

協調学習における非言語情報に基づく学習態度の可視化

林 佑樹^{1,a)} 小川 裕史¹ 中野 有紀子¹

受付日 2013年4月10日, 採録日 2013年10月9日

概要: 対面環境における協調学習では, 実際にやり取りされる会話内容に加えて, 発話者の観察やノートの記述といった非言語的な動作も学習を進めるうえで重要な役割を果たす. 本研究では, 協調学習の効果的な分析に向けた非言語情報に基づく学習者の学習態度可視化システムを提案する. 学習時の非言語情報として, 学習者の注視対象, 発話区間, ノート記述動作を計測・収集するための協調学習環境を構築し, データ収集実験を実施して協調学習コーパスを作成する. 協調学習の状況として学習者の協調的態度, および学習理解態度の両側面に着目し, これらの項目を非言語情報に基づき直感的に可視化するための手法を述べる. 評価実験より, システムが算出した可視化項目の値と被験者の評価値に強い相関があることが示された.

キーワード: 協調学習, 非言語情報, 可視化システム, 学習態度

Visualizing Learners' Attitudes Based on Nonverbal Information in Collaborative Learning

YUKI HAYASHI^{1,a)} YUJI OGAWA¹ YUKIKO NAKANO¹

Received: April 10, 2013, Accepted: October 9, 2013

Abstract: In collaborative learning, participants progress their learning through multimodal information in a face-to-face environment. In addition to conversation, nonverbal information such as looking at other participants and note taking plays an important role in facilitating effective interaction. By exploiting such nonverbal information in the analysis of collaborative learning, we propose a learning activity visualization system based on nonverbal information. For this purpose, we introduce multimodal measurement devices for extracting the gaze targets, speech intervals, and writing actions of learners, and construct a multimodal interaction corpus of collaborative learning through the data acquisition experiments. Based on the nonverbal information, we propose an estimation method for visualizing collaborative and learning attitudes of learners in collaborative learning. Experimental results showed that there were strong correlations between the values calculated by our visualization method and subjective judgments by human subjects.

Keywords: collaborative learning, nonverbal information, visualization system, learners' attitudes

1. はじめに

協調学習は, 学習者がグループの中でお互いに教え合い, 協力しながら学習を進めることで, 互いの知識理解を深め合う相互依存的な学習である [1]. 自己表現力の育成, 他人との意見の相違点を整理するといった協調学習を通して育まれる学習効果は, 教育分野において広く認識されてい

る [2]. このような協調学習を情報処理技術を用いて支援する研究分野は CSCL (Computer Supported Collaborative Learning) と呼ばれ, 多くの研究が行われている. 協調学習では, 学習者同士でコミュニケーションをとり合いながら学習活動が進展する. しかし, 学習者の構成や時間的な制約などが原因で, 必ずしも他者と効果的に学習を進められるとは限らない. 加えて, 協調学習がうまく進展しているかどうかを, 協調学習支援を対象とする研究者や教育者が人手で判断することは難しいため, 学習時の状況を客観的に分析, 評価できる仕組みが求められる.

¹ 成蹊大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Seikei University,
Musashino, Tokyo 180-8633, Japan

a) hayashi@st.seikei.ac.jp

協調学習は会話によって進展するため、既存研究の多くは学習時に交わされる発言内容に焦点が当てられてきた [3], [4]. しかし協調学習では、話している相手の表情を観察する、ノートを記述するといった非言語行動も円滑なコミュニケーションを行うために重要な役割を担う [5], [6]. 学習者の視線や身振りなどのインタラクションから学習状況を分析することで、協調学習の分析の効率化や協調学習全体の評価を行うことが可能となる.

本研究では、協調学習時の非言語情報に焦点を当て、他者やノートを見ているといった学習者の注視対象情報、発言における発話区間情報、および学習者のノート記述動作情報を用いて、協調学習時の状況を可視化する仕組みを実現することを目的とする. 学習者の非言語情報を収集するために、アイトラッカ、デジタルペン、ヘッドセットなどの各種計測機器を備えた協調学習環境を構築し、データ収集実験を通して参加者の非言語情報を収集する. 複数人により進行する協調学習では、各学習者が他者と相互作用をしているか、また知識理解に向けて積極的な学習活動をしているかどうかを特定できることが望ましい. このような学習者の参加態度を外側から得られる非言語的な行動指標から推定することができれば、協調学習を対象とした第三者の分析作業や評価が容易になると考えられる. そこで本研究では、他者と協力的に学習を進めているか (協調的態度の側面)、学習課題に対して積極的な態度で取り組んでいるか (学習理解態度の側面) を学習者の非言語情報に基づき定量化し、直感的に表現するための可視化手法を提案する.

2. 関連研究

2.1 非言語情報に着目したコミュニケーションの分析

共同作業における非言語情報に基づくコミュニケーションを分析する研究として、Brennan らは遠隔地の共同作業における発話と視線情報の共有がもたらす作業効率の違いを調査し、視線を共有することで作業効率が高まることを報告している [7]. また、Kumano らは、複数人の合意形成対話における参加者の表情と視線対象に着目し、これらの非言語情報が付与された対話データから、動的ベイジアンネットワークを用いて会話時の参加者の共感/反感の感情を推定する手法を提案している [8]. 一方、複数人による協調的な学習状況を非言語情報を手がかりに分析している研究が近年報告されている. 平井らはコードを書く人と相補的な作業をする人に分かれてプログラミングをするペアプログラミングを対象に、学習者のつまずきとなる事例を発言履歴から分析した [9]. 制限時間を与えられた課題がうまくいかない状態において、発話長や連続発話、説明の繰返しに特徴があることを示している. Kabashima らは、母国語で会話する場合と、第2外国語で会話する場合に表れる非言語情報の違いを分析している [10]. 話し手が他者から見られている/他者を見ている割合の視線情報や、音

声情報の発話平均時間などに着目し、第2外国語の会話では話し手が他者を見る割合が多くなる傾向を見出した.

これらの研究は、共同作業や協調学習場面における非言語情報を分析することの重要性を示している. 本研究では、協調学習分野においてこれまでに対象とされていない、学習者の学習態度を非言語情報に基づきモデル化する初の試みであり、提案する可視化システムにより、協調学習の分析作業の負荷を軽減することを目指している.

2.2 多人数会話におけるマルチモーダルコーパス

複数人対話でなされる対面環境における会議やミーティングのインタラクションデータの収集を目指した研究が報告されている. AMI Project では、新たなテレビリモコンをデザインするという共同作業を被験者が行い、キックオフ、機能設計、概念設計、詳細設計という4つのフェーズに分けた作業の様子をマイクやビデオで計測した [11]. データ収集後のアノテーション作業により、発言の書き起こしや、発話タグ、参加者の位置や顔向き、感情といった様々なマルチモーダル情報が付与された大規模なコーパスを作成している. また、人同士のインタラクションに関する様々な種類のマルチモーダル情報を計測するための環境として、IMADE ルームが構築されている [12]. この環境では、同時計測されたビデオや音声データ、モーションキャプチャから得られる位置や身体動作、アイマークレコーダから得られる視線情報といったデータを計測することができる.

これらのコーパスは議論の分析に焦点を当てたものであり、協調学習場面を対象とした非言語情報を含むコーパスを作成・利用した研究はほとんど存在しないと考えられる. 本研究では、多人数でなされる活動の中でも協調学習におけるインタラクションに焦点を当て、学習時になされる記述動作や視線対象といったマルチモーダル情報を収集するための学習環境を構築する. 作成したコーパスは、学習状況を非言語情報の観点から分析するために、大変価値のある資源となると考えている.

2.3 会話状況の可視化

会話状況を可視化する研究として、Viegas らは参加者が色つきのノードで2次元平面上に可視化されるチャットシステムを提案した [13]. インタフェースでは、発言時に参加者を表すノードを大きくし、自身の近くにいる参加者の発言内容のみを表示することで会話の活発さを表現している. 会話履歴可視化用のインタフェースでは、時間系列を縦軸にとり、各参加者がいつ発言を行ったかを直感的に表現している. DiMicco らは、対面ミーティングにおける発言タイミングと発話量情報に基づき、参加者のインタラクションを表現する可視化システムを提案している [14]. 可視化内容として、各参加者の発言総量と量がヒストグラムで表示される機能や、参加者が発言している間に他者が重複

して発言をしていた割合をパイチャートで表示する機能がある。望月らは、協調学習における発言と各学習者との関係を可視化する手法を提案している [15]。あらかじめ学習内容を表すキーワードを設定し、各学習者によるキーワードを含んだ発言について、データ要素どうしの関係性を視覚的に表現するコレスポネンス分析をすることで、学習者とキーワードに対する関係が2次元平面に可視化される。

これらの研究では、会話ログの直感的な可視化や、議論内容と各学習者との関係を発言情報に基づき表現しているが、各参加者の会話/学習に対する参加態度までは表現できていない。本研究では、収集した非言語情報を手がかりとして協調学習の状況を判断し、学習者間の関係や学習態度を直観的に表現できる可視化を実現する。

3. アプローチ

3.1 対象とする協調学習と非言語情報

本研究では、少人数（3名の学習者）による協調学習を扱い、与えられた課題に関する知識を深める学習を対象とする。学習課題として、数式などを利用して計算を行う解のある問題と、解の存在しないオープンエンドな問題を議論する状況を想定し、すべての学習者が学習内容を共有・理解することを学習目的とする。各学習者は、個人の解やアイデア、他者の意見などを自由に記述できるノートを持つ。また、指導者などの教師的な役割を担う学習者は設定せず、仲間同士で学習を進める協調学習を想定する。

協調学習では、個別学習のように単にノートを記述しながら学習をするだけでなく、周りに集う他者の学習状況を観察したり、相手の発言に耳を傾け、ときに自分の意見を主張したりしながら学習を進める。注視対象の変化や発言の有無といった学習者のプリミティブな動作を統合することで、ある時点における協調学習のインタラクションを表現することが可能となる [12]。このような非言語情報データを収集することを目的に、他者/ノートに対する注視対象情報、発言における発話区間情報、および学習者のノート記述動作情報に着目する。注視対象と発話区間が分かることで、誰が誰に対して注目しながら対話しているかといった学習時の対話状況を判断できる。また、ノートを記述している動作が分かることで、学習者が能動的に学習に取り組んでいるか否かを判断可能となる。本研究では、これらの情報を各種計測機器により自動的に取得できる学習環境を構築する。

3.2 学習状況の可視化

協調学習の状況を可視化するために、本研究では学習者を色つきの円形オブジェクト（以降、「ノード」）で表現する。協調学習の状況として、協調的態度の側面、および学習理解態度の側面を、3.1 節にあげた非言語情報に基づき可視化する。表 1 に本研究が扱う可視化の対象とその表現

表 1 学習状況の可視化情報

Table 1 Visualization information in collaborative learning.

	可視化の対象	表現方法
協調的態度の側面	他者への協調性	ノードの大きさ
	関係の親密さ	ノード間の距離
学習理解態度の側面	学習への積極性	ノード色の濃さ

方法を示す。以下に、各側面を表現するために用いる非言語情報とその方針を述べる。

● 協調的態度の側面

協調学習では、発言を交わし合うことで学習課題に関する意見を交換することができる。このように複数人で知識を享受し合う状況において、説明や問題提起をし、積極的に他者に働きかけている学習者の発言は、単純な質問や同意、相槌といった発言と比べて、その発話長が長くなると考えられる。本研究では、このような他者に積極的に働きかけている学習者を、他者に協調的な態度をとっている学習者と見なす。複数人対話における参加者の視線量を分析した研究 [16] では、聞き手となる参加者は話し手の方向を注視する割合が高くなることを明らかにしている。発言量が多くなるほどその発話者に対する被注視量も多くなることが想定されるため、本研究では、発言量に加えて発話者への被注視量の情報を補完的に用いることで他者への協調性を推定し、学習者を表すノードの大きさを発言量と被注視量に応じて変化させる。

また、他者への協調性に加えて、学習者同士の関係の親密さを表現する。文献 [17] では、2者間の相互注視量が親近感に影響を及ぼすことに言及している。そこで本研究では、学習者間で互いを見ていた時間に比例する形で2者間の「関係の親密さ」を推定できると仮定し、互いの関係をノード間の距離を小さくするような可視化を実現することで、ある区間における学習者たちの関わりを直観的に表現できると考える。ノードの大きさで表現される他者への協調性に加えて学習者間の親密性を表現することで、活発に発言を交わしながら学習に取り組む2者がいる状況や、すべての学習者間が相互に関わりあいながら学習を進めている状況を表現できる。

● 学習理解態度の側面

協調学習では、学習者自身がノートをとりながら課題を解き進めることに加えて、学習課題に関する他者の説明や、問題の解法を傾聴することで新たな知識を得ることができる。このように、学習課題の理解に向けた活動を学習者が積極的に行っているかどうかを定量化できれば、問題を解き進めている状況や、手が止まり膠着している可能性がある状況を推測することができる。本研究では、学習者の外面から得られる非言語的な動作から、観察者の直感に合った学習者の学習態度を推定することを目指している。学習理解に向けて学習に取り組んでいるかどうかを第三者が推

定する際に手がかりにすると考えられる行動指標として、課題に取り組んでいる状況（ノートに記述している）、他者の発言を傾聴している状況（発話者や発話者のノートを見ている）における非言語情報に着目する。ここでは、学習への積極性を、学習者の記述動作時間、発話者および発話者のノートへの注視時間に対応するという仮説のもとで、各パラメータの時間量に比例する形で学習者を表すノード色を変化させる。

4. 協調学習環境

4.1 注視対象情報

視線情報の取得にはグラス型アイトラッカ [18] を用いる。本アイトラッカは、グラス本体、本体から得られるシーン映像（解像度：640×480 pixels, サンプリングレート：30 Hz）、視線データを蓄積するためのレコーディングアシスタント、および IR マーカにより構成される。

学習者の視線情報として、協調学習時の学習者の注視対象を取得する。ここでは、すべての学習者とノートにそれぞれ ID を割り当てた IR マーカを付けることで、学習開始時から終了までの各フレームにおいて、個々の学習者が視線を向けていた他者、または自身/他者のノートを見ているというデータを得る。学習者の注視対象を同定するために、アイトラッカから得られる視線座標と IR マーカの座標との距離を求める。ある学習者のフレーム t における視線座標を $(x_e(t), y_e(t))$ 、同フレームで認識されていた IR マーカ i の座標位置情報を $(x_{IR}(i, t), y_{IR}(i, t))$ としたとき、その距離 $dist(i, t)$ を以下の式 (1) により算出する。

$$dist(i, t) = \sqrt{(x_e(t) - x_{IR}(i, t))^2 + (y_e(t) - y_{IR}(i, t))^2} \quad (1)$$

$dist(i, t)$ の値が定められた閾値よりも小さい場合、その IR マーカ i が付けられた対象を学習者が見ていると判断する。なお、視線認識が正しく取得できた場合のみ処理を行う。

図 1 に注視対象の特定例を示す。画像はある時点にお

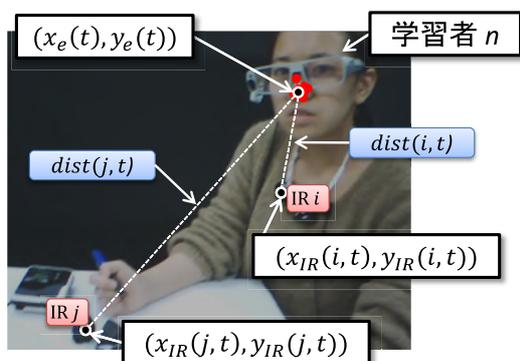


図 1 注視対象の特定

Fig. 1 Example of detection of gaze target.

ける学習者のアイトラッカから得られたシーン映像である。ここで、座標 $(x_e(t), y_e(t))$ は学習者の注視点を表し、座標 $(x_{IR}(i, t), y_{IR}(i, t))$ 、および座標 $(x_{IR}(j, t), y_{IR}(j, t))$ は、シーン映像に含まれる IR マーカ i および j の座標をそれぞれ表す。この例では IR マーカ i が最も注視点座標と近いものとして算出されるため、学習者の注視対象は IR マーカ i が付けられた学習者 n として特定される。

4.2 発話区間情報

本研究では、ヘッドセットのマイクを用いて学習者の音声を取得する。各マイクをオーディオインタフェースに接続し、同時録音された音声情報から wav 形式のファイルとして各学習者の音声を抽出する。

学習時に誰が、どのタイミングで発言をしていたかを検出するために、音声認識エンジン Julius [19] の付属ソフトウェアである Adintool を利用する。Adintool は、音声ファイル（音声フォーマット：wav 形式, サンプリングレート：16,000 Hz）の音声波形中の発話区間を設定された音声の零交差数と振幅レベル情報に基づき検出する。出力は音声ファイル再生時からの経過時間として算出されるため、学習開始時からの経過時間をフレームに換算することで視線情報のフレーム情報と同期をとることが可能となる。

4.3 ノート記述動作情報

学習者のノートの記述動作を取得するために、デジタルペン [20] を利用する。一般的なボールペンのリフィルを利用できるため、学習者は日常使用している筆記具と同様にこのデジタルペンを使うことができる。ペン先には、超音波発信部と赤外線発光部がついており、筆記時に赤外線と超音波を発信する。受信装置となるメモリユニットが、赤外線センサから赤外線を受信してから 2 カ所の超音波センサが音波を受け取るまでの時間差に基づきペン先の動作を特定する仕組みとなっている。

ある時点で学習者がノートに記述している/していない、という筆記動作を取得するために、各学習者のノート記述動作を取得するためのツールとその情報を受信するためのサーバを実装した。サーバでは接続する学習者ごとに記述動作取得用のスレッドが立てられ、ペン押下情報の受信時にタイムスタンプを付加することで、各学習者の記述動作の同期をとることができる。

4.4 協調学習環境の構成

学習者の非言語情報を取得できる学習環境を構築した。図 2 に協調学習時の学習者の様子を示す。また、図 3 に構築した学習環境のシステム構成を示す。各学習者はアイトラッカとヘッドセットを装着し、デジタルペンを利用して協調学習を行う。アイトラッカの視線情報はリアルタイムに出力することができないため、レコーディングアシスタ

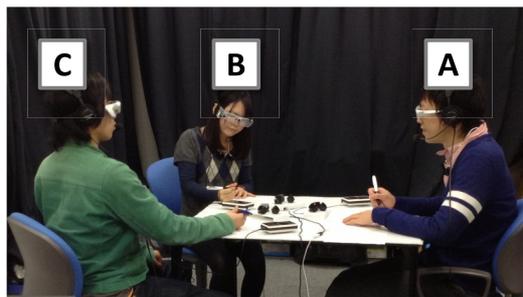


図 2 協調学習の様子

Fig. 2 Snapshot of collaborative learning.

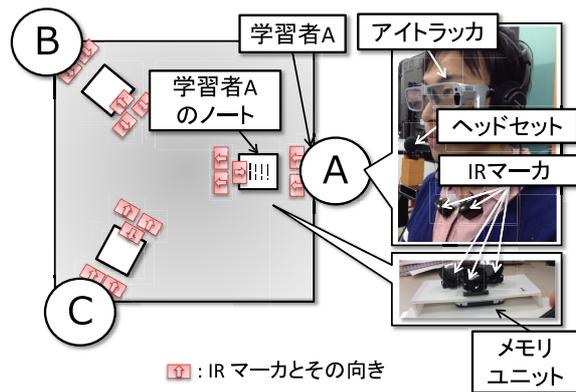


図 4 学習者と IR マーカの位置

Fig. 4 Layout of participants and positions of IR markers.

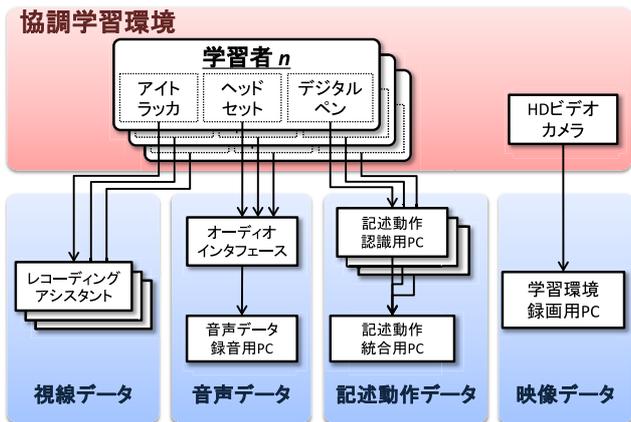


図 3 協調学習環境のシステム構成

Fig. 3 System architecture of our collaborative learning environment.

ント内の SD カードに記録される。マイクから得られる音声は、オーディオインタフェースを介して音声データ録音用 PC に送信される。記述動作情報をサーバに送信するために、ノート PC を被験者ごとに設置している。また、協調学習の様子を記録するために、実験環境全体を俯瞰できる位置に HD ビデオカメラを設置し、学習環境録画用 PC で映像を保存している。

学習者とアイトラッカ用の IR マーカの配置を図 4 に示す。1 辺が 90 cm の正方形型の机の周囲に、互いの距離が同じになるように被験者が配置され、それぞれ一意な ID を保持している 2 つの IR マーカを被験者の首周りに設置する。また、被験者のノート上部にもそれぞれ IR マーカを 3 つずつ設置している。

5. 協調学習コーパスの作成

5.1 実験設定

協調学習における非言語情報を収集することを目的にデータ収集実験を実施した。30 名（男性 20 名、女性 10 名）の被験者を集め、3 名 × 10 グループに対してそれぞれ 2 回ずつ協調学習させた。本実験では、3 名のうち 2 名は情報科学系を専攻する学生とし、他 1 名は文系を専攻する学生を被験者としたうえで、情報科学系科目に関する課題 (1)、(2) にそれぞれ取り組ませた。各グループの男女

表 2 実験で実施した学習課題

Table 2 Learning exercises of the experiments.

問題のタイプ	問題内容
課題(1) 解のある問題	【以下の問題に答えよ】 <ul style="list-style-type: none"> ● 2 進数(10101110)₂を、8 進数、10 進数、16 進数に変換 ● 10 進数(26584)₁₀を、2 進数、8 進数、16 進数に変換 ● 8 進数(164701)₈を、2 進数、10 進数、16 進数に変換
課題(2) 議論	【クラウドコンピュータについて議論せよ】 <ul style="list-style-type: none"> ● クラウドコンピューティングとはなにか。 ● メリットとデメリットはなにか。 ● 今までにこのようなサービスがあったのか。 ● なぜこのようなサービスが生まれたのか。

比、お互いが既知であるかどうかは無作為なグループ構成となっている。文系を専攻する被験者は学習課題に関する知識を持っていない学習者であり、情報科学系を専攻する被験者は知識を持っている学習者と見なすことができる。このようなグループ構成とした理由は、文系の被験者が他者に知識を求め、情報科学系の学習者が説明しているといった協調学習が進展している状況や、課題を理解できずに困っているが、誰も助けることもなく膠着してしまった学習者がいる状況など、学習がうまく進展している/していない学習状況を意図的に生じやすくするためであり、今後、文系の学習者に対して、積極的に働きかけている学習者の発言量や被注視量、説明を受けた後のノート記述の変化といった非言語動作の違いを分析できる協調学習コーパスを作成したいという意図がある。

表 2 に実験で実施した学習課題を示す。課題 (1) は基数変換に関する問題であり、解が一意に定まる問題である。課題 (2) は決められた解はなく、議論を通して知識共有するタイプの問題である。グループ全員の学習が進まないような状況を防ぐために、各グループの情報科学系を専攻する学生 2 名に対して、どのような分野の問題が出るかをあらかじめ伝え、事前に学習させたうえで協調学習を行った。

実験前に注意事項を読み合わせし、アイトラッカのキャリブレーション後に課題 (1)、(2) の順番で協調学習させた。(1) では、計算式や答えをノートに記述するように指



図 5 Anvil [21] による非言語情報のアノテーション

Fig. 5 Annotation of nonverbal information using Anvil.

示をした。(2)では、学習終了後に議論した内容をまとめてもらおうと伝え、議論の中で役立つ内容などがあればノートに記述することを指示した。実験は各10分程度を目安とした。課題(1)に関しては問題解法に関する質問が出ていない状況*1、課題(2)に関しては表2に示されている議題についてひとつおりの議論された状況を我々が判断したうえで終了した。

5.2 非言語情報の統合

収集した非言語情報を分析した結果、ほぼ正確に発話区間を検出できていたことを確認した。一方、IR マーカの反応不良や、ノート記述時などにアイトラッカの下側を見ってしまうことが原因で、視線情報を検出できていない箇所が見られた。また、利用したデジタルペンとアイトラッカは赤外線を発光・検出する仕組みであるため、干渉が原因で記述動作を検出できない箇所が存在していた。

そこで、正確なデータに修正するために、視線情報がとれている箇所の映像に基づき、筆記動作、注視対象のアノテーションを汎用アノテーションツール Anvil [21] を用いて手作業で付加した。図 5 に Anvil のインターフェースを示す。各被験者のアイトラッカから得られたシーン映像および学習環境の俯瞰映像に基づき、視線座標を手がかりにアノテーションすることができる。この作業により、機器の不備による情報欠損を除き、本実験を通して課題(1)について9グループ(平均839秒)、課題(2)について10グループ(平均817秒)の協調学習コーパスを作成した。

6. 学習状況の可視化手法

本章では、3.2節で示した可視化のパラメータとなる非言語情報に基づき、学習者の協調的態度、および学習理解

*1 今回の実験では、課題1の問題をすべての被験者が解き終えていなくても学習を終了させている。

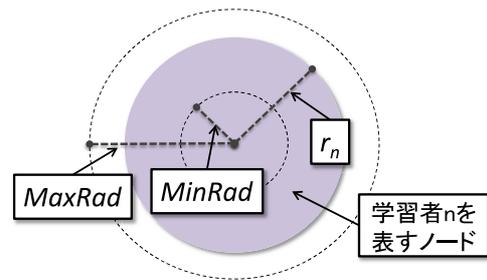


図 6 ノード半径の変化

Fig. 6 Change of node radius.

態度を直感的に表現するための手法について述べる。

6.1 協調的態度の可視化

● ノードの大きさ

他者に協調的な態度をとっている学習者を直感的に表現するために、一定区間における学習者の発言量および、その学習者に対する他者の注視量に応じて学習者を表すノードの大きさを変化させる。現時点 t から s 秒前までの間に学習者 n が発言している時間を $U_n(t, s)$ 、 n が他者から見られている時間の総量を $Ged_n(t, s)$ としたとき、 n を表すノード半径の比率 $p_n(t, s)$ を式(2)により算出する。

$$p_n(t, s) = \frac{U_n(t, s) + Ged_n(t, s)}{s} \quad (2)$$

p_n に比例する形でノードの半径 $r_n(t, s)$ を大きくする。 $U_n(t, s) + Ged_n(t, s) \geq s$ となる場合は $p_n = 1$ とする。そして、学習者を表すノード半径の最大値を $MaxRad$ 、最小値を $MinRad$ として、式(3)により r_n を求める。

$$r_n(t, s) = MinRad + (MaxRad - MinRad) \times p_n(t, s) \quad (3)$$

図 6 にノード半径の変化を示す。半径の値に応じて学習者 n の半径が $MaxRad$ と $MinRad$ の間の値として決定される。このように、学習者の発言量、被注視量をノードの大きさとして反映させることで、各学習者が協調的な態度で学習に取り組んでいるかどうかを表現する。

● ノード間の距離

ノード半径の大きさで表現される他者への協調性に加えて、学習者同士の関係の親密さを、互いを見ていた時間に比例してノード間の距離を小さくするように表現する。現時点 t から s 秒前までに学習者 n_1 が n_2 に視線を向けていた時間を $g(n_1, n_2)$ としたとき、互いを見ていた時間の合計 $G(n_1, n_2)$ は式(4)のようになる。

$$G(n_1, n_2) = g(n_1, n_2) + g(n_2, n_1) \quad (4)$$

G の値が大きいほど n_1 と n_2 は親密であるといえる。本研究では3名の学習者の学習状況を可視化することに焦点を当てているため、ここでは学習者間の距離を、学習者を表すノードの重心から見た相対的な角度によって表現する。すなわち、 G の値が大きい2者間ほどその角度を小さくなる

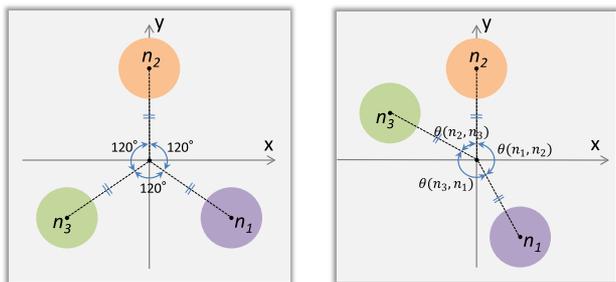


図 7 ノードの配置例

Fig. 7 Example of nodes position.

ように可視化する. ここで, 学習者 n_1, n_2, n_3 の 2 者間における角度の相対的な比率 f を G の値の逆比 ($f = 1/G$) として算出し, n_1, n_2 間の角度 $\theta(n_1, n_2)$ を式 (5) のように計算する.

$$\theta(n_1, n_2) = 2\pi \times \frac{f(n_1, n_2)}{f(n_1, n_2) + f(n_2, n_3) + f(n_3, n_1)} \quad (5)$$

n_2, n_3 間, n_3, n_1 間の角度も同様に計算できる.

算出された学習者間の角度を二次元平面上に反映させるためには基準となる座標が必要となる. 図 7 (左) にインタフェースに表示される学習者を表すノードの初期配置を示す. 初期状態では原点からみて 120 度の間隔で各ノードが配置される. 可視化を行う場合は, 学習者 n_2 を基準として定め y 軸上に固定することで, θ の値に基づき他の学習者 n_1, n_3 の相対的な座標を配置する. 図 7 (右) に, ある時点における学習者のノード配置を示す. 学習者 n_2 と n_3 が互いを観察しながら学習を進めている一方で, n_1 は相対的に相互注視をしていないという学習状況を直感的に表現できる.

6.2 学習理解態度の可視化

● ノード色の濃さ

学習課題の理解に向けた学習者の積極性を表すために, 学習者の記述動作時間, 発話者および発話者のノートへの注視時間に比例する形でノード色を濃くする. 現時点 t から s 秒前までの間に学習者 n がノートを記述している時間を $W_n(t, s)$, 発言している他者を見ている時間を $GtoU_n(t, s)$, 発言している他者のノートを見ている時間を $GtoUN_n(t, s)$ としたとき, 濃度の比率 $b_n(t, s)$ を式 (6) により算出する.

$$b_n(t, s) = \frac{W_n(t, s) + GtoU_n(t, s) + GtoUN_n(t, s)}{s} \quad (6)$$

$W_n(t, s) + GtoU_n(t, s) + GtoUN_n(t, s) \geq 1$ となる場合は, $b_n = 1$ とする. $b_n(t, s)$ を濃度の変動域を考慮して最終的な濃度の値を求める. ここでは, 濃度の最小値を $MinDens$ ($= 0.2$), 最大値を $MaxDens$ ($= 1.0$) として*2最終的な濃

*2 $MinDens$ と $MaxDens$ の値は, 見やすさを考慮して著者らが経験的に定めている.

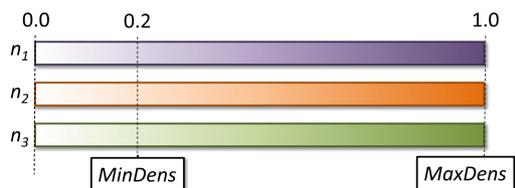


図 8 ノード色の変化

Fig. 8 Change of node density.

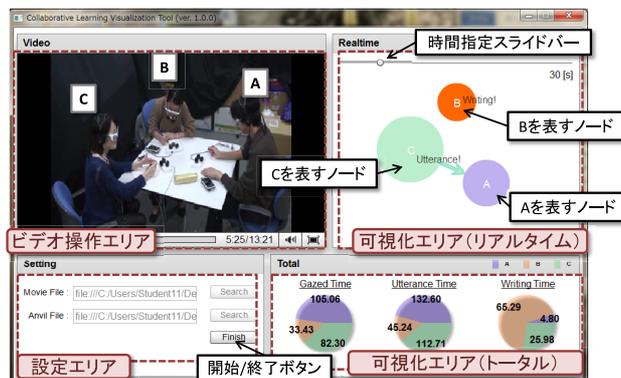


図 9 可視化システムのインタフェース

Fig. 9 Interface of visualization system.

度 $d_n(t, s)$ を式 (7) より求める.

$$d_n(t, s) = MinDens + (MaxDens - MinDens) \times b_n(t, s) \quad (7)$$

図 8 に算出された濃度値に応じたノード色の変化を示す. 表示されたノード色の濃さを見ることで, ある時点において誰が意欲的に学習に取り組んでいるかを表現する.

6.3 可視化システム

可視化手法を反映した可視化システムを構築した. 図 9 に本システムの実行画面を示す. 可視化システムのインタフェースは大きく分けて 4 つのエリアで構成されている.

設定エリアでは, 学習時の読み込み用動画ファイル (flv 形式) と非言語情報ファイル (xml 形式) を選択し, 開始ボタンを押すことでシステムを開始できる. システムが開始するとビデオ操作エリアに動画が表示される. ビデオ操作エリアでは, 動画の再生・停止という基本操作のほか, 再生時間シーケンサーを操作することで, 動画の再生位置を変更できる. 現在の再生時間と動画全体の総時間がシーケンサーの横に表示され, 音量調整ボタン, 全画面表示ボタンがある.

可視化エリア (リアルタイム) では, ビデオ上に映し出される学習者を右から A, B, C とした配置に対応するように学習者を表すノードが表示される. 学習者はそれぞれ異なる色で表現されており, 再生時間に応じてリアルタイムに可視化される. 本エリアには現在再生している時点から何秒前までのデータを考慮して可視化するかを指定する



図 10 可視化エリア (リアルタイム) の変化例
 Fig. 10 Examples of changing visualization area.

ためのスライダーが存在し、再生時に任意の値に調節することができる。また、各学習者について現在の再生時間で他者を見ていた場合、注視者から被注視者のノードに対して矢印が表示される。他者に発言をしている、ノートを記述している場合は、それぞれ「Utterance」、「Writing」という文字が行為者のノード上に表示される。

可視化エリア (トータル) では、協調学習の開始から現在再生している時点までの、各学習者の「被注視量」、「発言時間量」、および「ノート記述時間量」が円グラフで表現される。グラフの色は学習者のノードの色と対応しており、各項目にマウスオーバーすることでその割合が表示される。

このように本システムでは、動画の再生時点における動作の可視化と、再生時間から指定時間前までの協調的態度および学習理解態度の可視化、動画の始まりから再生時点の総合的な可視化を実現している。

ある時点 t における可視化エリアを図 10 (左) に示し、その 30 秒後の可視化エリアを図 10 (右) に示す。30 秒間の学習者の様子は、 B が A に解法を教わっている一方で、 C は問題を解き進めている状況であった。 A と B は教える側・教わる側の立場でそれぞれ発言をしていたため、図 10 (左) と比べて半径が大きくなっている様子が分かる。また C に対して A と B の相対的な距離が近いので、 A 、 B 間で多くのインタラクションが生じていたことが分かる。一方で、 C のノードの色が濃いため、 A 、 B が話している最中に学習理解に向けた態度をとっていたことも同時に把握できる。また、現時点では B が発言をしており、 B と C がノートを記述しているということがノード上のラベルから判断できる。

7. 評価実験

7.1 実験内容

協調的態度と学習理解態度を可視化するために用いた非言語情報の妥当性を確認するために、評価実験を実施した。本実験では、5 章のデータ収集実験で録画した動画の一部を切り出した 8 本*3 (平均 42.3 秒) を、データ収集実験に参加していない 7 名の被験者に観察させた。ここでは、

*3 音声データを手掛かりにして、誰かの疑問に対して他者が説明をしているといった対話区間を各動画から抽出した。

課題 (1) の動画を 4 本、課題 (2) の動画を 4 本それぞれ採用し、協調学習に取り組むグループが課題 (1) と課題 (2) で被らないように各動画を用意した。

実験では、可視化インタフェースの表示画面を直接見せるのではなく、学習全体の様子を撮影した動画 (図 9 のビデオ操作エリア) のみを閲覧させ、可視化項目に対するアンケートを 1 本の動画を見終わるたびに記入させた。ここでは、「(a) 協調的な態度で学習をしていたか」、「(b) 学習者間で互いに関わりながら協調学習していたか」、「(c) 積極的に学習・知識理解を進めていたか」の 3 項目について、1 (まったくしていない) ~ 4 (どちらともいえない) ~ 7 (よくしている) の 7 段階尺度を選択させた。(a)、(b)、(c) の各項目は、可視化エリアにおけるノードの半径、ノード間の角度、ノード色の濃さにそれぞれ対応している。(a) と (c) の項目は、動画に映る学習者 A 、 B 、 C それぞれに対して評価させ、(b) の項目は、学習者 A と B 、 B と C 、 C と A の各ペアに対して評点を付けさせた。

評価指標として、被験者が選択した評点とシステムが算出した値の相関を調査した。システムの値は、実験のために切り出した動画の総再生時間を可視化エリア (リアルタイム) のスライダーで調整したときの動画終了時の値を用いている。すなわち、実験用の動画に映される協調学習で生じたすべての非言語情報を用いて可視化項目の値を算出した。なお、1 回動画を見ただけでは評価することが難しかった場合は動画を再度見直すことを許可した。

7.2 実験結果

図 11、図 12、図 13 に、システムが算出したノードの半径、ノード間の角度、ノード色の濃さの値と、各グループの動画の学習者 ((b) は学習者間) に対する被験者の評価結果の平均値をプロットした散布図を示す。本可視化手法ではノード間の角度が小さい値になるほど関係が深いと仮定しているため、図 12 では評点の逆値 (被験者の評価結果の平均を 8 から引いたもの) を示している。また、表 3 に可視化システムで算出した可視化項目の値と、評価結果の平均値とのピアソンの積相関係数を示す。すべての可視化手法で、課題別、全体ともに強い相関 ($r > 0.7$) がみられ、相関係数の有意性の検定を行ったところ、すべての結果において 1% の水準で有意であることを確認した。本研究で提案した各可視化項目の値は、非言語情報の総和量という最も基本的なモデルに基づき算出している。単純なモデルではあるが、今回実験に用いた動画に対して被験者が判断した評価を高い精度で推定できていたことが明らかとなり、可視化のパラメータとして用いた非言語情報はある程度妥当であったといえる。

課題別で被験者の評定の平均とシステムの算出値で相関係数をとった結果についても、すべての項目で強い相関が示された (表 3)。特に、解のあるタイプの問題である課題

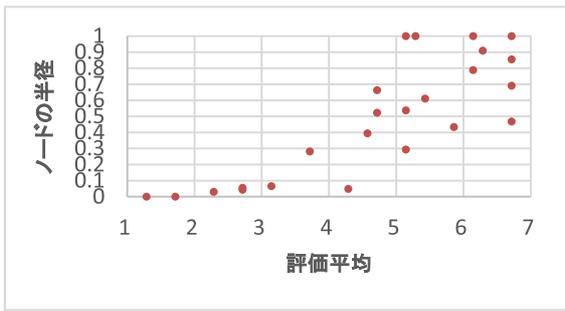


図 11 ノード半径と評価結果の分布

Fig. 11 Distribution of node radius and questionnaire.

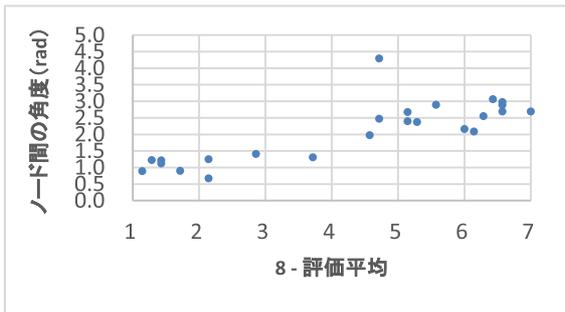


図 12 ノード間の角度と評価結果の分布

Fig. 12 Distribution of nodes' angle and questionnaire.

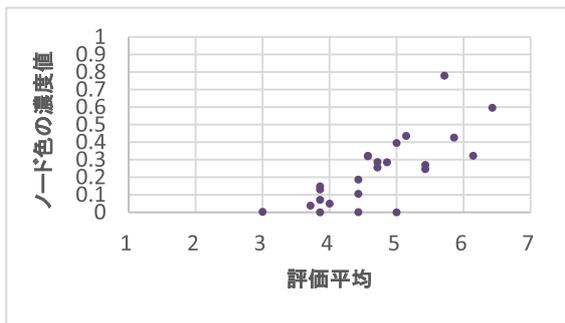


図 13 ノード色の濃さと評価結果の分布

Fig. 13 Distribution of node density and questionnaire.

表 3 可視化項目と相関係数の結果

Table 3 Correlation result of each visualization item.

No.	可視化内容	課題 (1)	課題 (2)	全体
(a)	ノードの半径	0.906	0.868	0.822
(b)	ノード間の角度	0.943	0.746	0.808
(c)	ノード色の濃さ	0.850	0.725	0.760

(1) に関して、ノードの半径とノード間の角度についてきわめて強い相関 ($r > 0.9$) が見られた。一方、学習理解面を表現するノード色の濃度に関して、議論を対象とした課題 (2) に比べて課題 (1) の方が高い値を示している。一般的に、議論タイプの課題では、解を導出するタイプと比べて記述行動が減り、発話者に視線を向けながら傾聴することにより知識を得ることが多くなると考えられる。提案したノード色の濃さの計算では、記述動作、発話者/発話者のノートへの視線注視時間を区別せず単純な総和量で推

定するものとなっているため、議論タイプの課題を可視化する際には、発話者への注視行為に重み付けをしたうえで値を算出することで、より正確に学習者の学習態度を推定できる可能性がある*4。

実験終了後、数名の被験者に実際の可視化インタフェースを観察してもらったところ、1回観察しただけでは各アンケート項目に答えることが難しかったため何度も動画を見直したが、システムでは自身が判定した評価を直感的に表示しており大変分かりやすいという意見が得られた。事実、実験時に多くの被験者は動画を何度も見なおしてから評価していた。このように、実際の協調学習に参加していない観察者が判断し難い協調的態度、学習理解態度の両側面を非言語情報に基づき推定し、直感的に表現する本可視化システムにより、協調学習を扱う研究者や教育者の分析作業や評価が容易になると考えられる。

8. おわりに

本研究では、協調学習における非言語インタラクションを可視化することを目的とした。学習者の非言語情報として、注視対象、発言区間、そしてノート記述動作を取得するための協調学習環境を構築し、非言語情報の収集実験を実施した。そして、協調学習における学習者の協調的態度の側面および学習理解態度の側面を直観的に可視化するための手法を提案し、学習状況可視化システムを構築した。評価実験の結果、協調学習の一部を切り出した動画に対する可視化項目の値と、被験者の付けた印象との間に強い相関が見られ、本研究が対象とした非言語情報によって学習者の協調的態度、学習理解態度をある程度正しく推定できたことを確認した。

今後の課題として、非言語情報の取得手法を改善していく必要がある。デジタルペンを用いた記述動作の検出や注視対象の特定精度が向上することで、協調学習の状況をモニタリングすることが可能となり、学習後の分析・評価だけでなく、システムによるリアルタイムな知的介入を実現できる可能性がある。データ収集実験を通して作成した学習時の非言語情報を含む協調学習コーパスは、学術的にも非常に価値のある資源である。今回は課題 (1)、課題 (2) の学習順番で実施しているため、課題の順序効果をふまえた分析を実現するためにも収集実験を継続して行い、コーパスを拡充していく予定である。同時に、本可視化システムを用いて、うまく参加できていない学習者がいる場合や、協調学習全体がうまく進まずに膠着しているような状況、さらには男女差や被験者同士が既知かどうかを考慮したうえで分析を進め、学習時にどのようなインタラクションが生じているのかを明らかにしていく予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤研究 (B) 25280076 の

*4 課題別の詳細な比較結果に関しては、今後順序効果を考慮した協調学習コーパスデータを収集し、評価する必要がある。

助成による。

参考文献

[1] Adelsberger, H.H., Collis, B. and Pawlowski, J.M.: *Handbook on Information Technologies for Education and Training*, Springer-Verlag (2002).

[2] 稲葉晶子, 豊田順一: CSCL の背景と研究動向, 教育システム情報学会誌, Vol.16, No.3, pp.111-120 (1999).

[3] Soller, A. and Lesgold, A.: Modeling the Process of Collaborative Learning, *The Role of Technology in CSCL*, Hoppe, U., Ogata, H. and Soller, A. (Eds.), Vol.9, Part I, pp.63-86, Springer (2007).

[4] 稲葉晶子, 大久保亮二, 池田 満, 溝口理一郎: 協調学習におけるインタラクション分析支援システム, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2617-2627 (2003).

[5] Kreijns, K., Kirschner, P.A. and Jochems, W.: Identifying the Pitfalls for Social Interaction in Computer-supported Collaborative Learning Environments: A Review of the Research, *Computers in Human Behavior*, Vol.19, No.3, pp.335-353 (2003).

[6] Peña, A. and De Antonio, A.: Nonverbal Communication to Support Collaborative Interaction in Collaborative Virtual Environments for Learning, *Proc. CEUR Workshop*, Vol.384 (2008).

[7] Brennan, S.E., Chen, X., Dickinson, C.A., Neider, M.B. and Zelinsky, G.J.: Coordinating Cognition: The Costs and Benefits of Shared Gaze During Collaborative Search, *Cognition*, Vol.106, No.3, pp.1465-1477 (2008).

[8] Kumano, S., Otsuka, K., Mikami, D., Matsuda, M. and Yamato, J.: Understanding Communicative Emotions from Collective External Observations, *Proc. CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.2201-2206 (2012).

[9] 平井佑樹, 井上智雄: ペアプログラミング学習における状態の推定—つまずき解決の成功と失敗に見られる会話の違い, 情報処理学会論文誌, Vol.53, No.1, pp.72-80 (2012).

[10] Kabashima, K., Nishida, M., Jokinen, K. and Yamamoto, S.: Multimodal Corpus of Conversations in Mother Tongue and Second Language by Same Interlocutors, *Proc. 4th Workshop on Eye Gaze in Intelligent Human Machine Interaction*, Article No.9 (2012).

[11] Carletta, J. et al.: The AMI Meeting Corpus: A Pre-announcement, *2nd International Workshop on Machine Learning for Multimodal Interaction (MLMI 2005)*, LNCS3869, pp.28-39 (2006).

[12] 角 康之, 西田豊明, 坊農真弓, 來嶋宏幸: IMADE: 会話の構造理解とコンテンツ化のための実世界インタラクション研究基盤, 情報処理, Vol.49, No.8, pp.945-949 (2008).

[13] Viegas, F.B. and Donath, J.S.: Chat Circles, *Proc. CHI'99 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.9-16 (1999).

[14] DiMicco, J.M., Hollenbach, K. and Bender, W.: Using Visualizations to Review a Group's Interaction Dynamics, *Proc. CHI'06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.706-711 (2006).

[15] 望月俊男, 藤谷 哲, 一色裕里, 中原 淳, 山内祐平, 久松慎一, 加藤 浩: 電子会議室の発言内容分析による協調学習の評価方法の提案, 日本教育工学会論文誌, Vol.28, No.1, pp.15-27 (2004).

[16] Vertegaal, R., Slagter, R., van der Veer, G. and Nijholt, A.: Eye Gaze Patterns in Conversations: There is More to Conversational Agents Than Meets the Eyes, *Proc. CHI'01 ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.301-307 (2001).

[17] Knapp, M.L. and Hall, J.A.: The Effects of Eye Behavior on Human Communication, *Nonverbal Communication in Human Interaction*, Wadsworth Publishing Company, Chap.10, pp.334-366 (2009).

[18] Tobii Glasses Eye tracker and Tobii Studio: Tobii Technology, available from <http://www.tobii.com/>.

[19] 河原達也, 李 晃伸: 連続音声認識ソフトウェア Julius, 人工知能学会誌, Vol.20, No.1, pp.41-49 (2005).

[20] airpenPocket: Pentel Inc., available from <http://www.airpen.jp/>.

[21] Kipp, M.: Anvil-A Generic Annotation Tool for Multimodal Dialogue, *Proc. Eurospeech 2001*, pp.1367-1370 (2001).



林 佑樹 (正会員)

2007年名古屋大学工学部電気電子情報工学科卒業。2012年同大学大学院情報科学研究科博士課程後期課程修了。博士(情報科学)。2009~2012年日本学術振興会特別研究員を経て、2012年4月より成蹊大学理工学部情報科学科助教。主として協調学習における対話支援やマルチモーダルインタラクションに関する研究に従事。人工知能学会、ヒューマンインタフェース学会、教育システム情報学会各会員。



小川 裕史

2013年成蹊大学理工学部情報科学科卒業。同年ネットワンシステムズ株式会社に入社。在学中は、協調学習を対象とした学習状況の分析システムに関する研究に従事。



中野 有紀子 (正会員)

1990年東京大学大学院教育学研究科修士課程了。同年日本電信電話(株)入社。2002年MIT Media Arts & Sciences 修士課程修了。同年よりJST社会技術研究開発センター専門研究員、東京農工大学大学院工学府特任准教授、成蹊大学理工学部情報科学科准教授を経て、現在、成蹊大学理工学部情報科学科教授。知的で自然なユーザインタフェースの実現に向けて、人との言語・非言語コミュニケーションが可能な会話エージェントの研究に従事。博士(情報理工学)。ACM, 人工知能学会, 電子情報通信学会各会員。