

共同作業におけるコミュニケーションプロセス評価のための効率性指標推定手法の提案

—脳血流による因果性ネットワーク構築における

グレンジャー因果と移動エントロピーの比較—

Proposed Method for Estimating Efficiency Indicators in the Evaluation of Communication Processes in Collaborative Work: A Comparison of Granger Causality and Transfer Entropy in Constructing Causality Networks from Cerebral Blood Flow

鈴木 優人[†]
Yuto Suzuki

栗原 陽介[†]
Yosuke Kurihara

1. はじめに

作業指示者と作業者が共同で作業を行う際には、指示の伝達や相槌などのコミュニケーションが非常に重要な役割を果たす。共同作業における効率性とコミュニケーションプロセスを評価するために、これまで筆者らは、2 者の満足度や作業中に発生するミスの回数などを基に指標を設定し、それをもって共同作業の効率性を測定してきた。さらに、これらの指標を客観的に推定する手段として、作業指示者と作業者の脳血流量の因果性ネットワークを構築することで、効率性を評価する手法を提案した[1]。

本論では、因果性ネットワーク構築のための脳血流量の時系列データにおける因果性を求める方法として、グレンジャー因果と移動エントロピーという 2 つの異なる手法を用いる。それぞれの手法の推定精度を比較し、両手法の特性と有効性を検討することで、共同作業におけるコミュニケーションプロセス評価のための効率性指標推定において、どちらの因果性ネットワークがより効果的か評価する。

2. 提案手法

本提案手法では作業指示者 I と作業者 W がペアで行う作業を対象とし、その効率性指標を I と W の脳血流量から推定する。作業遂行中に、 I が W に作業指示を伝えると、作業指示による刺激が W の脳に伝わる。反対に W から I のフィードバックによる刺激も I に伝わる。ここで作業遂行時の I 、 W の前頭葉において、それぞれ任意の 2 か所における脳血流量を NIRS で計測した信号を $I_i(k)$ ($i=1, 2$)、 $W_j(k)$ ($j=1, 2$) とする。 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ にたいし、グレンジャー因果、移動エントロピーを用いて、コミュニケーションプロセスにおける影響の因果性をネットワークとして表す。

2.1 因果性ネットワーク

$I_i(k)$ から $W_j(k)$ への影響の因果性および $W_j(k)$ から $I_i(k)$ への影響の因果性を考慮し作成した因果性ネットワークを $N_{I \leftrightarrow W}$ とする。 $N_{I \leftrightarrow W}$ は、 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ の計測部位がノードとなり、因果関係をエッジで表す有向グラフで表現される。各エッジは値を持ち、各ノードが出力するエッジの値の総和をそのノードの特徴量とする。したがって、 $N_{I \leftrightarrow W}$ において、 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ が互いに因果性エッジを持つため、

$I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ の全ノード 4 か所間の 8 つのエッジに値を持ち、それぞれを H_{i,w_j} 、 $H_{w_j,i}$ とする。 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ の全 4 か所のノードは、それぞれ $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ の各ノードが出力するエッジの値の総和を特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} として持つ。以下の(1)、(2)式に特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} を示す。

$$F_{I_i} = \sum_{j=1}^2 H_{i,w_j} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

$$F_{W_j} = \sum_{i=1}^2 H_{w_j,i} \quad (j=1, 2) \quad (2)$$

(1)、(2)式において特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} はノード間の因果の強さを表す H_{i,w_j} 、 $H_{w_j,i}$ の総和で求まるため、値が大きいかほどそのノードは他のノードへ与える影響が強いと判断される。

本提案手法では、各ノードにおける特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} を説明変数、共同作業における効率性指標を目的変数としガウス過程回帰を適用することで、効率性指標を推定する。

2.2 因果性の算出手法の違いによる特徴量の算出

本論では、 $N_{I \leftrightarrow W}$ における H_{i,w_j} 、 $H_{w_j,i}$ をグレンジャー因果から算出した場合と移動エントロピーから算出した場合で、効率性指標の推定精度を比較する。

2.2.1 グレンジャー因果による特徴量の算出

グレンジャー因果を用いた推定では、各エッジの値 H_{i,w_j} 、 $H_{w_j,i}$ として、各ノード間の脳血流信号 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ のグレンジャー因果性の判定のための検定統計量を用いる。そのため、各ノードが出力するエッジの検定統計量の総和をそのノードの特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} とする。 $I_i(k)$ 、 $W_j(k)$ における自己回帰モデルの次数を $GCorder_I$ 、 $GCorder_W$ とする。

2.2.2 移動エントロピーによる特徴量の算出

移動エントロピーを用いた推定では、各エッジの値 H_{i,w_j} 、 $H_{w_j,i}$ として、各ノード間の移動エントロピーの値が付与される。そのため、各ノードが出力するエッジの移動エントロピーの総和をそのノードの特徴量 F_{I_i} 、 F_{W_j} とする。

移動エントロピーにおける影響の因果性を評価する任意の 2 つの脳血流信号において、影響を与える脳血流信号および影響を受ける脳血流信号のどれだけの範囲のデータを用いるのかを表す次数を $TEorder_I$ 、 $TEorder_W$ とし、それぞれの脳血流信号の遅れ時間を $delay_I$ 、 $delay_W$ とする。また、量子化数を $level_I$ 、 $level_W$ とする。

3. 検証実験

本実験では、作業指示者から作業者への道案内課題を検証用の課題として、効率性指標を推定する。道案内課題では 2 人 1 組のペアを構成し、1 人を作業指示者 I 、もう 1 人を作業者 W の役割を担う。本実験における I からの作業指

[†] 青山学院大学理工学研究科理工学専攻マネジメントテクノロジーコース Aoyama Gakuin University Graduate School of Science and Engineering Department of Science and Engineering Management Technology Course

示として、 I はゴールまでの経路を口頭で W へ指示する。 W はその指示に従い、地図上のゴールまでの経路をマーカーで描く作業を行う。ゴールに到着後、効率性指標を評価するために主観評価 2 項目と客観評価 2 項目の全 4 つの評価項目に点数をつける。このうち、主観評価項目の 2 つは作業指示者の自己評価 S_I 、および作業者の自己評価 S_W として 5 点満点で評価する。客観評価項目の 2 つは、指示を聞き直した回数 S_R 、経路ミス回数 S_E として 6 点満点で評価する。これらの評価に基づき、効率性指標の得点 S を以下の(3)式で 100 点満点に換算する。

$$S = \frac{S_I S_W S_R S_E}{900} \times 100 \quad (3)$$

脳血流量の計測として、作業中に株式会社 NeU 製の NIRS(携帯型脳活動計測装置)を用いて、サンプリング周波数 10Hz で前頭葉における 2 か所を計測する。被験者は、20 代の男女 12 名を対象に、2 人 1 組のペアを構成する。1 人が複数のペアに属する場合も含め、合計 30 パターンの組み合わせを作成し、全 30 データセットを取得する。本実験は青山学院大学倫理審査委員会による倫理審査(承認番号 H23-005)の承認を受けて行った。

取得したデータセットを基に、グレンジャー因果と移動エントロピーにおける因果性ネットワーク $N_{I \leftrightarrow W}$ を作成し、それぞれガウス過程回帰により効率性指標を推定する。推定精度は 1 つ抜き交差検証を用いて真値と推定値の相関係数、二乗平均平方誤差(RMSE)および平均絶対誤差(MAE)を算出し比較する。グレンジャー因果の次数 $GCorder_I$ 、 $GCorder_W$ 、移動エントロピーの次数 $TEorder_I$ 、 $TEorder_W$ 、移動エントロピーにおける脳血流量信号の遅れ時間 $delay_I$ 、 $delay_W$ はそれぞれ 1-50 の範囲で、移動エントロピーの量子化数 $level_I$ 、 $level_W$ は 2-10 の範囲で遺伝的アルゴリズムを用い、世代数 500、個体数 50 で相関係数が最大となるように決定する。

4. 実験結果および考察

図 1 にグレンジャー因果を用いた場合と移動エントロピーを用いた場合の絶対誤差の箱ひげ図を示す。

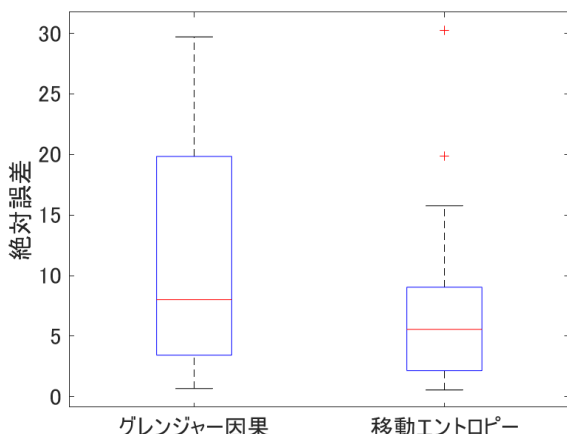


図 1 グレンジャー因果と移動エントロピーにおける絶対誤差の比較

図 1 から、移動エントロピーにおける絶対誤差がグレンジャー因果における絶対誤差に比べ小さいことがわかる。

また、グレンジャー因果を用いた場合の相関係数が 0.851、RMSE が 14.572、MAE が 11.169 となり、移動エントロピーを用いた場合の相関係数が 0.933、RMSE が 9.404、MAE が 6.831 となり、2 つの手法を比較すると、移動エントロピーを用いた因果性ネットワークにおける脳活動を考慮した方の推定精度が高かった。

グレンジャー因果における次数 $GCorder_I$ 、 $GCorder_W$ は $GCorder_I=29$ 、 $GCorder_W=27$ となった。この結果は、作業指示者は 2.9 秒前からの脳血流量、作業者は 2.7 秒前からの脳血流量を考慮することを示す。移動エントロピーにおける次数 $TEorder_I$ 、 $TEorder_W$ は $TEorder_I=4$ 、 $TEorder_W=17$ となった。この結果は、作業指示者は 0.4 秒前からの脳血流量、作業者は 1.7 秒前からの脳血流量を考慮することを示す。これらの結果から、作業指示者と作業者は、互いに時系列の範囲が近い脳血流量データにおいて 2 者間の脳活動に影響を与えていると考えられる。

移動エントロピーにおける脳血流量信号の遅れ時間 $delay_I$ 、 $delay_W$ は $delay_I=19$ 、 $delay_W=48$ となった。この結果は、作業指示者は 1.9 秒、作業者は 4.8 秒の遅れ時間を考慮することを示す。本論では、グレンジャー因果では遅れ時間を考慮していないが、移動エントロピーでは遅れ時間を考慮した。この結果から、移動エントロピーでは時系列データにおける情報伝達の遅れ時間による脳活動の影響を考慮でき、遅れ時間を考慮したネットワークが構築できた。その結果、遅れ時間を考慮していないグレンジャー因果よりも高い推定精度につながったと考えられる。さらに、移動エントロピーは非線形性も考慮できることや、データの情報の流れを利用して計算されるため、データのノイズによる影響を受けにくいと考えられる。対して、自己回帰モデルを用いるグレンジャー因果はデータのノイズの影響を直接受けると考えられる。そのため、移動エントロピーは適用範囲が広く、より高い推定精度が得られたと考えられる。移動エントロピーにおける量子化数 $level_I$ 、 $level_W$ は 6 となった。この結果から、6 段階にすることで脳血流量の変化を適切に量子化できたと考えられる。

これらの結果から、因果性ネットワーク構築において、グレンジャー因果に比べ移動エントロピーの方が、2 者の詳細な脳活動の影響を考慮できると考えられた。

5. おわりに

本論では、作業指示者、作業者間の作業遂行時における脳血流量にたいしグレンジャー因果および移動エントロピーの因果性ネットワークを構築し、効率性指標の推定精度を比較することで、コミュニケーションプロセスと異なる因果性ネットワークについての評価、比較を行った。道案内課題を作業課題とした検証実験の結果、移動エントロピーの推定精度がグレンジャー因果の推定精度より高く、真値との相関係数が 0.933、RMSE が 9.404、MAE が 6.831 となり、移動エントロピーの有効性が確認できた。

今回ネットワークの構築に用いたグレンジャー因果は、遅れ時間を考慮していないため、今後の課題として、遅れ時間を考慮したネットワークの構築が考えられる。

参考文献

- [1] 鈴木優人, 長谷川孝太郎, 浜田百合, 栗原陽介, “道案内課題における作業指示者—作業者間の脳血流量に基づくグレンジャー因果性を考慮した作業遂行度評価法の提案”, HCG シンポジウム 2023, 2023.