

脳血流量・心拍変動によるマルチモーダルコミュニケーションネットワークを用いた 共同作業における効率性指標推定手法の提案

Proposal of a Method for Estimating Efficiency Index in Collaborative Work Using a Multimodal Communication Network of Cerebral Blood Flow and Heart-Rate

鈴木 優人[†]
Yuto Suzuki

栗原 陽介[†]
Yosuke Kurihara

1. はじめに

職場や教育の現場では、作業指示者と作業者による共同作業が日常的に行われている。このとき、作業指示の明確性、相槌の有無、指示提示のタイミングなどのコミュニケーションは、作業内容の認知過程だけでなく、焦燥感やリラクセスといった情動にも作用し、最終的な作業効率にも影響する。筆者らはこれまで、作業指示者・作業者の満足度や作業中に発生するミスの回数などを基に共同作業の効率性を測定してきた。さらに、こ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コミュニケーションプロセスにおける脳血流量を用いて因果性ネットワークを構築することで、作業の効率性を評価する手法を提案した[1]。

本研究では、従来の脳血流量に加え、コミュニケーション時の作業指示者・作業者の情動状態を捉えるために、交感・副交感神経活動を表す心拍変動を導入する。脳血流量と心拍変動を統合することで、マルチモーダル因果性ネットワークを構築し、作業効率を高精度に推定する手法の確立を目指す。

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、心拍数から推定する。作業遂行中に、 I が W に作業指示を伝え、その影響が心拍数に表れる。反対に W から I のフィードバックによる刺激も I に影響を与える。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 で計測した時系列信号を $I_i(n)$ ($i=1, 2$)、 $W_j(n)$ ($j=1, 2$) とする。 n は離散時間ステップとする。また、 I 、 W の心拍数の時系列信号を $I_h(n)$ 、 $W_h(n)$ とする。コミュニケーションプロセスにおける脳血流量と心拍数の間の影響を考慮するため、 $I_i(n)$ 、 $W_j(n)$ と $I_h(n)$ 、 $W_h(n)$ にたいし、移動エントロピーを適用することでネットワークを構築し、マルチモーダルコミュニケーションネットワークとして表す。

2.1 マルチモーダルコミュニケーションネットワーク

提案するマルチモーダルコミュニケーションネットワーク

[†]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

クでは、脳血流量モダリティと心拍変動モダリティで構成される。このネットワークは、 I の脳血流および心拍変動を表すノード N_i^I 、 N_h^I と、 W の脳血流および心拍変動を表すノード N_j^W 、 N_h^W で構成される。また、各ノード間における影響力 F_{I_i, W_h} 、 F_{W_h, I_i} 、 F_{W_j, I_h} 、 F_{I_h, W_j} は方向性を持つため、マルチモーダルコミュニケーションネットワークは有向グラフとなる。

2.2 移動エントロピーによるノード間の影響力の算出

各ノード N_i^I 、 N_h^I 、 N_j^W 、 N_h^W は、それぞれ対応する時系列信号 $I_i(n)$ 、 $I_h(n)$ と $W_j(n)$ 、 $W_h(n)$ を持ち、ノード間の影響力 F_{I_i, W_h} 、 F_{W_h, I_i} 、 F_{W_j, I_h} 、 F_{I_h, W_j} は、 $I_i(n)$ 、 $I_h(n)$ と $W_j(n)$ 、 $W_h(n)$ により求める。作業者 W の心拍変動モダリティにおけるノード N_h^W が作業指示者 I の脳血流モダリティにおけるノード N_i^I から受ける影響力 F_{W_h, I_i} は、時系列信号 $W_h(n)$ 、 $I_i(n)$ から求める。時刻 n の $W_h(n)$ が、作業者自身の過去の時系列データ $W_h(n-(p-1+dw): n-dw)$ の影響を受けて生成される場合と、 $W_h(n-(p-1+dw): n-dw)$ と作業指示者 I の過去の時系列データ $I_i(n-(q-1+di): n-di)$ の影響を受けて生成されている場合を比較し、後者の影響のほうが大きいときに、ノード N_h^W は N_i^I の影響を受けていると判断する。 p 、 q は次数、 dw 、 di は遅れ時間とする。ここで求める影響の度合いは、過去の時系列データを知ることにより得られる情報量である条件付きエントロピーから評価する。作業者の過去のみからの影響を $H[W_h(n) | W_h(n-(p-1+dw): n-dw)]$ とし、 $W_h(n)$ の過去の時系列から $W_h(n)$ の予測の不確実さを表す。また、作業者の過去と作業指示者の過去からの影響を $H[W_h(n) | W_h(n-(p-1+dw): n-dw), I_i(n-(q-1+di): n-di)]$ とし、 $W_h(n)$ と $I_i(n)$ の過去からの $W_h(n)$ の予測の不確実さを表す。算出された2つの条件付きエントロピーから、以下の(1)式に示すようにそれぞれの影響の大小比較を行い、その差を移動エントロピーの値として $F_{I_i, W}$ とする。 $F_{I_i, W}$ は値が大きいほど影響が強いことを表す。

$$F_{W_h, I_i} = H[W_h(n) | W_h(n-(p-1+dw): n-dw)] - H[W_h(n) | W_h(n-(p-1+dw): n-dw), I_i(n-(q-1+di): n-di)] \quad (1)$$

上記の処理を、各脳血流量・心拍変動ノード間で行い、各エッジの値 F_{I_i, W_h} 、 F_{W_h, I_i} 、 F_{W_j, I_h} 、 F_{I_h, W_j} を求める。

2.3 効率性指標の推定

マルチモーダルコミュニケーションネットワークにおける、各ノード間の F_{I_i, W_h} 、 F_{W_h, I_i} 、 F_{W_j, I_h} 、 F_{I_h, W_j} を特徴量とし、ガウス過程回帰を適用することで、共同作業における効率性指標を推定する。

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、効率性指標の推定を行う。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 の役割を担当する。本実験における I からの作業指示として、 I はゴールまでの経路を口頭で W に指示する。 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。 W がゴールに到着した後、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項目の計4つの評価項目に対して点数をつける。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 、経路ミスの回数 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(2)式で100点満点に換算する。

$$S = \frac{S_I S_W S_R S_E}{900} \times 100 \quad (2)$$

脳血流量の計測は、作業課題中に株式会社 NeU 製の NIRS(携帯型脳活動計測装置)を用い、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。計測した作業指示者、作業者の脳血流量は、それぞれ $L_I, L_W (\in \mathbf{N})$ で再量子化した後、 $F_{Ii,Wh}, F_{Wh,Ii}, F_{Wj,Ih}, F_{Ih,Wj}$ を求める。実験参加者は、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29パターンの組み合わせを作成し、全29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、マルチモーダルコミュニケーションネットワークを作成し、それぞれガウス過程回帰により効率性指標 S を推定する。推定精度は一つ抜き交差検証を用いて真値と推定値の相関係数と絶対誤差 MAE を算出し比較する。移動エントロピーの次数 p, q 信号の遅れ時間 d_w, d_I は、それぞれ1-100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。また、量子化数 L_I, L_W は10とした。

4. 実験結果および考察

図1に移動エントロピーによって推定を行った際の効率性指標と推定値の散布図を示す。

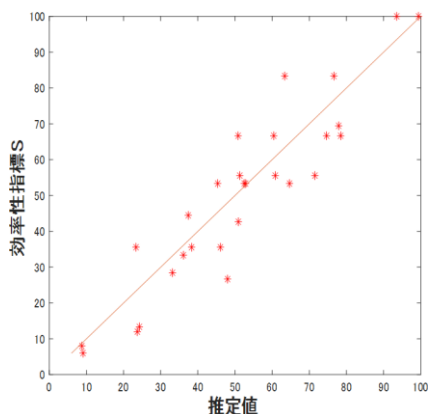


図1 効率性指標 S と推定値の散布図

図1の相関係数は0.93、MAEは7.99となり、高精度な推定が実現できた。また、移動エントロピーにおける次数 q, p は $q=40, p=2$ となった。この結果から、作業指示者は4.0秒間の時系列信号、作業者は0.2秒間の時系列信号を考慮していることが示された。遅れ時間 d_I, d_W は $d_I=76, d_W=92$ となった。この結果から、作業指示者は7.6秒、作業者は9.2秒の遅れ時間を考慮していることが示された。これらの結果から、作業指示者は作業者よりも過去の時系列信号を考慮していることが確認された。

次に、コミュニケーションプロセスと効率性がマルチモーダルコミュニケーションネットワークに与える影響を検討するため、効率性指標 S が高得点のペアと低得点のペアの特徴量を表1に示す。

表1 効率性指標 S が高いペアと低いペアの特徴量

S	100	100	8	6
$F_{Ih,W1}$	0.054	0.72	0.68	0.67
$F_{W1,Ih}$	0.065	0.44	0.44	0.58
$F_{Ih,W2}$	0.11	0.73	0.12	0.17
$F_{W2,Ih}$	0.19	0.61	0.031	0.040
$F_{I1,Wh}$	0.53	0.34	0.34	0.60
$F_{Wh,I1}$	0.86	0.88	0.45	0.68
$F_{I2,Wh}$	0.48	0.43	0.43	0.62
$F_{Wh,I2}$	0.77	0.89	0.41	0.68

表1により、効率性指標 S が100点のペアでは、作業者の心拍数から作業指示者の脳血流量への特徴量が大きく、効率性指標 S が8点、6点のペアでは、全体的に特徴量が大きくないことがわかる。この結果から、効率性指標 S が100点のペアにおいて作業者のフィードバックが作業指示者へ影響を及ぼしたと考えられる。つまり、作業者の心拍数と作業指示者の脳血流量の動的関係性が高く、焦りやリラクセスといったフィードバックが作業指示者へ情報量という形で伝わったと考えられる。反対に、効率性指標 S が8点、6点のペアでは、互いに与える情報量が少なく、あまり影響を与えていないことがわかる。

量子化数 L_I, L_W は10としたことで時系列信号の変化を適切に量子化できたと考えられる。しかし、量子化数を変更した場合の結果は検証していないため、今後検証する必要があると考えられる。

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心拍変動、脳血流量にたいし移動エントロピーを用いたマルチモーダルコミュニケーションネットワークを構築し、効率性指標の推定する手法を提案した。道案内課題を作業課題とした検証実験の結果、真値との相関係数が0.93、MAEが7.99となり、脳活動と心拍変動の動的相互作用の影響を情報量から捉えられた。今後の課題として、顕在情報を加えたマルチモーダルコミュニケーションネットワークの構築が考えられる。

参考文献

- [1] 鈴木優人, 栗原陽介, “三変量グレンジャー因果モデルによる脳血流量の相互作用を考慮した共同作業効率指標の推定”, HCG シンポジウム 2024, 2024.