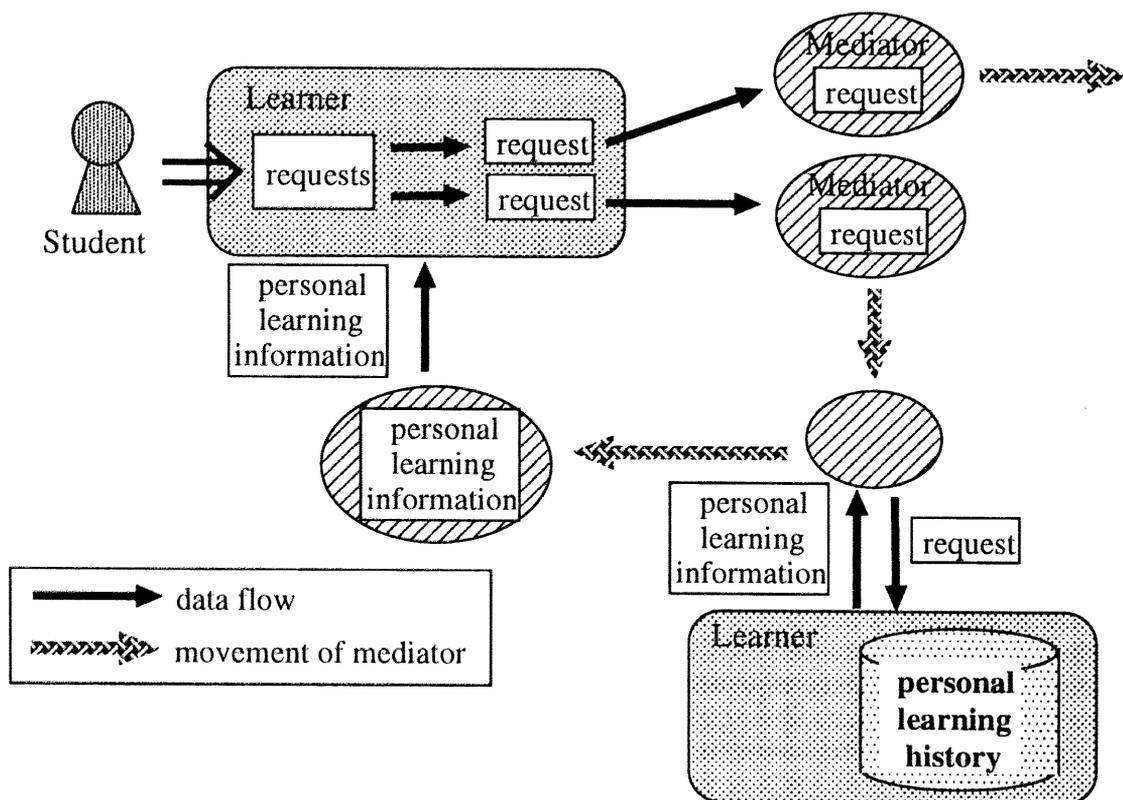


図 5.2: メディエータによる個人学習情報獲得

に獲得した個人学習情報を渡し、消滅する。Learner はメディエータが獲得してきた個人学習情報を学習者に提示することにより、学習者の個性を表す情報を獲得するための学習者間の間接的なインタラクションを実現する。

5.3 プロトタイプ・システム

我々が実装したプロトタイプ・システムを示す。図 5.3 は会話画面である。5.3 節で述べたように、学習者は発言の属性・その発言のきっかけとなった発言（親発言）を示して入力する。このような形式で入力された発言は、発言 ID が付帯されて

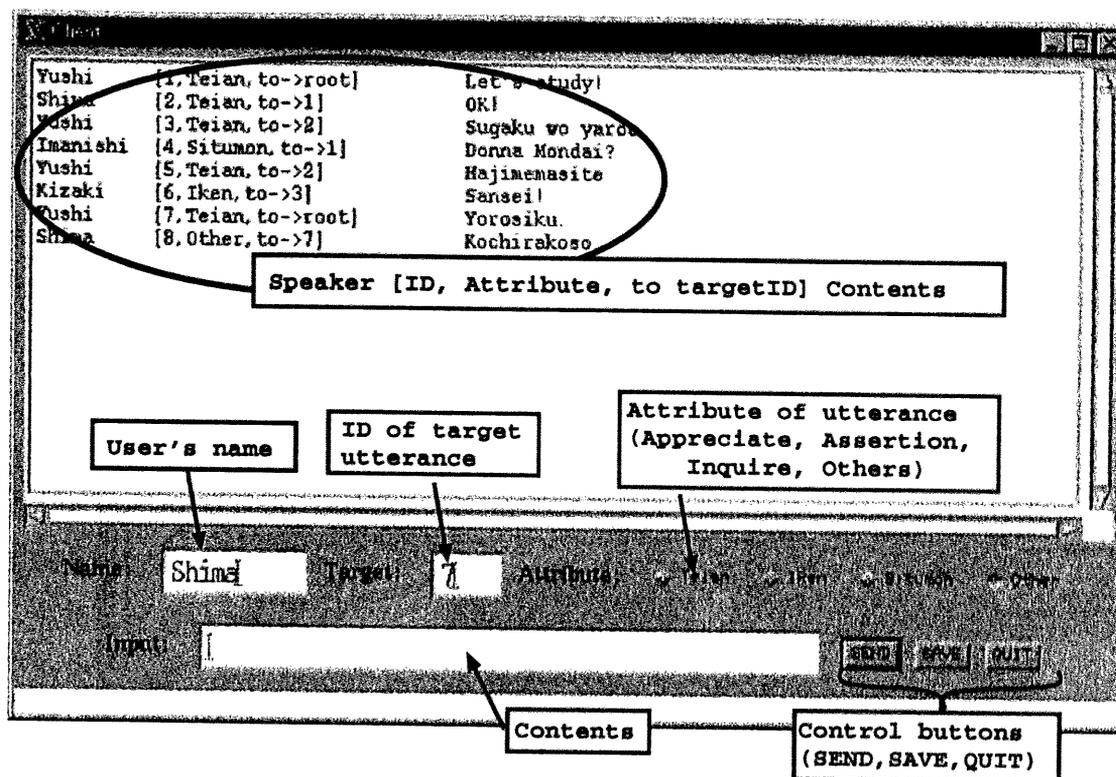


図 5.3: 会話画面

ウィンドウ上に表示される。会話画面はチャット機能であるため、会話の前後関係は保存されていないので、学習者は親発言の ID を見ることで、会話の流れを把握する。

一方、図 5.4 に「観察」を支援・実現するインタフェースを示す。図 5.4(a) は他の学習者の個人学習情報の要求を生成するウィンドウであり、上のテキスト部分は他の学習者に対する「観察」を支援するための会話画面の情報整理機能である。会話画面の情報整理機能では、学習者が会話画面への発言時に指定した親発言を基に、5.2.1 節で示したように会話画面の会話を構造化する。学習者はこの画面を基に注目する学習者を決定し、図 5.4(a) の下の部分で個人学習情報の要求を生成する。現段

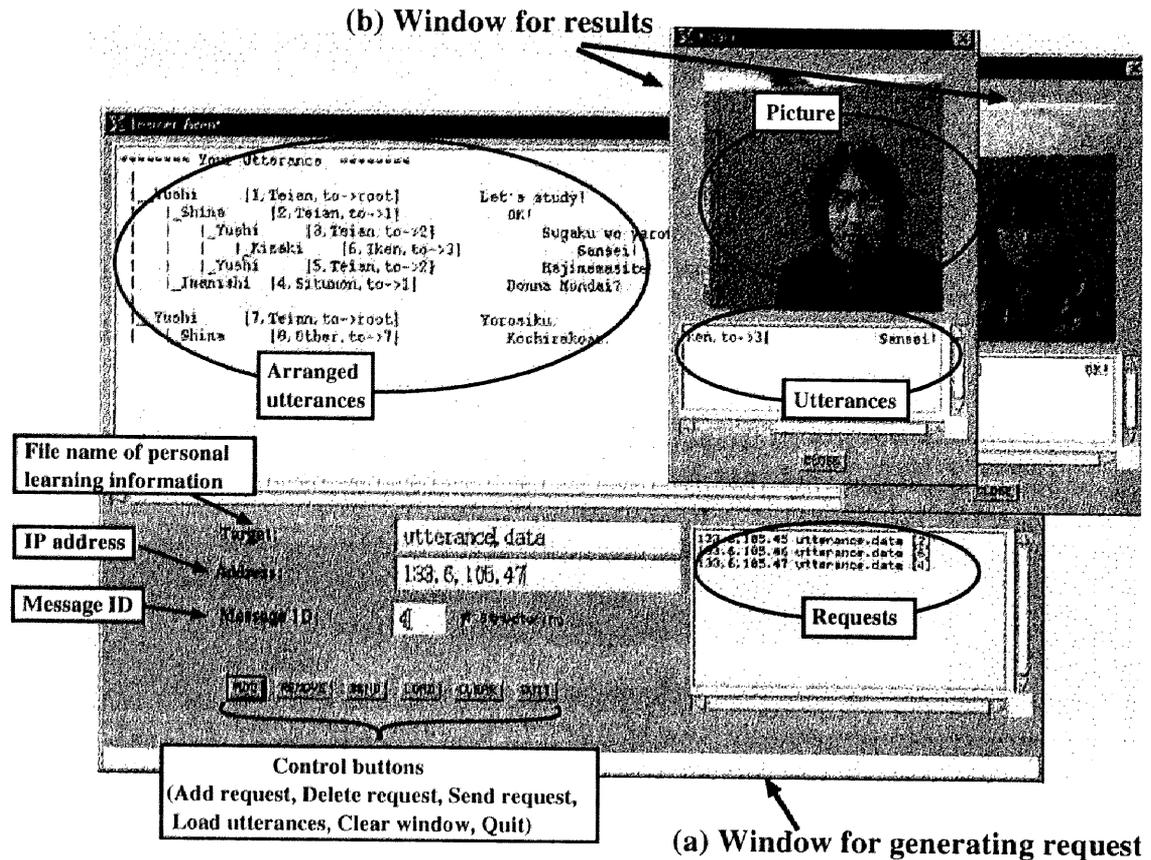


図 5.4: 間接的インタラクション支援インタフェース

階では学習参加者の IP アドレスがわかっていると仮定し、学習者が個人学習情報の要求の対象としている学習者の IP アドレスと、個人学習情報のファイル名 (utterance.data) を指定することにより要求を生成する。個人学習情報の要求は複数同時に行うことができ、個々の要求に対して一つのメディエータが生成される。

メディエータは、佐藤が開発したミドルウェア、AgentSpace[65] を用いて実装した。図 5.4(b) はメディエータを使った個人学習情報獲得の結果ウィンドウである。結果ウィンドウは個々の要求に対して一つずつ生成される。ウィンドウ上部の写真は学習者があらかじめ提供した学習者自身の写真であり、下部のウィンドウは学習

者の発言履歴である。学習者はこの結果を見ることにより、注目したい学習者についてより深い情報を得ることができる。

5.4 おわりに

本章では、学習者間の直接的なインタラクションだけでなく、個々の学習者を特徴づけるために、間接的なインタラクションである他の学習者に対する「観察」を実現する仮想協調学習空間のインタフェースを提案した。他の学習者の個人的な情報を観察することで、個々の学習者を個性を持った人間の学習者であると意識でき、現実世界のような学習空間で学習していると実感できる。また、学習者間の相互理解が深まり、円滑なコミュニケーションが促進される。

他の学習者の「観察」は、Learner が学習者の要求に応じて他の学習者の個人学習情報をメディーエータを用いて獲得することによって実現する。メディーエータは分散環境という特性を生かし、モバイル・エージェントとして実装した。モバイル・エージェントは自主的に情報ネットワークを移動するため、Learner がその動作を管理できないという問題がある。すなわち、情報ネットワークで何らかのトラブルが起こってメディーエータが消滅してしまった場合、学習者が要求した個人学習情報は永遠に得られないことになる。従って、メディーエータが個人学習情報を獲得して帰ってきたかをチェックし、帰ってこなかった場合は何らかの補償を行う必要がある。

また、メディーエータは学習者からの要求が生じたときのみ他の学習者の個人学習情報を獲得する。これは、その時点の瞬間的な「観察」に対応している。現実世界で、我々は興味を持った学習者の行動に対しては無意識に注意を払い、何度も動作や言動を意識する。特定の学習者の情報を継続的に獲得することで、対応する学習者が発する効果的な情報を獲得することが容易になり、学習効果が促進される。6章では、Learner が対応する学習者が注目している学習者を特定し、5.1節で挙げた間接的なインタラクションのもう一つの種類である、注目対象者の情報の継続的な

取得を実現する。学習者の注目行為を実現することにより、学習者の視点を反映した face-to-face なインタフェースを提供する。

第 6 章

協調学習における face-to-face インタフェース

6.1 はじめに

近年のインターネット技術の発展は、学習者が同一の物理空間を共有することなく、他の学習者と協調的に学習することを可能にしつつある [16]. このような仮想空間内での協調学習では、グループを構成する学習者の理解レベルの不均一さやコミュニケーションに対する制約が原因で、活発な議論がなかったり、問題を解決できないという状況が発生する. 我々の提案する協調学習空間 HARMONY における擬似学習者である Learner は、学習者と仮想学習空間とのインタフェースとみなすこともでき、学習効果を増大させるような情報管理、情報通信などの機能が重要となる.

仮想の学習空間を現実の学習空間に近いものとし、臨場感を達成することで、学習者に利用し易いインタフェースを実現できるという想定の下、数多くの研究が報告されている. FreeWalk[66] は、会議の休憩における雑談などの非形式的なコミュニケーションを支援し、参加者が自由に出会うことができる 3次元仮想空間である. この空間内では、個々のユーザを位置と方向を持った 3次元物体で表現し、物体間の距離と向きに従ってユーザから見える姿や大きさ、会話における声の音量を変化させている. また、Ubiquitous Media[67] は複数のカメラを用いて全方位

360° または広画角 180° にわたってパノラマビデオ画像を生成することで、現実世界により近い視野を提供するコミュニケーション・システムである。これらのシステムは、現実世界の物理的特徴を仮想世界へ写像することで、臨場感の達成を目的としている。しかし、学習者の知識獲得や円滑な議論の観点から、仮想空間とのインタフェースには、単に現実世界と物理的に類似した学習空間の構築ではなく、現実世界における学習者の知識獲得プロセスを実現・支援できる機能が求められる [17]。

現実世界では、学習者は物理的な位置関係だけで対象を見ているのではなく、主観に基づいた個人の視野域の下に対象を認識・理解している場合が少なくない。すなわち、視野に入っている対象が興味の有無に従って識別され、特定の対象群が個人の視野域として焦点があてられる。特定の対象群をその性質、すなわち姿形や学習状況など対象の個性を認識できる情報を基にインタフェース上に提示することで、個々の学習者の興味に応じた視野場を構築でき、直接人間の学習者と一緒に同一視野場で学習しているという対面感を学習者に実感させることができる。

協調学習は相互理解の下に構成され、特定の学習者に対する注目行為は、円滑な議論や学習の進行に大きく影響する。視野場は議論における学習者の観点から自己の注目行為を可視化、具現化した対話面であり、注目行為の現れをインタフェース上に実現することがねらいである。このような協調学習環境の捉え方が対面感を実現するためのアイデアである。ここで、注目行為を行う学習者を主学習者、注目の対象となりうる学習者を被学習者、主学習者が注目している被学習者を対象学習者と定義する。議論では、発言の内容に依存して話題の関心や興味が変わるだけでなく、発言した被学習者自身に対する認識や興味も変化する可能性がある。すなわち、主学習者は議論中に全ての被学習者と同等に対話するのではなく、興味ある発言を発した被学習者や知的な応答を繰り返す被学習者を観察・注視することで、効果的に知識を獲得したり、円滑に意思を疎通する。従って、協調学習において学習者の視野場を実現するアプローチとして、主学習者が注目している対象学習者を推測し、主学習者が観察したい対象学習者を自動的に操作インタフェースに表示でき

る機構を明らかにする [68]. これは, 5章で記述した, 特定の学習者の学習態度を表す情報を継続的に観察するという間接的なインタラクションの実現に相当する.

議論中, 主学習者は被学習者の発言の内容や種類によってその理解状態や性格などを判断し, 特定の被学習者を対象学習者として対話を進行させる. 発言による対象学習者の変化方法・変化頻度は, 主学習者によって異なる. 我々のアプローチでは, 被学習者の発言に対する主学習者の興味の変化割合を注目者決定ルールとし, 主学習者の操作履歴に応じてこれを定める. そして, ある時点で全ての被学習者に対する主学習者の興味の割合を注目者決定ルールを用いて計算し, その割合が大きい被学習者を対象学習者として検出する. 注目者決定ルールは主学習者によって異なるため, 主学習者の視点, 個性を反映した操作インタフェースを実現できる.

本章では, 2節でまず対象学習者の決定について予備的考察を行う. そして, 3節で我々が構築する操作インタフェースの枠組みを示し, 4節で個々の機構を説明する. 5節では実装したプロトタイプ・システムを用いた評価実験とその評価結果を述べる. 最後に, 6節で本章をまとめる.

6.2 予備的考察

6.2.1 対面感

対面感とは, 仮想空間内である学習者が他の学習者と直接顔と顔をつき合わせて一緒に学習しているという実感であり, 操作インタフェースを介して対話機構として実現される. 仮想空間内に存在する学習者の個性や特徴を認識できることは, 学習者を個人として認識・意識し, 同様に自分も個人として認識・意識されることであり, 自分の行為に注意を払うことにもつながる. 現実世界では, 学習者固有の視点から他の学習者の姿や表情, 動作を観察することでその学習者の性格や特徴を把握できる. しかし, 仮想空間内ではチャットによる発言やカメラによる動画など, 個々のメディアに依存し, 他律的に提供される情報しか受理できないため, 現実世

界で獲得できる学習者固有の情報を得ることは直接的・間接的に困難である。また、学習者自身が仮想空間内に存在していると実感するためには、個々の学習者の視点を反映した視野場を操作インタフェースに実現する必要がある。

桑原らのネットワークコミュニティ [69, 70] は、個々のユーザに対応するパーソナルエージェントに、そのユーザおよび対応するエージェントに関するデータ、またそのエージェントが知っている他のエージェントに関する情報を保持させることで、個々のユーザの存在を空間に反映している。他のエージェントとのやりとりから他のユーザの存在を認識できるが、他のユーザの情報を直接視覚的に認知できないため、特定のユーザの観察など、他のユーザの情報を積極的に取得することには適していない。我々は画像など、ある学習者の情報を視覚的、直感的に他の学習者が取得可能とすることで、学習者間の相互理解、相互信頼を高めるような環境を構築する。そのような目的の下、3章では学習者固有の情報や学習データを個人学習情報として管理し、他の学習者の個人学習情報を自由に参照できるシステムを構築してきた [71]。個々の学習者のモデル化である個人学習情報を自由に他の学習者に獲得させることで、学習者の観察行為を実現しており、現実世界の視野場を提供している。このシステムでは、個々の学習者を特徴づけるために必要な情報を獲得することはできたが、議論中に効果的な情報を得るための継続的な注目は達成できない。現実世界では、学習者は興味の対象となる学習者の情報を意識することなく参照している。すなわち、我々は無意識のうちに注目する学習者の方を見たり、発言を聞いたりする。従って、本章では、学習者が興味を持っている他の学習者を Learner が特定し、対応する学習者の情報を自動的に提示させることで、学習者の注目を可能とし、さらに学習効果を増長させるシステムを構築する。

6.2.2 予備実験

議論の進行に伴って主学習者が対象学習者をどのように選別するかを現実世界において予備的に調査した。予備実験では、研究室内の研究発表会において、被験

者（主学習者）に自分の視点をビデオ・カメラを用いて追跡して写してもらうことで、主学習者の対象学習者を検出した。表 6.1 に研究発表会の発言の一部を、図 6.1 に個々の発言における主学習者の注目の変化を示した。研究発表会では 20 人近い参加者がいたが、図 6.1 では発言した被学習者と、主学習者が注目した対象学習者のみを示した。図 6.1 中の student は主学習者に対応しており、other student は被学習者である。また、表 6.1 における全ての発言は被学習者 1 が発言 1 で発した話題に関して展開された。

図 6.1 を見ると、発言 1, 5, 7 以外は主学習者が発言している被学習者を注目している。発言している被学習者を見ることで、発言の意図を理解したり、議論の雰囲気把握ができるからであると考えられる。一方、発言 5, 7 は主学習者の発言であり、この間発言の対象である被学習者 3 に注目している。主学習者は発言の意図を相手に伝えたいため、無意識に発言の対象となる被学習者を見ることが多いと考えられる。この実験から、同一の話題に関する議論において主学習者は発言の主体者、すなわち発言者と発言の対象者を観察していることが多いと言える。また、図 6.1 から主学習者の対象学習者は発言がきっかけとなって変化していることが観察できる。従って、議論では発言が対象学習者の変更のトリガとなり、発言の主体者は対象学習者の決定に大きく影響する。

6.2.3 注目過程

6.2.2 節の予備実験の結果から、主学習者は、発言をきっかけとし、会話に応じて被学習者に対する認識を変更したり、特定の被学習者に興味を持ったりする。そこで、発言の主体者に応じて発言を図 6.2 の 5 種類に分類し、それぞれの場合における対象学習者を想定する。

- 発言 A

主学習者から被学習者への発言であり、主学習者は発言の対象となっている被学習者の反応を期待するため、対象学習者は発言の対象となっている被学習者

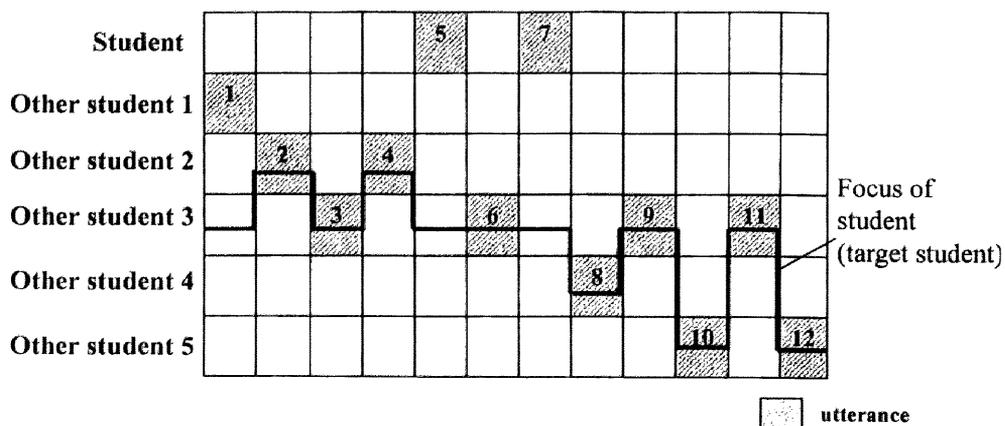


図 6.1: 主学習者の注目の軌跡

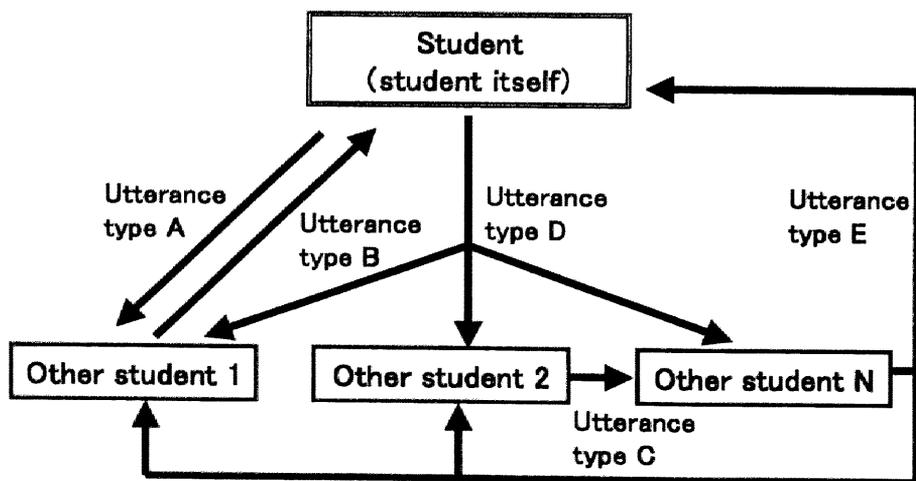


図 6.2: 主体による発言の分類

表 6.1: 分析対象の発言

発言番号	発言の主体者	発言の種類
発言 1	被学習者 1 → 全員	意見
発言 2	被学習者 2 → 被学習者 3	意見
発言 3	被学習者 3 → 被学習者 2	返答
発言 4	被学習者 2 → 被学習者 3	意見
発言 5	主学習者 → 被学習者 3	意見
発言 6	被学習者 3 → 主学習者	意見
発言 7	主学習者 → 被学習者 3	意見
発言 8	被学習者 4 → 被学習者 3	質問
発言 9	被学習者 3 → 被学習者 4	返答
発言 10	被学習者 5 → 全員	意見
発言 11	被学習者 3 → 被学習者 5	意見
発言 12	被学習者 5 → 全員	意見

となる。

- 発言 B

被学習者から主学習者への発言であり、主学習者は話しかけた被学習者に返答する可能性が高いため、対象学習者は発言した被学習者となる。

- 発言 C

被学習者から特定の被学習者への発言であり、主学習者が話題に興味を持っている場合、対象学習者は発言した被学習者となる。

- 発言 D

主学習者から全ての被学習者への発言であり、対象学習者は発言の反応を期待できそうな被学習者となる。

- 発言 E

被学習者から全ての被学習者への発言であり、主学習者が話題に興味を持っている場合、対象学習者は発言した被学習者となる。

主学習者は上記の分析に加え、被学習者に対する独自の判断も加えてその時点の対象学習者を決定する。例えば、特定の被学習者を想定させる発言であれば対応する被学習者を注目するかもしれない。また、特定の被学習者の動作や表情に主学習者があらかじめ興味を持っている場合、発言の主体者や種類に関係なく対応する被学習者が対象学習者となる可能性が高い。これらの注目の傾向は主学習者に依存しており、議論中の主学習者の態度から判断できる。

6.2.4 アプローチ

協調学習空間において、被学習者を意識し、対面感を実現するためには、主学習者の視線（心像）を映し出すインタフェースが有用である。主学習者の視線は、主学習者自身の理解状態、他の被学習者に対する認識状況などによって異なるため、主学習者ごとに異なる情報を提示しなければならない。従って、我々が提案するインタフェースでは、議論の過程から主学習者が期待する対象学習者を特定し、その対象学習者を表示することで、対面感を実現する。対象学習者の情報を自動的に取得して主学習者に提示することで、主学習者の余分な負担を減らして自然な注目行為を実現する。図 6.3 にインタフェースの概念図を示す。学習者の姿形・表情は学習者の学習態度、性格、理解状態を表しているため、学習者を理解するために対象学習者のカメラ画像を表示することは有用である。本インタフェースでは、主学習者が注目している対象学習者を検出し、対象学習者のカメラ画像を表示することで、対象学習者に関する詳細な情報を取得可能にし、仮想の学習環境における対面感を実現する。

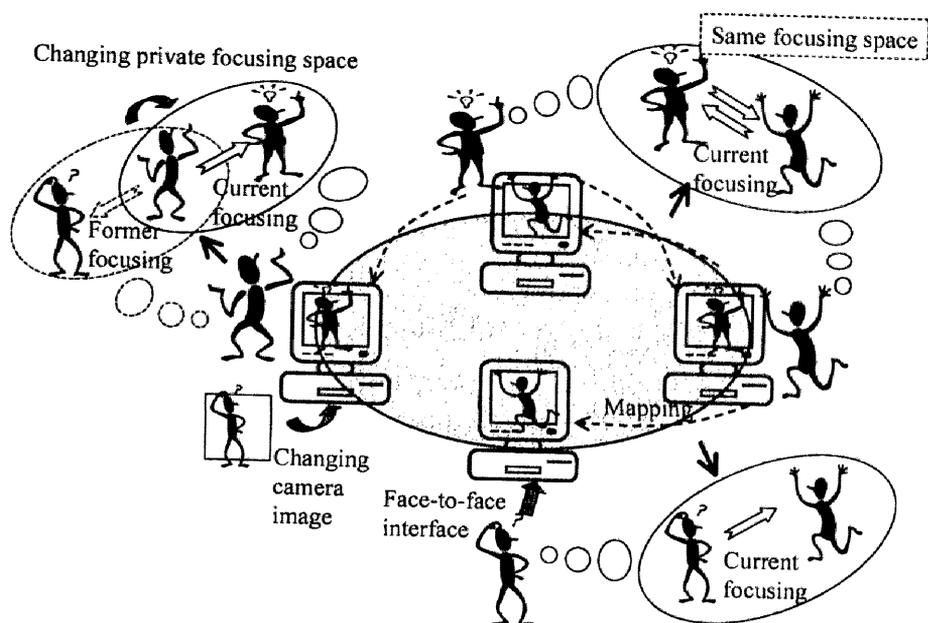


图 6.3: 概念图

6.2.3 節の分析結果から、主学習者が発言の主体者の一人である場合は、その発言に主学習者が関与しているため、発言の他の主体者が対象学習者となる。すなわち、主学習者が発言者である場合は発言の対象者が、また主学習者が発言の対象者である場合は発言者が注目される。一方、主学習者が発言の主体者にならない場合は、話題に対する興味が対象学習者の決定に影響する。すなわち、主学習者は興味のある内容であれば積極的に特定の被学習者に注目するが、そうでなければ主学習者は発言を無視し、他の被学習者への関心は全く変化しない。そこで、本システムでは対象学習者の変化を図 6.4 のように捉える。議論において発言が生じた場合、主学習者が発言の主体者となっていれば対象学習者が変化する。一方、主学習者が発言の主体者でなければ、対象学習者が変化するか否かは話題の内容に依存する。興味のある話題であれば対象学習者が変化する可能性があるが、話題に関心がなければ対象学習者は変化しない。

主学習者の話題に対する興味は、主学習者の発言と、発言間の依存関係から把握できる。協調学習では複数の話題が並行して進行する可能性があり、主学習者は興味のある話題には自ら発言することが想定される。そこで、議論中の発言の前後関係に基づいて発言関連ツリーを構成し、発言の話題に対する主学習者の興味に従ってその時点の対象学習者を推測する。

一方、対象学習者の変化は、全ての学習者にとって同一ではない。主学習者の性格や学習状況に応じて異なる。例えば、主学習者は発言にかかわらず、理解していると判断した被学習者の表情や動作を長時間観察することにより個々の発言の正誤を判断したり、質問に対しては返答しそうな学習者、賛成意見に対しては反対意見を言った学習者というように発言の種類に応じて特定の被学習者を見ることがある。個々の学習者に依存した注目パターンを規則的に推測するのは困難であるが、同じ主学習者では発言の種類や主体者によってある程度共通していると考えられる。従って、ある時点における主学習者の被学習者に対する興味の割合を注目度とし、個々の発言の主体者と種類に対して、主学習者の被学習者に対する注目度の変化割合を注目者決定ルールとして設定する。注目者決定ルールの注目度の変化割合

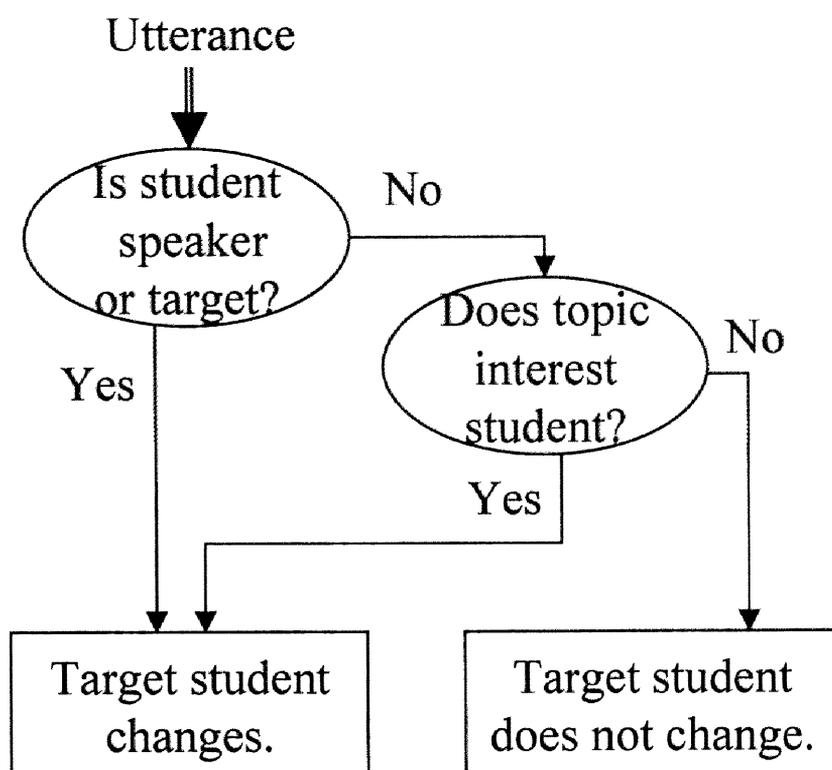


図 6.4: 発言による対象学習者の変化

は、被学習者の発言に対する主学習者の期待を表現しており、その値は学習者に応じて異なる。発言が生じると、その発言が学習者の注目対象を変化させれば、対応する発言の注目者決定ルールを適用して新たな注目度を計算し、その時点で主学習者が注目している対象学習者を特定する。そして、新たに決定された対象学習者が以前の対象学習者と異なれば、新しい対象学習者へ自動的にカメラ画像を切り替える。以下、個々の機構について説明する。

6.3 対話制御

6.3.1 発言関連ツリー

発言関連ツリーは、議論中における発言がその依存関係に基づいて個々の Learner によって構造化され、個々の発言関連ツリーは一つ的话题を表現している。発言関連ツリーのノードは一つの発言に対応し、リンクは発言間の前後関係を表している。個々の発言において、前提となる発言を保持していればその発言は前提発言と同じ話題に関する発言であると推測され、前提発言に対応するノードの子ノードとなる。また、発言が前提となる発言を保持していなければ新しい話題である可能性が高いため、Learner は新たに発言関連ツリーを構築して対応する発言をルート・ノードとする。

発言関連ツリーの例を示す。発言とその前提発言が表 6.2 のようであると仮定する。表 6.2 では発言の番号が発言された順番に対応している。この発言関連ツリーは図 6.5 のように構築できる。発言 1 と発言 5 は前提発言がないため、新しい話題の始まりと考えられるので、それぞれ対応する話題を表現する発言関連ツリーのルート・ノードとなる。それ以外の発言は、対応する前提発言の子ノードとなる。発言関連ツリーで発言の前提関係を基に議論を構造化することで、発言 8 のように前の発言と独立した話題であっても、発言の対象となる話題を認識することができる。

主学習者の話題に対する興味は、主学習者の発言から把握することができる。す

表 6.2: 議論中の発言とその前提発言の例

発言	前提発言	発言	前提発言
発言 1	なし	発言 5	なし
発言 2	発言 1	発言 6	発言 5
発言 3	発言 1	発言 7	発言 6
発言 4	発言 2	発言 8	発言 3

なわち、主学習者は興味のある話題に対しては頻繁に発言するが、興味のない話題に関してはあまり注意を払わないので発言しない。個々の発言関連ツリーに対し、主学習者の発言の合計数を対応する話題のトピック注目度とし、トピック注目度の大きさと学習者の興味のある話題を特定する。発言関連ツリーが図 6.6 のように構築される議論において、トピック注目度の例を示す。図 6.6 の発言関連ツリーに対応する話題が同時に存在するような学習状況において、個々の話題に対する学習者 A のトピック注目度はそれぞれ 2, 3, 5 となる。よって、この時点で学習者 A が興味を持っている話題は話題 III である。ここで話題 I, II に対して発言されると、学習者 A にとっては興味のない話題であるので、対象学習者は変化しない可能性が高い。しかし、話題 III に対して発言があると、学習者 A はその発言に注意を払うと推測され、対象学習者が変化するとして、注目者決定ルールを適用する。

6.3.2 注目者決定ルール

学習者の興味の大きさは一定であるとして、全ての被学習者に対する主学習者の注目度の合計を 1 とし、個々の被学習者に対する注目度は 0 以上 1 以下の値とする。注目者決定ルールは、個々の発言において被学習者に対する注目度の変化割合を表現している。主学習者の被学習者への注目は、その時点における発言の主体者によって異なる。また、発言の種類によって、主学習者が反応を期待する被学習者

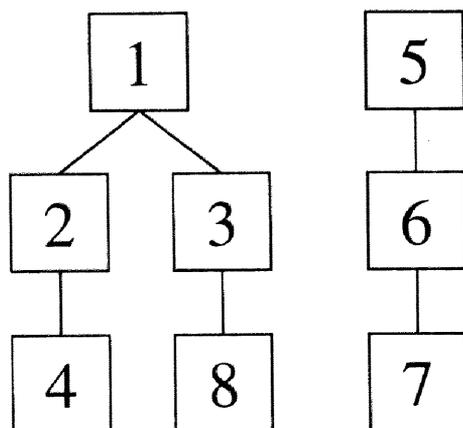


図 6.5: 表 6.2 の発言関連ツリー

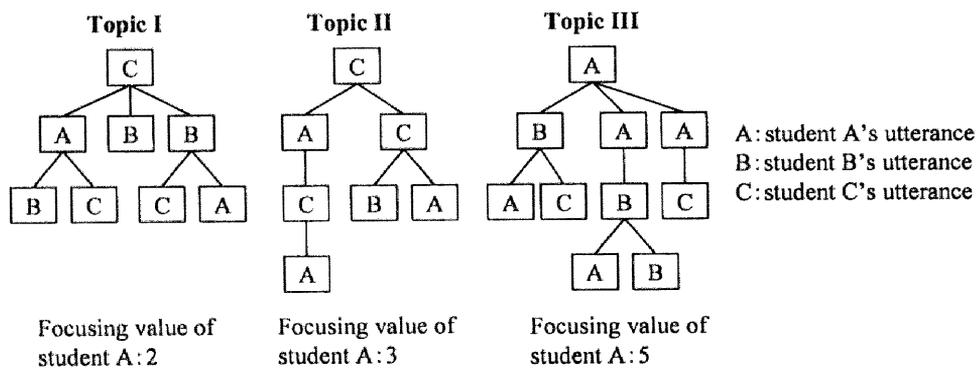


図 6.6: トピック注目度

表 6.3: 注目者決定ルールの例

発言の主体者と種類	被学習者に対する注目変化量
被学習者 A → 全ての学習者：意見	被学習者 A:0.6 被学習者 B:0.2 被学習者 C:0.2
主学習者 → 被学習者 B：質問	被学習者 A:0.0 被学習者 B:1.0 被学習者 C:0.0

が異なる。注目者決定ルールは「発言の主体者と種類」に対する「被学習者に対する注目変化量」で構成される。被学習者に対する注目変化量は、その発言が生じた時点でそれぞれの被学習者に対する注目度の増分を表しており、0以上1以下の値とする。表 6.3に注目者決定ルールの例を挙げる。表 6.3は、注目者決定ルールの例として、被学習者 A から全ての学習者に対する意見と、主学習者から被学習者 B に対する質問において、主学習者から被学習者に対する注目変化量の例を示している。この例では、学習グループは主学習者と被学習者 A, B, C の4人のグループで構成されている。主学習者にとって、「被学習者 A → 全ての学習者」に対する意見の場合は、被学習者 A を注目する可能性が高く、「主学習者 → 被学習者 B」に対する発言の場合は、注目が必ず変化し、被学習者 B のみに集中している。その発言によって注目される可能性がない被学習者の注目変化量を0とする。

議論において発言が生じると、対応する発言の注目者決定ルールを直前の注目度に適用し、被学習者に対する注目度を決定する。式 6.1に注目度の計算式を示す。この式において、 u, u' は被学習者であり、 U は全ての被学習者の集合を示している。 $V(u,t)$ は時間 t における被学習者 u に対する注目度で、 $P(u)$ はその時点の発言に対応する注目者決定ルールの被学習者 u に対する注目変化量である。 α は注目度更新

定数であり、注目度に対する注目者決定ルールの影響の大きさを表す。 α は 0 以上 1 以下の値をとり、 α が大きいと注目対象者の変更が起こり易い。式 6.1 の分子は前状態のそれぞれの被学習者の注目度に注目者決定ルールを適用した値であり、全体の注目度で割ることで、適用した結果全ての被学習者の注目度が 1 を越えないように正規化している。

$$V(u, t+1) = \frac{\alpha \times P(u) + (1 - \alpha) \times V(u, t)}{\sum_{\forall u' \in U} \{\alpha \times P(u') + (1 - \alpha) \times V(u', t)\}} \quad (6.1)$$

個々の発言に対して主学習者から被学習者に対する注目度は常に一定ではなく、学習の進行状況に応じて変化する。そこで、主学習者の反応からその時点の主学習者の状態に適したように注目者決定ルールを修正する必要がある。我々は、システムの選択した対象学習者のカメラ画像を主学習者が拒否し、他の被学習者を自主的に対象学習者として選択する行為を、主学習者の注目者決定ルールの更新に対するトリガとする。主学習者は選択した被学習者に一番興味を持っていると解釈し、選択された被学習者の注目変化量が大きくなるように注目者決定ルールを更新する。式 6.2, 式 6.3 は注目者決定ルールの注目変化量の更新式である。式 6.2 は主学習者に選択された被学習者の注目変化量の更新式であり、式 6.3 はそれ以外の被学習者の注目変化量の更新式である。 t_u は主学習者が選択した被学習者を、 u, u' は t_u 以外の被学習者を表している。 $P(u)$, $P'(u)$ は被学習者 u に対する更新前と更新後の注目変化量を表し、 U は全ての被学習者の集合、 N は U の総数である。 β は注目者決定ルールの更新定数であり、一回の主学習者の選択によって更新する注目変化量の大きさを意味している。 β が大きければ主学習者の一回の選択の影響が注目者決定ルールに大きく影響する。式 6.2 では主学習者が選択した被学習者に対し、一定の注目変化量を加えている。注目変化量は 0 以上 1 以下の値であるため、式 6.2 の右辺が 1 より大きくなれば、 $P'(t_u)$ の値を 1 とする。また、全ての被学習者に対する注目変化量の合計は 1 であるため、式 6.3 では t_u 以外の被学習者の注目変化量の合計が

1-(tu の注目変化量) となるように正規化している.

$$P'(tu) = P(tu) + \frac{\beta}{N-1} \quad (6.2)$$

$$P'(u) = \frac{P(u)}{\sum_{\forall u' \in U, u' \neq tu} P(u')} \times \{1 - P'(tu)\} \quad (6.3)$$

6.4 評価実験

6.4.1 プロトタイプ・システム

我々は注目者決定ルールを実装し、学習者が注目している被学習者のカメラ画像を自動的に表示するプロトタイプ・システムを構築した。本プロトタイプ・システムは Java で実装され、UNIX 上で動作する。また、学習者のカメラ画像は Panasonic のネットワークカメラ KX-CHM1 を用いて取得した。

図 6.7 にプロトタイプ・システムのインタフェースを示す。インタフェースは、学習者間の会話に利用する会話画面と、主学習者が注目している対象学習者の画像を表示する注目学習者表示部の 2 つのウィンドウで構成される。本プロトタイプ・システムは我々が構築している協調学習環境 HARMONY の一部であるため、会話画面には HARMONY のチャットウィンドウである会話画面を利用した。発言の主体者と発言の種類、発言の依存関係を抽出するため、学習者は発言する際、対象発言と発言の対象学習者、発言の種類を選択する。

注目学習者表示部には、システムが注目者決定ルールを用いて決定した、その時点の対象学習者のカメラ画像を表示している。主学習者の対象学習者が変化すると、システムは自動的に新しい対象学習者のカメラ画像を取得し、注目学習者表示部の画像を切り替える。主学習者の自主的な対象学習者の選択は、対象学習者選択コンボボックスで行う。主学習者がコンボボックスを操作すると、システムは選択

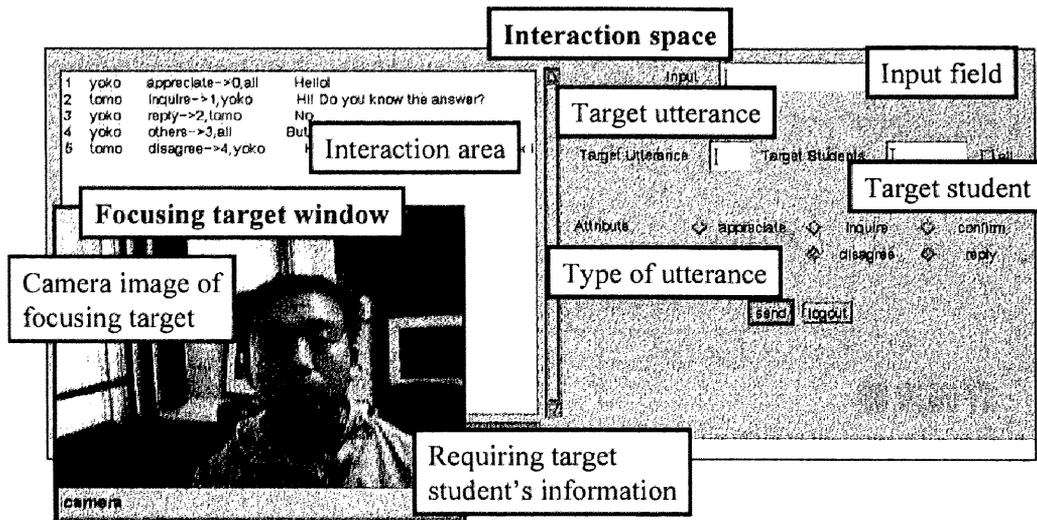


図 6.7: プロトタイプ・システム

された対象学習者を把握し、主学習者の注目者決定ルールの注目変化量を更新する。

6.4.2 実験結果

本プロトタイプ・システムを用いて研究室の4人の大学院生に協調学習に参加してもらい、本システムの有効性を調査した。本実験では、学習参加者が少ない場合に学習者の意図が十分に反映されるように、式 6.1の注目度更新定数 α と式 6.2の注目者決定ルールの更新定数 β を設定した。式 6.1の注目度更新定数 α は、注目度が0である被学習者が注目者決定ルールの注目変化量が1である発言をした場合、対応する被学習者が対象学習者となるように決定した¹。また、式 6.2の注目者決定ルールの更新定数 β は、多くても2回特定の被学習者に対して同一の注目者決定ルール

¹注目度更新定数 α は 0.6 となった

表 6.4: 実験に使用した問題

x の 2 次関数 $x^2 - 2ax + b$ の $x \leq 1$ における最小値を m とする。
 $a - 2b \geq 3$ のとき、 m の最大値を求めよ。

を更新すると、その注目者決定ルールで対象となる被学習者の注目変化量が最大となるように決定した²。実験では、まずインタフェースの操作方法について被験者に 10 分程度説明し、そして実際に操作してもらった。その後、高校数学の問題を与え、30 分程度会話画面を用いて学習してもらった。実験に使用した問題を表 6.4 に示す。実験後に被験者にアンケートを実施し、実験中のカメラ画像の切替えの履歴とアンケート結果を用いて、本プロトタイプ・システムが被験者の対面感を正確に把握していたかを評価した。

図 6.8 に議論の状況とカメラ画像の切替え履歴を示す。図 6.8 の x 軸は 5 分間隔で刻んだ時系列を、 y 軸は回数を示している。図 6.8 から、被験者（主学習者）による画面の切替えは、時間の経過に沿って減少している。被験者による画面の切替えは、システムによる対象学習者の選択が被験者の実際の対象学習者と異なっている場合に発生する。被験者による画面の切替えは学習後半では全くみられなくなっていることから、システムによる対象学習者の選択は被験者の能動的な操作によって適切に改正されたといえることができる。一方、本実験では、常に発言数は一定数存在していたが、時間の経過に伴って話題の数は減少している。このことから、議論において新しい意見が提案されなくなり、それまでに導出された話題を基に被験者が試行錯誤していたことがわかる。これは、システムによる画面の切替えからも説明されている。システムによる画面の切替えは時間の経過に沿って減少しているため、議論の状態が大きく変化しなくなり、被験者が注目する対象学習者が一意に特定される傾向にあることを示している。従って、本実験のように状態があまり変化

²注目者決定ルールの更新定数 β は 1.3 となった

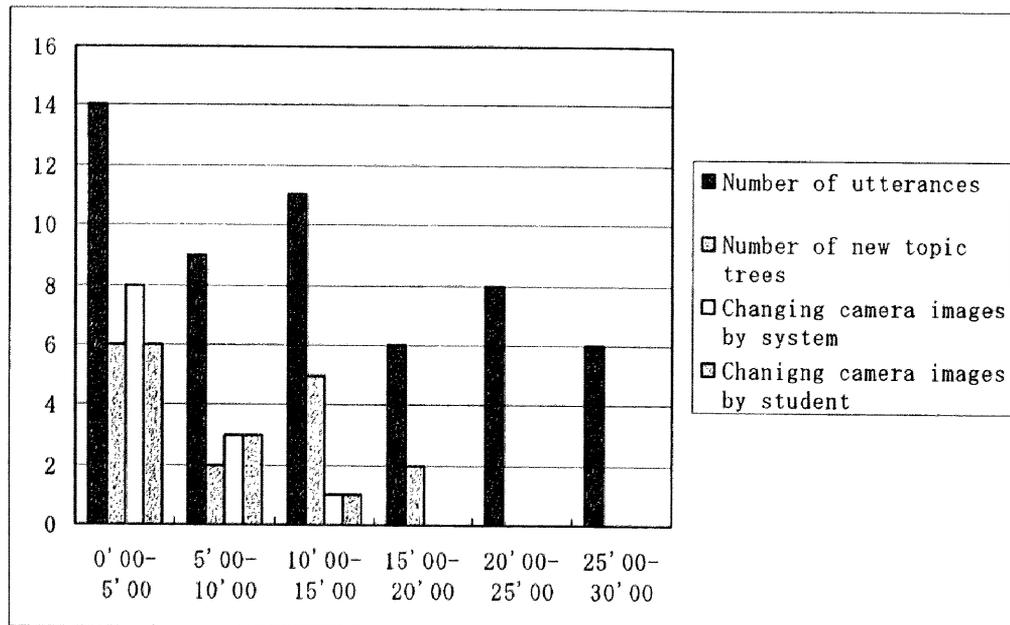


図 6.8: 議論状況とカメラ画像の切替え履歴

しない議論では、被験者の希望に添った対象学習者を表示することが可能であるということが出来る。

次に、表 6.5, 表 6.6 にアンケート結果を示す。表 6.5 の質問 1 で「表示されなかった」と答えた被験者は、自分でカメラ画像を一度も切り替えなかった被験者であり、被験者の意図がシステムに反映されなかったことが原因である。残りの 3 人の被験者はカメラ画像を適時に切り替えているため、本プロトタイプ・システムは被験者がカメラ画像をある程度調整すれば、対象学習者の画像を適切に表示できるという結果が得られた。また、表 6.5 の質問 2, 3 と表 6.6 の結果より、被験者は本システムから顔の特徴などの表層的な情報だけではなく、対象学習者の学習状況や理解状態など、学習の進捗に影響を与える可能性のある情報も獲得していたことがわかる。これにより、被験者は学習の観点から個々の被学習者に対するイメージを作

表 6.5: アンケート結果 (I)

質問	はい	いいえ
1. 対象学習者表示部に興味のある学習者が表示されていたか？	3	1
2. 学習者の画像から期待する情報を得ることができたか？	3	1
3. 画像を見て学習者に対する認識が変わったか？	3	1
4. チャットを用いたインタラクションと比べて、一緒に学習しているという気分になったか？	3	1
5. 他の学習者を身近に感じることはできたか？	3	1

成し、それを基に会話することができた。また、表 6.5 の質問 4、5 からは、被験者が他の被学習者を身近に感じていたので、本システムは対面感を実現しているといえる。さらに、被験者が他の被学習者を意識し、学習状況に応じて反応したことが期待される。

6.5 おわりに

本章では、主学習者の対面感を実現するインタフェースの構築を目的とし、議論中に主学習者が注目している被学習者を検出し、対応する学習者のカメラ画像を表示するシステムを構築した。本プロトタイプ・システムを用いた評価実験から、本章で提案した主学習者が注目する対象学習者の決定機構は、話題が大きく変化しない状況では注目する対象学習者を正確に特定できた。また、プロトタイプ・システムを利用した被験者のアンケート結果から本プロトタイプ・システムは他の被学習

表 6.6: アンケート結果 (II)

質問	回答
学習者の画像から得ることを期待した情報は何か？	人柄, 理解状態, その時点の学習行動
画像を見て学習者に対する認識がどのように変化したか？	・意外とわかっていないと思った。 ・下を向いていたので何かをやって いたと思った。

者と一緒に学習しているような対面感を被験者に与えることにも成功した。

本章では, 注目の対象学習者を 1 人に限定し, 対象学習者のカメラ画像を表示することを目的としていた。しかし, 一般に主学習者は複数の被学習者に興味を持ち, 複数の被学習者の動向を同時に注目することもある。今後複数の被学習者に対する注目も支援していかなければならない。また, 現時点では, 対象学習者の画像のみを主学習者の注目対象としている。しかし, 学習中は対象学習者の画像だけではなく, 教科書やノート, 発言など, 学習するためのその他の情報にも注目する可能性がある。そのような個々の学習コンテンツは内容だけではなく, 主学習者が認識するコンテンツ間の依存関係も時間に沿って変化する。例えば, 最初は教科書とノートを用いて学習していても, 議論の進行に従って, ノートと対象学習者の発言を一緒に見たいという欲求が出てくる可能性がある。従って, インタフェースへの操作から個々のコンテンツに対する主学習者のその時点の注目状態を正確に推測し, 学習を効果的に進行できる学習環境を提供する必要がある。一方, インタフェース上に様々な情報を提示すると, 主学習者にとって情報が膨大になり, 適切な情報が効果的に取得されず, 学習効果を減少させる可能性がある。そのような状況に対し, 提示する情報量のバランスを図る必要が発生する。また, 情報量のみではなく, 情報の提示方法, 配置方法を考慮して, 学習者が効果的に情報を取得で

きるように、視覚的なバランスを考慮したインタフェースを構築していく必要もある。

第 7 章

結論

7.1 まとめ

近い将来，学習者が仮想学習空間内で学習するようになる状況を想定できる．本論文では，学習者にいつでも現実世界で実現される様々な学習形態をウェブ上に実現するため，マルチエージェント・パラダイムの下にシームレスな仮想学習空間 HARMONY を提案した．また，協調学習を基本とした様々な学習形態を支援するために個々のエージェントに対して必要とされる機能を述べ，正解導出支援とコミュニケーション支援の 2 つの側面を実現するエージェントの機構を構築した．

HARMONY では，個々のエージェントは学習者の理解状態を向上させるという共通目的の基に，適切なエージェント同士でコミュニティを形成させることで様々な学習形態を実現している．学習者はエージェント Learner を通して自由に他のエージェントとコミュニティを形成できるため，学習者の要求に応じた学習形態を実現可能としている．また，Learner を個々の学習者に対応する擬似学習者として永続的に仮想学習空間内に存在させることにより，学習形態にまたがる学習者の学習状況把握や学習支援が可能となる．HARMONY では個々のエージェントはそれぞれ独立して振る舞うため，協調学習以外の学習形態を支援するための機構をそれぞれのエージェントに構築することで，容易に支援対象となる学習形態を拡張する

ことができる。

正解導出支援では、協調学習の教師的役割を果たす Coordinator の、学習状況把握機構と、補助図形を用いた助言生成機構について述べた。ウェブ上の協調学習には不特定多数の学習者が参加し、発言に応じて頻繁に学習状況が変化することが想定できるため、瞬時に学習状況を把握して、必要時に適切に助言を生成できる必要がある。学習状況把握機構では、学習グループを学習状況把握の単位とし、学習グループの学習の進行状況を「正解導出の進捗状況」と「議論の広がり」の2つの視点から把握するため、解導出シナリオと経路木を Coordinator の正解知識として構築した。解導出シナリオは正解を100%としたときの導出箇所の到達割合で表現したものであり、正解導出の膠着状態や、学習グループ内の理解状態の広がりを把握できる。経路木は正解の導出過程を導出経路で表現しており、導出された経路から議論で導出された視点の広がりを検出して適切な導出経路へ誘導することにより、学習者に問題に対するより深い洞察を促すことができる。学習の膠着状態に対して検出した状況を通知する助言を生成するプロトタイプ・システムを用いた実験結果から、Coordinator は解導出シナリオと経路木を基に適切なタイミングで学習の膠着状態を検出でき、特に理解状態が遅れていて助言が必要な学習者にとって、その助言は有用であることがわかった。Coordinator はグループの学習状況を大まかに把握しているため、助言が必要でない状況に対しても誤って助言を生成することがあったが、そのような助言に対しては学習グループが無視する現象が見られたため、問題がないことがわかった。これらの結果から、Coordinator の学習状況把握機構は、膠着状態を瞬時に解消するために必要十分な学習状況を表現可能である。

また、助言生成機構では、数学の2次関数の問題に対象を限定して、正解の導出過程を誘発するような補助図形を利用することで、発想支援能力の育成を目的としている。数学の問題では、全ての問題が独立しているわけではなく、対象となっている領域が異なっても同一の概念を用いることがある。従って、学習者は個々の問題の解法を暗記するのではなく、正解の導出に利用する概念を理解することで、多くの問題に対処できるようになる。数学の問題では図を描くことで問題の領

域を別の視点から観察でき、図形間の関係から問題を一般的な事象として捉えることが可能となる。よって、学習状況把握機構で検出された膠着状態に対して補助図形を用いて助言を生成することで、正解の導出を瞬時に円滑に進行させるだけでなく、学習者の理解状態を向上させるような知的な学習支援が可能となる。

一方、学習者の効果的な知識獲得を視野に入れたコミュニケーション支援では、現実世界の物理的な現象を仮想学習空間に実現するのではなく、「注目」対象となる要素の獲得支援と、インタフェース上への注目行為の実現を試みた。「注目」対象となる要素の獲得では、個々の Learner に対応する学習者の個人的な情報を個人学習情報として構築し、モバイル・エージェントを用いた Learner 間のプライベートな情報のやりとりより、注目する学習者の観察を実現している。学習者が直接会話することなく他の学習者の情報を取得可能とすることで、学習者の主体性を反映した情報獲得を支援している。プロトタイプ・システムでは学習者の発言履歴と顔写真のみを個人学習情報としているが、学習者の他の学習形態での学習履歴など、学習者の知識を個人学習情報として蓄積することで、学習者の保持するプライベートな知識の交換を支援できる。

注目行為の実現では、Learner が学習者の他の学習者に対する注目を推測して注目者決定ルールとしてモデル化し、その時点の注目対象者のカメラ画像を自動的に取得して表示するインタフェースを構築した。ネットワークカメラを用いた実験結果から、話題が収束し、注目対象者が特定されるような状況では、Learner は学習者の注目対象者を正確に取得できていることが明らかになった。Learner が学習者の注目対象者を正確に把握できている場合、インタフェース上には学習者にとって有用な情報しか提示されていないため、情報の取得が容易となる。それによって、学習以外の要素であるコミュニケーション部分にかかる負担が軽減し、知識の吸収・定着が促進される。また、注目対象者は個々の学習者によって異なるため、インタフェース上には学習者固有の情報が提示される。学習者の視点を反映していると認識させることで、学習者に学習しているという実感を与えることができ、対面感に基づいた学習環境を提供することができた。

7.2 今後の課題

本研究における今後の課題について述べる。

7.2.1 シームレスな協調学習支援環境

本論文では、ウェブ上の協調学習を基に、個別学習や個別教授へ学習者が自由に移行可能な学習環境の構築を、様々な役割を持ったエージェント間のコミュニケーションという形式で実現した。さらに、Coordinator による正解導出支援機構と、Learner によるコミュニケーション支援機能について議論した。今後は、Coordinator の補助的な役割として、本論文で述べていない Assistant の個別指導機構を構築していく必要がある。Assistant は協調学習に問題が生じて協調学習についていけなくなった学習者に対して 1 対 1 で迅速に指導することが目的となるため、Assistant の機構は従来の ITS とは多少異なる必要がある。従来の ITS は学習者の知識の定着を目的としているのに対し、Assistant は協調学習の議論への早期復帰を支援する必要がある。従って、学習者の問題点を的確に把握し、できるだけ直接的な指導を提供することが要求される。また、効率的な指導を実現するため、Assistant は複数の学習者に対する教授履歴の蓄積から、個々の問題に対する一般的な学習者の誤り傾向に応じた指導を展開する必要がある。

HARMONY では、学習者は Learner を通して他のエージェントとコミュニティを形成する。本論文では協調学習を実現するための学習グループは容易に構成できるという想定で議論している。しかし、ウェブ上には不特定多数の学習者が存在しており、同じ問題に取り組んでいて、協調学習を要求している学習者を探索するのは困難である。マルチエージェント・パラダイムの下、協調学習を要求している Learner を登録・管理して、適切な学習グループを構成する仲介者的な役割を果たすエージェントを導入する必要がある。仲介者的な役割を果たすエージェントは必要に応じて個々の Learner に学習者の学習状況を問い合わせながら、膨大な学習者の中から適切な Learner 同士をコミュニケーションさせる。

また、学習者が Learner を通して個別学習したり、Coordinator や Assistant が集団教授・個別教授を実現する際に利用可能な教材データベースが必要である。HARMONY では多様なエージェントが存在し、それぞれ教材データベースの利用方法も異なる。教材データベースは、多様なエージェントの要求に応じて様々な形式の教材データを提供できなければならない。また、教材データベースに学習者の理解状態に合わせた教材データの提示制御を組み込むことで、学習者の理解状態や正確に応じた教材を提供でき、より効率的な個別学習を実現することができる。

永続的な学習環境内で学習形態を超えた個々の学習者の学習状況を支援するため、Learner 内で保持する個人学習情報や、学習形態が変更したときにエージェント間で交換する知識を明確にする必要もある。Learner は仮想学習空間内で学習者に対応する永続的な擬似学習者であるため、適切な協調学習グループを形成したり Assistant に学習者に応じた指導を実現させるために学習者がそれまでに学習してきた内容や学習方法を保持しておくことは有用である。Learner は学習形態の変更時に Coordinator や Assistant に情報を提示することで、Assistant や Coordinator に学習者に応じた柔軟な教授方法を実現させる。

7.2.2 Coordinator の正解導出支援

本論文で我々が提案した Coordinator の協調学習支援機構は、正解と正解に至る導出過程が存在するような問題を対象として、理解度が中程度の学習者で構成される学習グループによる協調学習に対して有効である。

現時点では、高校数学の問題を対象としており、数学の分野では補助図形が解法を発想するための媒体となり得るという視点から、特に2次関数の問題に対象を限定している。しかし、この種の問題では、正解の導出に用いられる解法は数種類に特定されるため、議論の広がりがあり期待できない。今後は数学の証明問題や、プログラミングの問題など、解の記述方法が多様である問題に支援対象を広げて行く必要がある。議論の広がり期待できるような問題では、キーワードが一意に決

定できなかつたり，記述する順番が一意に決まらない可能性がある．キーワードが重複して存在する問題や，導出経路に順不同な導出箇所が存在する問題に対し，解の多様性を考慮した解導出シナリオと経路木の構築方法について検討しなければならない．

また，現時点では「理解度が中程度」の学習者を想定しているため，理解状態が遅れており，Coordinatorが提示した補助図形から正解を導出できない学習者で構成される学習グループに，正解の導出を達成させることは困難である．理解状態が遅れている学習グループには，個別教授のように，問題の正解を導出段階毎に丁寧に説明したり，問題に関連する例題を用いて正解の導出をシミュレーションするような，より詳細な指導が必要となる．一方，理解している学習グループにこのような細かい指導をすることは，学習の非効率的化につながる．従って，様々な理解レベルの学習グループを想定した助言を構築し，学習グループの理解レベルを判断して適切な助言を生成する機構が必要となる．

7.2.3 Learner のコミュニケーション支援

本論文では，学習者の注目対象を「他の学習者」に限定し，Learner上に「注目」対象となる要素の獲得支援と，「注目」行為を反映したインタフェースを実現した．現在，Learnerによってモデル化される学習者の個人学習情報は，発言と顔写真のみであり，学習者は他の学習者の表面的な特徴は把握できるが，理解状態を正確には判断することはできない．学習者の理解状態を認識できることで，学習者は議論中に注目すべき学習者を正確に特定することができ，必要な情報をより効率的に獲得することができる．現実世界の協調学習において，学習者の理解状態は，学習者のノートやメモなど，学習者の知識を外化したものから判断できる．学習者のノート上に存在する情報は学習者の個人的な視点に基づいて整理されており，正しい知識だけではなく，グループ全体には提示できないアイデアなど，学習者がその時点で考えていることを保持している．HARMONY上に個人的なノートを

構築し、他の学習者のノートを観察可能にすることは、他の学習者の理解状態の把握につながる。従って、物理的な制約のない仮想学習空間上で知識の外化を促進するノート機能を構成し、ノートの情報を個人学習情報として構造的に蓄積することで、他の学習者の理解状態・個性を容易に意識できる空間の実現を目指す。

一方、学習中に学習者は必ずしも他の学習者のみに注目しているわけではなく、教材や発言内容などインタフェース上の他の学習要素にも焦点をあてている。特定の学習者の情報のみでなく、画面上に存在する学習者以外の情報を含めた「注目」行為の実現は、学習者の効果的な情報収集をさらに容易とする。一般的に、インタフェース上では同種類の情報が一つのウィンドウに集約されていることが多い。従って、学習者が注目している情報の種類は、学習者の各ウィンドウに対する操作履歴から大まかに把握できる。すなわち、消去されたり縮小化されたウィンドウ上の情報は注目されておらず、新たに生成されたり拡大化されたウィンドウ上の情報へ興味が移行したと考えることができる。このように画面全体を仮想学習空間へのインタフェースとして捉え、各ウィンドウの状態と個々のウィンドウに対する学習者の操作系列、ウィンドウの意味的な関連を基に、学習者の画面全体に対する注目を実現する。

謝辞

本研究は、名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻 渡邊豊英教授のご指導の下で行われました。筆者が名古屋大学工学部情報工学科4年生となり、研究室に配属されて以来、名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期課程、同後期課程に在学中の今日まで、終始懇切丁寧なご指導と多大なる御配慮を賜りました渡邊先生に対し、ここに心から感謝の意を表し、深く御礼申し上げます。

同時に、本論文をまとめるにあたって、御多忙の中、多くの有益かつ適切な御教示と注意深い御検討を頂きました名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻 稲垣康善教授、同専攻 大西昇教授に対して心から感謝申し上げます。

また、本研究に関して日々熱心に御討議を頂きました渡邊研究室の皆様にも深く感謝致します。特に、貴重な御意見、御協力を頂きました名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻 加藤ジェーン助教授、同専攻 朝倉宏一助手、現在九州工業大学情報工学部機械システム工学科 高田修助教授、現在九州芸術工科大学芸術工学部芸術情報設計学科 牛尼剛聡助手、現在名城大学理工学部情報科学科 佐川雄二講師、名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程後期課程 Feng Jun さん、内田智士君に厚く御礼申し上げます。

本研究の一部は、渡邊研究室 KD グループ TS 班に所属された方々の御協力を受けて進めています。特に、モバイルエージェントを用いた Learner の個人情報への獲得機能を小川雄史君（現在トヨタ自動車勤務）と、Learner の他者注目インタフェースを伊藤泰樹君と共に取り組みました。ここに感謝の意を表します。

最後に、暖かく見守ってくれた家族、そして心の支えとなってくれた友人に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 溝口理一郎: “知的教育システム”, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 2, pp. 135–140 (1995).
- [2] 伊藤紘二: “知的学習支援システムの過去・現在そして未来”, 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 4, pp. 444–451 (2002).
- [3] “<http://www.zusaku.com/>”.
- [4] 瀧口浩史, 梶浦文夫: “オブジェクト指向を学習するためのゲーム型 CAI の開発”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 330, pp. 1–4 (2002).
- [5] 佐合尚子, 竹田尚彦: “RPG によりコミュニケーション能力を高める英会話 CAL”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2000, No. 117, pp. 13–20 (2000).
- [6] D. スリーマン, J.S. ブラウン (編): “人工知能と知的 CAI システム”, 講談社 (1987).
- [7] 大槻説乎: “発見的学習とその支援環境”, 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 4, pp. 411–418 (1993).
- [8] 仲林清, 小池義昌, 丸山美奈, 東平洋史, 福原美三, 中村行宏: “WWW を用いた知的 CAI システム CALAT”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 4, pp. 906–914 (1997).

- [9] L. K. Wing and J. Warren: "Reusing of Teaching Materials for an Intelligent Tutoring System with Multiple Teaching Strategies", *Proc. of ICCE'98*, Vol. 1, pp. 536–543 (1998).
- [10] 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 - 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誌*, Vol. 18, No. 3,4, pp. 364–376 (2001).
- [11] 先進学習基盤協議会 (編): "e ラーニング白書 2001/2002 年版", オーム社開発局 (2001).
- [12] M. A. Constantino-Gonzalez and D. D. Suthers: "A Coached Collaborative Learning Environment for Entity-Relationship Modeling", *Proc. of ITS 2000*, pp. 544–553 (2000).
- [13] J. Heh, W. Shu, J. J. Jehng and T. Chan: "Design and Development of a Distributed Multi-User Visual Learning Environment", *Proc. of ITS'96*, pp. 187–196 (1996).
- [14] "<http://www.kantei.go.jp/jp/it/network/dai3/3siryou40.html>".
- [15] G. Weiss (ed.): "*Multiagent Systems*", MIT Press (1999).
- [16] P. Dillenbourg: "Introduction: What Do You Mean By Collaborative Learning?", *Collaborative Learning, Cognitive and Computational Approaches*, pp. 1–19 (1999) Published by Elsevier Science Ltd.
- [17] T. M. Ohl: "An Interaction-Centric Learning Model", *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, Vol. 10, No. 4, pp. 311–332 (2001).

- [18] K. Sedig, M. Klawe and M. Westrom: “Role of Interface Manipulation Style and Scaffolding on Cognition and Concept Learning in Learnware”, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 8, No. 1, pp. 34–59 (2001).
- [19] T. Watanabe: “Education Support Paradigm as Knowledge Management”, *Proc. of ED-MEDIA'01*, pp. 2007–2008 (2001).
- [20] C. Houser, S. Yokoi and T. Yasuda: “A New Method for Efficient Study of Kanji Using Mnemonics and Software”, *Proc. of ICCE/ICCAI 2000*, Vol. 1, pp. 383–387 (2000).
- [21] B. H. Far and A. H. Hashimoto: “A Computational Model for Learner’s Motivation States in Individualized Tutoring System”, *Proc. of ICCE/ICCAI 2000*, Vol. 2, pp. 1059–1067 (2000).
- [22] H. S. Wangwei: “Exploration of the Multimedia Textbook of Mechanism and Dynamics of Machinery for Networked Learning”, *Proc. of ICCE'98*, Vol. 2, pp. 202–205 (1998).
- [23] 緒方広明, 矢野米雄: “アウェアネスを指向した開放型グループ学習支援システム Sharlok の構築”, *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J80-D-II, No. 4, pp. 874–883 (1997).
- [24] M. Nakamura and S. Otsuki: “Group Learning Environment Based on Hypothesis Generation and Inference Externalization”, *Proc. of ICCE'98*, Vol. 2, pp. 535–538 (1998).
- [25] 稲葉晶子, T. Supnithi, 池田満, 溝口理一郎: “学習理論に基づく協調学習グループ構成のための学習目的オントロジー”, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol. J83-D-I, No. 6, pp. 569–579 (2000).

- [26] “<http://www.nhk.or.jp/okome/>”.
- [27] 稲垣忠, 堀田龍也, 高橋純, 黒上晴夫: “学校間交流実践の類型とコミュニケーション・ツールの関係性”, *教育システム情報学会誌*, Vol. 8, No. 3, pp. 297-307 (2001).
- [28] T. Kasai and T. Okamoto: “The Support for Collaborative Learning with Companion Agents”, *Proc. of ICCE'99*, Vol. 1, pp. 760-767 (1999).
- [29] A. M. Florea: “An Agent-based Collaborative Learning”, *Proc. of ICCE'99*, Vol. 1, pp. 161-164 (1999).
- [30] 斉藤正敏, 松田稔樹, 野村泰朗: “ネットワークを用いた討論支援システムの開発”, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. ET99-97, pp. 15-22 (2000).
- [31] 稲見望, 富永浩之: “プログラミング演習のためのグループチャット型 CSCL”, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol. ET2001-114, pp. 107-114 (2002).
- [32] 中村暢達, 里田浩三, 平池龍一, 根元啓次: “インターネット対応 3D マルチユーザシステム Ladakh”, *電子情報通信学論文誌 D-II*, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 982-991 (1998).
- [33] 福井健太郎, 喜多野美鈴, 岡田謙一: “仮想空間を使った多地点遠隔会議システム: e-MulCS”, *情報処理学会論文誌*, Vol. 43, No. 11, pp. 3375-3384 (2002).
- [34] 林雄介, 津本紘亨, 池田満, 溝口理一郎: “「学習する組織」実現に向けた学習コンテンツの体系化と利用の枠組み - オントロジーに基づくナレッジマネジメント支援に向けて -”, *人工知能学会研究会資料*, Vol. SIG-IES-A003-8, pp. 43-50 (2001).

- [35] I. Nonaka, K. Umemoto and D. Senoo: "From Information Processing to Knowledge Creation", *Technology in Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 203–218 (1996).
- [36] "論文特集：「オントロジーの基礎と応用」", 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 6 (1999).
- [37] 神田陽治, 渡部勇, 三末和男, 平岩真一, 増井誠生: "グループ発想支援システム：GrIPS", 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 5, pp. 601–610 (1993).
- [38] 遠藤聡志, 大内東: "統合型発想支援システム：FISM", 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 5, pp. 611–618 (1993).
- [39] N. Kato, M. Chujo and S. Kunifuji: "A Development of a Group Decision Support System Facilitating the Consensus-making Process", *Trans. on IPSJ*, Vol. 38, No. 12, pp. 2629–2639 (1997) [in Japanese].
- [40] 稲葉晶子, 岡本敏雄: "協調活動における議論支援戦略", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. ET98-11, pp. 77–84 (1998).
- [41] P. A. Tedesco and J. Self: "Using Meta-Cognitive Conflicts to Support Group Problem Solving", *Proc. of ITS 2000*, pp. 232–241 (2000).
- [42] H. Saitoh, N. Tanaka, T. Ohno, T. Maeda and A. Ohuchi: "An Experimental Study on Automatic Construction of Conceptual Map Based on Educational Collaborative Communication", *Proc. of ICCE'99*, Vol. 1, pp. 263–270 (1999).
- [43] M. C. Rosatelli, J. A. Self and M. Thiry: "LeCS: A Collaborative Case Study System", *Proc. of ITS 2000*, pp. 242–251 (2000).

- [44] 堤安史, 花本一宏, 福田美樹, 中村学, 大槻説平: “グループ討論における擬似学習者の交渉方式に関する研究”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. ET99-15, pp. 41–48 (1999).
- [45] 小尻智子, 渡邊豊英: “教師的機能を実現する協調学習支援空間”, 電気学会論文誌 C, Vol. 120-C, No. 12, pp. 1894–1904 (2000).
- [46] T. Kojiri and T. Watanabe: “Agent-oriented Support Environment in Web-based Collaborative Learning”, *Journal of Universal Computer Science*, Vol. 7, No. 3, pp. 226–239 (2001).
- [47] J. E. White: “Telescript Technology: Mobile Agents”, *Software Agents (J. Bradshaw (ed.)), MIT Press*, pp. 437–472 (1997).
- [48] 清水智博, 小尻智子, 渡邊豊英: “協調学習環境における個別指導機構”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 139, pp. 13–18 (2002).
- [49] 細谷克美, 加藤泰久, 川野辺彰久, 角田進, 福原美三: “マルチユーザ仮想空間を利用した協調学習環境の構成法”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-D-II, No. 4, pp. 866–873 (1997).
- [50] 良本完爾, 吳昌豪, 池田満, 溝口理一郎: “動的学習グループ形成における協調学習目的の設定”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. ET97-18, pp. 25–32 (1997).
- [51] A. Inaba and T. Okamoto: “Negotiation Process Model for Intelligent Discussion Coordination System on CSCL Environment”, *Proc. of AI-ED'97*, pp. 175–182 (1997).

- [52] K. Nishimoto, Y. Sumi and K. Mase: “Enhancement of Creative Aspects of a Daily Conversation with a Topic Development Agent”, *Coordination Technology for Collaborative Applications*, Vol. LNCS 1364, pp. 63–76 (1998).
- [53] T. Kojiri and T. Watanabe: “Cooperative Learning Support Mechanism, Based on Scenario of Specifying Solving Process”, *Proc. of ICCE'98*, Vol. 2, pp. 532–534 (1998).
- [54] T. Kojiri and T. Watanabe: “Adaptable Learning Environment for Supporting a Group of Unspecified Participants in Web”, *Proc. of SITE'99*, pp. 1937–1942 (1999).
- [55] T. Kojiri and T. Watanabe: “A Management Method of Learning Situation in Collaborative Learning”, *Proc. of ICCE'99*, Vol. 1, pp. 386–393 (1999).
- [56] 雪田修一: “UNIX ネットワーク ベストプログラミング入門”, 技術評論社 (1992), [in Japanese].
- [57] 高橋勇, 小西達裕, 伊東幸宏: “化学実験を題材としたマイクロワールド型教育システムにおけるプランニングとプラン認識を利用したアドバイス生成”, 人工知能学会論文誌, Vol. 16, No. 1-H, pp. 63–73 (2001).
- [58] 高橋勇, 小西達裕, 伊東幸宏: “高校化学を対象とするマイクロワールドにおける学習者モデルの構築方法”, 人工知能学会論文誌, Vol. 16, No. 6-D, pp. 483–492 (2001).
- [59] 新ヶ江登美夫, 竹内章, 大槻説乎: “実験環境における発見的学習の支援”, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 373–382 (1995).

- [60] 伊藤毅志, 大西昇, 杉江昇: “人間の作図過程を説明する問題解決スクリプトと作図の分類”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J77-D-II, No. 4, pp. 811–822 (1994).
- [61] 蟹江誠夫 (編): “チャート式 基礎からの数学 I”, 数研出版 (1991).
- [62] Y. S. Chee and Y. B. Khoo: “Supporting Collaborative Learning in a Simulation-Oriented VR Environment”, *Proc. of ICCE'99*, Vol. 2, pp. 659–662 (1999).
- [63] H. Ogata, K. Imai, K. Matsuura and Y. Yano: “Knowledge Awareness Map for Open-ended and Collaborative Learning on World Wide Web”, *Proc. of ICCE'99*, Vol. 1, pp. 319–326 (1999).
- [64] 佐藤一郎: “モバイルエージェント”, コンピュータソフトウェア, Vol. 17, No. 2, pp. 153–162 (2000).
- [65] 佐藤一郎: “AgentSpace”, <http://islab.is.ocha.ac.jp/agent/> (1999).
- [66] 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨: “FreeWalk : 3次元仮想空間を用いた非形式なコミュニケーションの支援”, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 5, pp. 1356–1364 (1998).
- [67] 堀切和典, 鈴木理敏, 市村哲, 小笠原康裕: “「Ubiquitous Media」ネットワークを用いた知識の創造と共有のためのコミュニケーション環境”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. AI2001-47, pp. 57–64 (2001).
- [68] 伊藤泰樹, 小尻智子, 渡邊豊英: “協調学習空間における face-to-face インタフェースの構築”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 102, No. 139, pp. 7–12 (2002).

- [69] 桑原和宏, 湯川高志, 大黒毅, 大和田龍夫, 吉田仙, 亀井剛次: “エージェントによるコミュニケーション支援に向けて - パーソナル・レポジトリとその応用 -”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. AI2001-47, pp. 1-8 (2001).
- [70] 吉田仙, 亀井剛次, 大黒毅, 桑原和宏: “ネットワークコミュニティ支援システムのエージェント指向フレームワーク Shine”, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 2, pp. 499-523 (2002).
- [71] 小尻智子, 小川雄史, 渡邊豊英: “個人学習情報管理エージェントを用いた相互理解促進のためのインタフェースの構築”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 100, No. 113, pp. 87-94 (2000).