

共同作業者間の発話パターンと脳波変動の 時系列解析によるフォローの可視化

Visualization of Follows between Collaborative Workers
by Time Series Analysis on Utterance Pattern and Brain Wave

大山 勝徳[†]
Katsunori Oyama

金子 正人[†]
Masato Kaneko

武内 惇[†]
Atsushi Takeuchi

1. 序論

失敗プロジェクトの圧倒的多数が人に関する問題[1]に分類され、中でも、コミュニケーション不足は失敗プロジェクトの原因の 1 つとして潜在する。プロジェクト作業において身近に見られる事例は、共同作業者による作業の進め方の誤りや異常の発見時におけるコミュニケーション（意思疎通）の量の極端な低下等である。誤りや異常の発見時には共同作業者に緊張感または疲労感が生じ、コミュニケーションの量に変化が現れる場合がある。誤りや異常を発見した時の共同作業者間の意思疎通は失敗回避のため重要となるにも関わらず、プロジェクトの責任者もしくは作業パートナーにその都度状況変化を気付かせることは難しい。

コミュニケーションの量の変化は、目視で測れない現象であり因果関係分析に工夫を要する。コミュニケーション支援の分野では支援手法やツール技術に多くの発展の余地がある。会話文脈の型を同定する言語解析のアプローチに解釈の多様性の課題が残る一方で、発話の韻律変化やタイミングを解析し、親しきや会話の盛り上がり方を推測するアプローチ[2]も提案されている。最近の数年間、携帯端末の進化に伴って軽量でコンパクトな Bluetooth 接続のヘッドセットが普及し始め、外出時の音声入力デバイスとして利用される機会が益々増えている。装着に負担のかからないヘッドセットや携帯端末を用いることにより、共同作業支援の可能性は益々広がることが期待できる。

本研究は、共同作業者間のコミュニケーションの量の変化とその時の脳波変動[3]に着目し、共同作業支援のためのフォローウェアネスの提案を目的とする。そこで、製品開発プロジェクトやグループ協調学習の身近な事例を用いて、単位時間あたりの共同作業者間の相互作用（会話中のフォロー）と α 波と β 波の脳波変動について時系列解析を行う。本稿の事例では、共同作業者間のフォローの量を評価し、作業進捗の状況との因果関係を見出すことにより共同作業支援の可能性と今後の課題を考察する。

以下、本稿の構成について説明する。最初に、2 章でフォローの概念とそのモデルについて紹介し、3 章で共同作業者の発話パターンと脳波変動の測定のアプローチについて述べる。4 章ではグループ協調学習における討議の事例を用いてフォローの量を評価し、作業進捗の状況と比較する。5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. フォローウェアネス

対面や遠隔等の共同作業の形態に関わらず、プロジェクト内コミュニケーションは多かれ少なかれ共通目標を達成するための役割分担や問題解決を遂行する過程で必要とされる。共同作業者間の発言のやりとりの過程で何らかの目的によって、発言は文書化され、共有される。本研究は、共同作業者間の発言とその応答の頻度に基づいて推測される意思疎通に関する指標をフォローと呼ぶ。

本研究のフォローウェアネスは、共同作業者間の発言と応答のタイミングに加え、脳波変動の量からフォローをモデル化する。フォローウェアネスは、共同作業者にとって重要な状況を分類し、プロジェクトの責任者もしくは作業パートナーへ意思疎通の重要な状況を気付かせることから、状況認識[4][5]の技術とも呼ばれる。

以下、共同作業支援を目的とするフォローのモデルとその評価手法を提案する。

2.1 状況認識

「状況」は、1980 年頃から J. Barwise や K. Devlin により状況理論[6]として科学的に研究され始め、1990 年代から遠隔地の軍事行動や病院の介護対象者に対する支援等を目的として状況認識（シチュエーションウェアネス）[4]の研究として議論が交わされてきた。状況の定義そのものはそれらの研究によって進化し、論理的手法と統計的手法の様々なアプローチ[7]が試されてきたが、研究の目的によっては異なる部分もある。情報科学において、状況は主にコンピュータ利用者の身の回りにある機器から取得できる時系列データの解釈である[8]。コンピュータ利用者の状況は、ある時点における行動コンテキストと環境コンテキストの組み合わせで識別される。行動コンテキストはユーザインタフェースを操作する行動の時系列であるのに対し、環境コンテキストは行動コンテキストに伴うコンピュータ利用者の位置や身体状態の変化の時系列に相当する。

本研究は、ヘッドセットで得られるノイズのあるセンサーデータ（発話のタイミングと脳波変動）から時系列解析によりフォローを測定する。PC の操作による作業進捗を行動コンテキストとし、フォローの量的変化の時系列について観測を行い、共同作業者の状況の評価する。図 1 の例は、発話のタイミングと PC の操作による作業進捗の報告（進捗報告）をプロットすることにより、2 人の共同作業時の状況変化を抽象化したものである。進捗報告に関わる状況に注目した場合、共同作業者間の発言、その発言に対する応答の頻度、脳波変動の量が主な解析対象となる。

[†] 日本大学 工学部 情報工学科

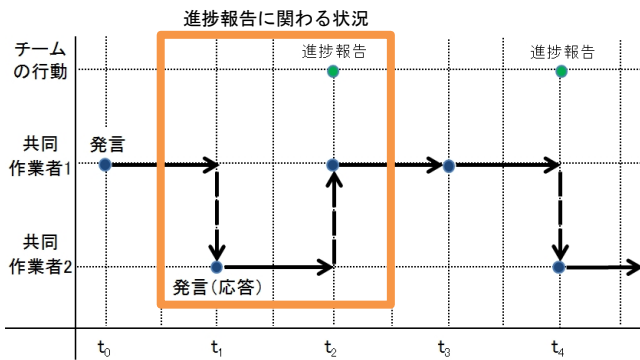


図 1 共同作業時の状況変化

2.2 フォローのモデル

フォローの動作内容は、作業パートナーの発言に対し相づちを打って同意を示す場合もあれば、反対意見を述べて作業内容に修正を与える場合もあり、様々である。フォローの動作によって何らかの問題が解決し、快の情動が感じられる場合もあれば、作業中の失敗によって緊張感やストレスが発生することもある。ペアプログラミング学習の実験事例[9]では、何らかの問題により作業の途中で失敗がある場合、説明を繰り返す回数が多くなり、一方的に発話する回数は増加する傾向にあることが報告されている。以上のことから、共同作業間でのフォローには応答頻度や快と不快の情動で大別して2つの特徴が考えられる。

正のフォロー (Positive Follow) : 作業パートナーに対し同意を示している場合が多く、会話が弾んでいる時の応答である。単位時間あたりの応答数が多く、快の情動を伴う時、正のフォローが見られる。本研究では、正のフォローが見られる時、問題解決に成功して次の作業を進める傾向があると仮定する。

負のフォロー (Negative Follow) : 作業パートナーに対し意見の対立が見られ、緊張感やストレスを伴う時の応答である。作業内容の修正をする時に見られる。作業パートナーの発言に対し、単位時間あたりの応答数が極端に変動する。本研究では、負のフォローが見られる時、作業上の失敗があり、作業が遅延しやすいと仮定する。

快や不快の心的負荷に関する情動は、 α 波と β 波の周波数帯域の脳波に影響する。このことについて、いくつかの実験 (ソフトウェアのユーザビリティ比較[10]、学習者の音読による脳波律動の評価[11]、車運転時の心的疲労の評価[12]) で報告されている。主に、 α 波、 β 波、 θ 波の組み合わせで脳波の状態は表される。特に、心的負荷によって α/β は下降し、反対に、作業を終えて体のリラックスと共に快を感じる時に α/β は上昇することが共通して報告されている。一方で、脳波測定機器の電極を装着する位置や脳の構造的特性によって α/β は異なり、個人差があることに課題がある。そのため、本研究の測定アプローチは、一定時間のサンプリングデータから個人差に併せて個々の閾値を設定する。さらに、一定閾値以上の正方向の変動量 ($\Delta\alpha/\Delta\beta$) を「閃き」の脳波変動と呼び、脳波変動の回数を計測する。

本研究は、単位時間あたりの作業パートナーに対する応答数と閃きの脳波変動数の合成量をフォロー u_{ij} とし、全ての共同作業間でのフォローを相加平均した量をチーム協調度 U として評価する。すなわち、フォロー u_{ij} とチーム協調度 U について共同作業者の状況を分析する。

(1) フォローの量

フォロー u_{ij} は、観測した単位時間内の作業パートナー j の発言数 y に対する作業者 i の応答数 x と閃きの脳波変動数 w を用いて算出する量である。

$$u_{ij} = x \log(1 + w) - c(y - x)$$

右辺の第 1 項は作業者 i の応答の積極度 (脳波変動に基づく勢いの強さ) に関する量であるのに対し、第 2 項は作業パートナー j の発言後に作業者 i の応答が続かなかった頻度を意味する。図 1 のように、作業者 i の応答は、作業パートナー j の発言直後になされた発言である。単位時間内では常に $x \leq y$ となる。単位時間は観測スケールによって秒単位の場合もあれば 1 時間の場合もありうる。 c は u_{ij} が 0 となる基準の調節に用いる係数である。

正の実数をとるフォローは、作業者 i の応答数 x と閃きの脳波変動数 w が多い時 (意思疎通がとれる状態となり、会話が弾んでいる時) に得られる。また反対に、負の実数をとるフォローは、 y に対して x の割合が低い時、または、脳波変動数 w が少ない時 (緊張感やストレスが見られる時) に得られる。

(2) チーム協調度

フォロー u_{ij} は作業者 i から作業パートナー j に対する単方向のフォローを表す。以下の式により、 i と j の双方向のフォローを併せ、共同作業間でのフォローの相加平均から U を求める。

$$U = \left\{ \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (u_{ij} + u_{ji}) \mid i \neq j, n \geq 2 \right\}$$

特に、共同作業者が 2 人 ($n=2$) の場合、チーム協調度は以下のように双方向のフォローを平均する形となる。

$$U = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji})$$

この場合、2 人の発言数 y と応答数 x の比が 1:1 に近づき、2 人の共同作業者の脳波変動数 w も併せて上昇することによって U の値は上昇する。一方、 U の値が低い場合、共同作業間でのフォローは全体として少ないことを意味する。

2.3 チーム協調度の分類

チーム協調度は、作業の成果物の量に基づくものではなく、共同作業間での相互作用の量によって得られる点で、プロジェクトの作業進捗とは大きく異なる。作業進捗と比べると、チーム協調度は間接的な諸要因の影響を受け、変化する頻度が高い。

一方で、チーム協調度は作業進捗と同様にプロジェクトの責任者が把握すべきチームの状況を表す指標である。チーム協調度の上昇傾向が理想的な状況変化であるのに対し、急激な下降には危険な状況も含まれる。チーム協調度は、プロジェクト管理の視点から、 U の値によって以下のレベルに分類することができる。

(1) $U \leq -1$ の場合

発言の頻度が共同作業間で不均一である場合、または、閃きの脳波変動が見られない場合に U は負となりうる。この時の共同作業間での関係は、全ての共同作業者の発言について意見の交換が伴わない状況、または、作業個人による思考が続く状況である。

(2) $|U| < 1$ の場合

意見を共同作業間で交換し、討議内容を自分なりに把握しており、他メンバーの発言を聞いて会話に参加している状態、すなわち、他メンバーの意見から自己意見を見直すことができる状態である。自己意見についても模索し、他者の意見を聞いている状況である。

(3) $U \geq 1$ の場合

共同作業間で共有する課題について、発言が多い状況である。発言の頻度は共同作業間で均一に近くなる。この状況では、共同作業間で積極的な意見のやりとりがある。 U の値が高いほど、賛成または反対意見について相手を共感させる状況であり、共同作業全員で討議についていける状況である。

3. フォローの測定実験

本実験は、情報処理技術試験を題材としてグループ協同学習を行う共同作業（被験者）2名のフォローを測定し、作業進捗に対するフォローの変化の評価を目的とする。

図2の測定環境ではコーチ（左）の指示に続いて共同作業（右）が学習を進める。最初にコーチは、被験者のヘッドセット装着の注意点と問題の解答方法に関するガイダンスを行う。その後コーチは共同作業には参加しない。2名の共同作業者は、PC 端末上に表示した情報処理技術者試験の問題を解いた後、解説を参照する。指定のヘッドセットを装着し、PC を用いて問題解答を進める点を除き、本実験で共同作業者は自由に作業を進めることができる。



図2 測定環境

3.1 測定機器の構成

発話パターンと脳波変動の同時計測は、測定機器の方式、重量、形状の考慮を要する。本実験では以下の組み合わせで測定機器を用いて実験を進めた。

(1) 骨伝導方式ヘッドセット

Motorola 社の Finiti は、耳にかけるコンパクトな骨伝導方式ヘッドセットであり、発話を録音する時に周囲の雑音を防ぐ機能がある。骨伝導方式ヘッドセットの音声データ解析は PC 端末側で行い、各発言を息継ぎのタイミング（本稿では 1 秒間以上の無音区間）で区切ることで 1 つの発言とする。

(2) 脳波測定用 EEG センサ

Neurosky 社の BrainAthlete はヘッドバンドの電極を左右の前頭極部と基準電極を耳へ付ける EEG センサである。開発者用ウェブサイトには公開されている ThinkGear API は、ノイズフィルタリング処理後のログデータを PC に保存する機能を有する。

(3) PC 端末

作業進捗の履歴（問題の解答結果）は、PC 端末上のボタン入力により簡易記録される。この履歴は、発話パターンと脳波変動のログデータと併せて PC 端末上の CSV 形式ファイルとして蓄積する。

3.2 フォローアウェアネス解析

フォローの量を可視化する過程は、以下のように発話パターン解析、脳波解析、フォロー計算の順に分かれる。

(1) 発話パターン解析

本実験において発話パターン解析は、Wav 形式データから各発言を区切った後、共同作業間の発言数と応答数を抽出する手順である。最初に、 n 区間の時間における作業パートナー j の発言数 y をカウントする。その後、作業 i の応答数 x をカウントする。全ての作業者について計算する。

(2) 脳波解析

脳波解析は、閃きの脳波変動の閾値 H_i を決定した後、作業 i の閃きの脳波変動数 w を求める手順である。

(a) 閾値の決定

作業 i の閾値 H_i は正方向の脳波変動 h_t ($t \geq 1$) について n 区間の移動平均により求める。

$$H_i = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n h_t \mid n \geq 1, h_t \geq 0 \right\}$$

但し、 $\alpha_t/\beta_t \geq \alpha_{t-1}/\beta_{t-1}$ （正方向の脳波変動）の場合

$$h_t = \{\alpha_t/\beta_t - \alpha_{t-1}/\beta_{t-1} \mid t \geq 1, \alpha_t > 0, \beta_t > 0\}$$

それ以外の場合 $h_t = 0$ とする。

n は経験的に 60 以上で標準誤差 $\pm 10\%$ 以内であることが多い。本実験は 1 秒を単位時間とし、 $n = 300$ （5 分間のサンプルデータ）の移動平均を求める。

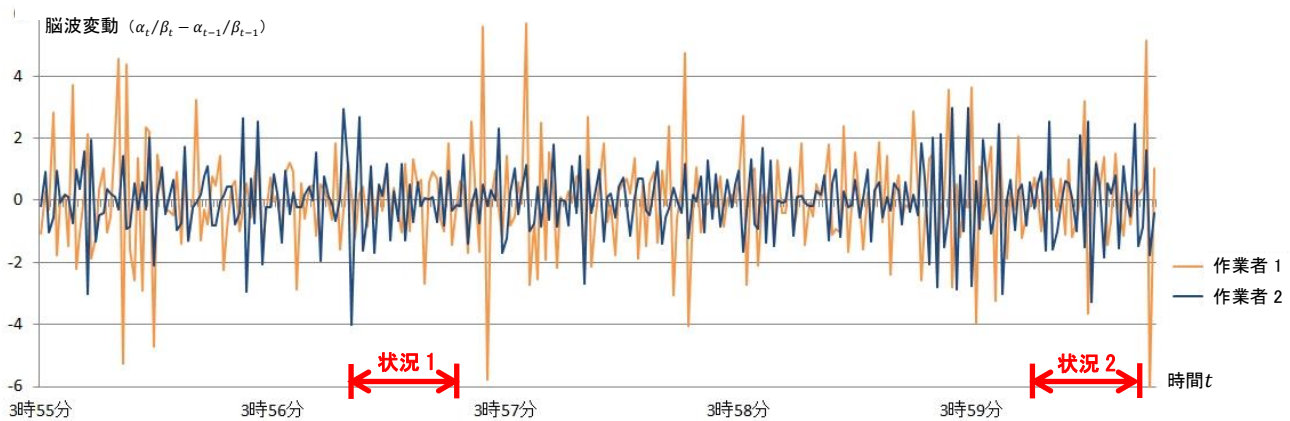


図 3 問題の解答を行う共同作業員 2 名の脳波変動

(b) 脳波変動数のカウント

閃きの脳波変動数 w は、 $h_t > H_i$ となる脳波変動（閾値を超える区間）の数をカウントすることにより求める。

(3) フォロー計算

最後は、フォローの量 u_{ij} とチーム協調度 U を求める手順である。(1)と(2)で得られたパラメータを基にフォローの量 u_{ij} を求めた後に、フォローの量 u_{ij} の相加平均によりチーム協調度 U を算出する。

3.3 実験結果の比較

図 3 は、1 つの問題を PC 上で読み取って解答を選択するまでの時間（午後 3 時 55 分から午後 4 時）における共同作業員 2 名の脳波変動を表す。前半の脳波変動の波形に両者の隔たりが見られるのに対し、後半の 2 分間には脳波変動の波形同士に重なりが比較的多い。この問題では午後 3 時 59 分の時点で解答が判明し、その 1 分後にその解答が選択されている。

さらに、図 3 の前半と後半の状況には特徴がある。問題を読み取り終えた時点（状況 1）は閃きの脳波変動と応答

の比較的小さい箇所となった。反対に、解答が判明した時点（状況 2）には脳波変動と応答が多い箇所がある。2 つの状況間において、フォローの量に特徴差が見られる。

本実験は、5 分間の計測結果から、 H_1 （作業員 1 の脳波変動の閾値）を 0.63、 H_2 （作業員 2 の脳波変動の閾値）を 0.42 とする。 $n = 30, c = 2$ としてフォロー計算を行う。

状況 1：図 4 は、状況 1 の詳細なログデータを表す。このログデータから次のパラメータが得られる。

(1) 作業員 1 のフォロー計算

脳波変動数： $w = 9$ ，応答数： $x = 2$ ($y = 2$)

フォロー： $u_{12} = 2 \log(1 + 9) - 2(2 - 2) = 4.60$

(2) 作業員 2 のフォロー計算

脳波変動数： $w = 10$ ，応答数： $x = 2$ ($y = 5$)

フォロー： $u_{21} = 2 \log(1 + 10) - 2(5 - 2) = -2.80$

従って、状況 1 におけるチーム協調度は以下となる。

$$U = \frac{1}{2}(4.60 - 2.80) = 0.90$$

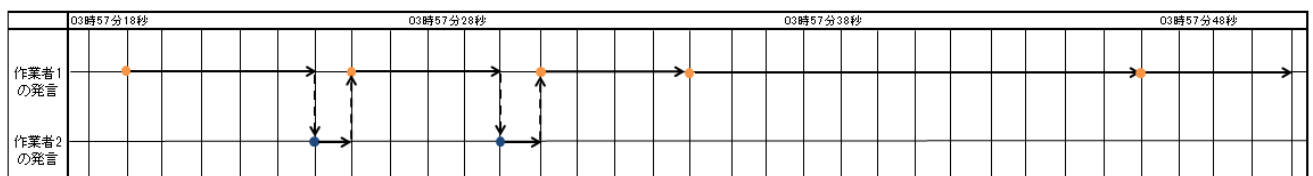
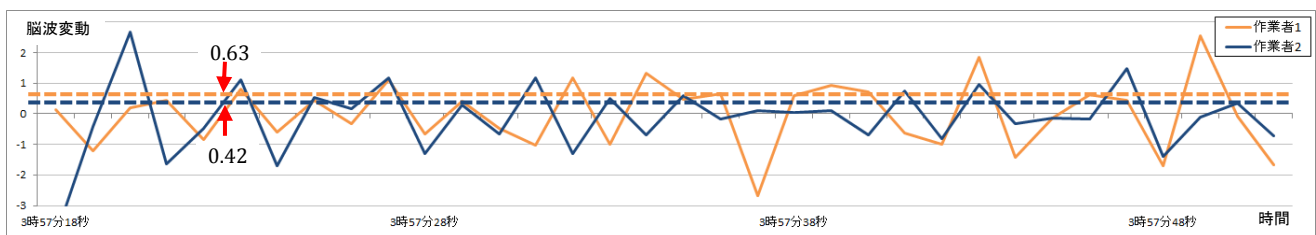


図 4 状況 1 の脳波変動と発話パターン

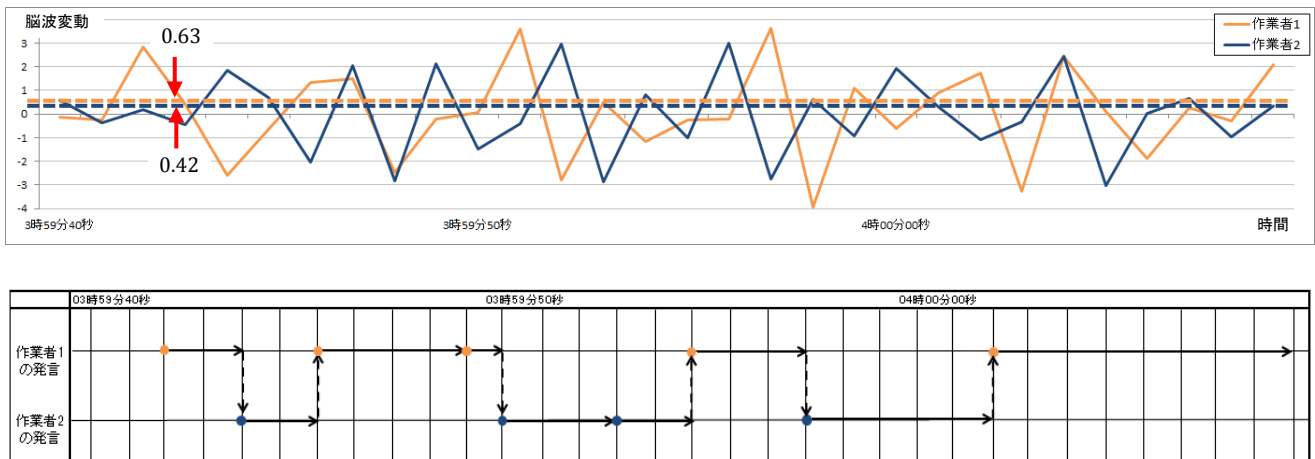


図 5 状況 2 の脳波変動と発話パターン

状況 2: 状況 1 と同様、図 5 は状況 2 の詳細なログデータを表す。ログデータから以下のパラメータが得られる。

(1) 作業 1 のフォロー計算

脳波変動数： $w = 10$ ，応答数： $x = 3$ ($y = 4$)

フォロー： $u_{12} = 3 \log(1 + 10) - 2(4 - 3) = 5.19$

(2) 作業 2 のフォロー計算

脳波変動数： $w = 12$ ，応答数： $x = 3$ ($y = 5$)

フォロー： $u_{21} = 3 \log(1 + 12) - 2(5 - 3) = 3.69$

従って、状況 2 におけるチーム協調度は以下となる。

$$U = \frac{1}{2}(5.19 + 3.69) = 4.44$$

以上のことから、状況 2 におけるチーム協調度は、状況 1 の場合より高い結果となった。状況 1 が問題の解釈の段階にある時点のため応答が少なく、思考中であるのに対し、状況 2 は問題の解決が終わり、解答を選択した段階の作業進捗にあることから応答の頻度が比較的高いと考えられる。

正のフォローは状況 2 の共同作業間の双方で見られた。この時点の共同作業者は、単位時間あたりの応答数が多く、作業パートナーに同意し、解答を選択した。反対に、負のフォローは状況 1 に 1 つ見られた。この時点において、作業 1 の発言に対する作業 2 の応答数は比較的低かった。

3.4 考察

本実験は、グループ協調学習の事例を用いて、共同作業 2 名についてフォローの比較を行った。解析対象の区間を 30 秒間としたが、より長い区間 (1 時間以上) の状況についても同様に計算は可能と考えられる。本実験における脳波の計測結果は、単位時間の変動量を求め、作業 1 個々の閾値を算出することにより、個人差の影響を抑えている。但し、共同作業者の人数が 3 名以上の場合、解析に必要な計算数は $O(n^2)$ で増える。実験条件が複雑化する場合、自動計算が可能な携帯端末による常時計測は必要となる。

本研究は、設計熟練者の有する「設計上の知恵」の継承法 [13] の一環として、知恵の伝達結果を定量的に判定する

手法の開発を目的としてきた。従来、知恵の伝達結果は設計図の再現やインタビューによってのみしか確認することができなかった。本稿のフォローウェアネスは、今後、設計熟練者と継承者の共同作業中のコンテキストから知識伝達の度合い (継承度) を判定することにも有用となる可能性がある。

フォローの概念は、これまで Twitter の用語として広く認知されてきた。この概念はインターネット上の指定した特定のユーザから全てのメッセージを受け取るという単方向の関係である [14]。インターネット上のリンクとして実装されるので、ブラウザ上のボタンを押すだけでこの関係は確立し、自動的かつ実時間に発信したメッセージをユーザに送り続ける。但し、実際にメッセージが読まれているかどうか未知数であるので、フォローしているか判定することはできない。本研究のフォローは、インターネット上のコミュニケーションに限らず、遠隔と対面の両方の会話を含めた定義の 1 つとして捉えることができる。

4. 結論

本稿は、共同作業間のチーム協調度を可視化するために、脳波と発話パターンを用いるフォローウェアネスを提案し、フォローの量と共同作業者の作業進捗の因果関係を評価する方法について述べた。実験では、グループ協調学習の事例を用いて、問題の読み取りから解答を選択するまでの状況変化を観測した。その結果、問題の解答を選択できるようになった時点の状況で、共同作業間の正のフォローが多く見られた。この点において本稿は、共同作業間のフォローの量を可視化し、チームの状況変化を評価した最初の研究である。

今後の課題として、より複雑化した実験環境における計測、ヘッドセットの小型化が考えられる。実験結果のフィードバックに基づいて改良することにより、実時間で共同作業間の相互作用の量をコンピュータ機器に表示させる共同作業支援ツールと発展した利用例を提示したい。

参考文献

- [1] Tom Demarco and Timothy Lister. *Peopleware. Productive Projects and Teams (Second Edition)*, Dorset House Publishing Company, Incorporated, 1999.
- [2] 西村良太, 北岡教英, 中川聖一. 音声対話における韻律変化をもたらす要因分析. *日本音声学会 音声研究*, 13(3):66-84, 2009.
- [3] 大谷将, 大山勝徳, 金子正人, 武内惇, 藪田孝造. 脳波と発話パターンを用いたチームシチュエーションウェアネスの提案. *ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 2012-HCI-147(7)*, pp.1-8, 2012.
- [4] Mica R. Endsley. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), pp.32-64, 1995.
- [5] Mica R. Endsley. *Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review*, Lawrence Erlbaum Associates, pp.1-24, 2000.
- [6] Jon Barwise and John Perry. *The Situation Underground*. Stanford Working Papers in Semantics, Vol.1, pp.1-55, 1980.
- [7] Juan Ye, Simon Dobson, and Susan McKeever. Situation identification techniques in pervasive computing: A review. *Pervasive and Mobile Computing*, 8(1):36-66, 2012.
- [8] Carl K. Chang, Hsin-yi Jiang, Hua Ming, and Katsunori Oyama. Situ: A Situation-Theoretic Approach to Context-Aware Service Evolution. *IEEE Transactions on Services Computing*, 2(3), pp.261-275, 2009.
- [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 — つまづきの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*, 53(1): 72-80, 2012.
- [10] 上野秀剛, 石田響子, 松田侑子, 福嶋祥太, 中道上, 大平雅雄, 松本健一, 岡田保紀. 脳波を利用したソフトウェアユーザビリティの評価 - 異なるバージョン間における周波数成分の比較. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, 10(2):233-242, 2008.
- [11] 平田恵啓. 心的負荷が脳波律動に及ぼす影響. *北海学園大学大学院工学研究科紀要工学研究*, 第 10 号, pp.33-37, 2010.
- [12] Yunyong Punsawad, Sittichai Aempedchr, Yodchanan Wongsawat, and Manukid Panichkun. Weighted-Frequency Index for EEG-Based Mental Fatigue Alarm System. *International Journal of Applied Biomedical Engineering*, 4(1):36-41, 2011.
- [13] 大山勝徳, 武内惇, 藤本洋. CAPIS モデルと品質実現オントロジを用いるクラス抽出思考過程の獲得・伝達法. *情報処理学会論文誌*, 48(8):2846-2858, 2007.
- [14] Haewoon Kwak, Changyun Lee, Hosung Park, and Sue Moon. What is Twitter, a social network or a news media?. In *Proceedings of the 19th international conference on World Wide Web (WWW '10)*, pp.591-600, 2010.