

独立成分分析に基づく信号源分離精度の予測 Prediction of Source Separation Accuracy Based on Independent Component Analysis

北村 大地¹ 多田 敏貴² 小河 晃太郎³ 寺尾 美菜子³ 竹中 一馬³
 D. Kitamura¹ T. Tada² K. Ogawa³ M. Terao³ K. Takenaka³
 (香川高等専門学校¹, 岡山大学², 横河電機³)

1. はじめに

複数の信号源が混合した観測信号から、混合前の信号源を分離する技術を信号源分離と呼ぶ。有名な信号源分離手法である独立成分分析 (independent component analysis: ICA) [1] は、複数センサの観測信号と信号源間の統計的独立性の仮定を用いる。しかし、ICA の分離精度は信号源の素性 (周波数・波形等) に強く依存する。本稿では、信号源の有限標本データ (観測信号) から算出可能な独立性尺度を新たに提案し、ICA の分離精度が予測可能か検証する。

2. 有限標本データから算出可能な独立性尺度

2.1. 動機

観測信号は有限標本データのため偏りを含む。また、実際の観測ではノイズが付加され、信号の統計的性質を変化させる。従って、各信号源の分布が互いに独立であっても、ICA の分離精度は変化する。本稿では、(a) 信号源が従う確率密度関数を仮定せず、(b) 有限標本データから信号源間の統計的独立性を測ることのできる尺度を提案する。

2.2. 既存尺度

2.1 節の (a) 及び (b) を満たす 2 つの確率変数 (信号源 s_n 及び s_m) 間の独立性尺度として、次式の対称不確定係数 (symmetric uncertainty coefficient: SUC) [2] がある。

$$\text{SUC}_{s_n, s_m} = 2 \frac{\hat{H}_{s_n} + \hat{H}_{s_m} - \hat{H}_{s_n, s_m}}{\hat{H}_{s_n} + \hat{H}_{s_m}} \quad (1)$$

$$\hat{H}_{s_n} = - \sum_i \hat{p}_{s_n}(i) \log \hat{p}_{s_n}(i) \quad (2)$$

$$\hat{H}_{s_n, s_m} = - \sum_{i, j} \hat{p}_{s_n, s_m}(i, j) \log \hat{p}_{s_n, s_m}(i, j) \quad (3)$$

$\hat{p}_{s_n}(i)$ 及び $\hat{p}_{s_n, s_m}(i, j)$ は信号源の有限標本データをヒストグラム化 [2] して求まる近似分布及び近似結合分布である。SUC _{s_n, s_m} は両信号源が独立なら 0、従属なら 1 となる。

2.3. 提案尺度

2 つの信号源が独立であれば、次式が成立する。

$$\text{E}[(s_n s_m)^p] = \text{E}[s_n^p] \text{E}[s_m^p] \quad \forall p = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

$\text{E}[\cdot]$ は期待値を表す。2.1 節の (a) 及び (b) を満たす為に、式 (4) の期待値を標本期待値 $\hat{\text{E}}[s_n^p] = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T s_n^p(t)$ で代替する。提案尺度は、式 (4) の両辺の二乗誤差の総和である。

$$I_{s_n, s_m} = \sum_{p=1}^P \left(\hat{\text{E}}[(s_n s_m)^p] - \hat{\text{E}}[s_n^p] \hat{\text{E}}[s_m^p] \right)^2 \quad (5)$$

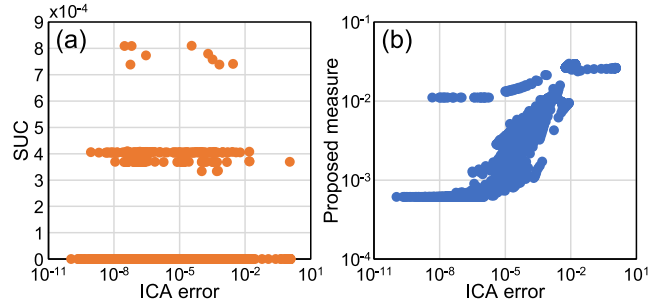


Fig.1 Scatter plots of (a) SUC and (b) proposed measure.

但し、高次統計量の正確な推定には膨大な標本を要するため、本稿では $P = 4$ として式 (5) を計算する。

3. ICA の分離精度と各尺度間の相関の調査

3.1. 条件

ICA の分離精度と SUC 及び提案尺度の相関を調査した。2 つの正弦波の信号源 (位相差 $\pi/2$ rad, 標本数 2501 点) を適当な混合行列で混合し、SN 比が 50 dB となるように標準正規分布乱数を加えた 2 つの観測信号を生成し、自然勾配法 ICA を適用した。このとき、各正弦波の周波数を 2 Hz から 60 Hz まで 1 Hz 刻みで変化させ、その総組み合わせ全てに ICA を適用した。なお、分離精度は ICA で推定される分離行列の逆行列 (各信号源の定数倍の任意性は混合行列に合わせる) と混合行列との差行列の Frobenius ノルムの二乗値とし、これを ICA error と定義する。

3.2. 結果

Fig. 1 に ICA error と SUC 又は提案尺度の散布図を示す。両グラフでの相関係数は SUC が 3.9×10^{-3} 、提案尺度が 0.92 であった。この結果より、提案尺度が明確に ICA の分離精度と強い相関を持っていることが確認できる。本稿では割愛したが、その他の条件においても、提案尺度は常に SUC より高い相関係数を示した。以上より、信号源分離において、混合前の信号源の素性又は標本期待値 ($\hat{\text{E}}[s_n^p]$, $\hat{\text{E}}[s_m^p]$, 及び $\hat{\text{E}}[(s_n s_m)^p]$) が既知の場合は、提案尺度を用いて ICA の分離精度を予測できる可能性がある。

参考文献

- [1] P. Comon, "Independent component analysis, a new concept?," *Signal Process.*, vol. 36, no. 3, pp. 287–314, 1994.
- [2] A. Kraskov, H. Stögbauer, and P. Grassberger, "Estimating mutual information," *Physical Review E*, vol. 69, no. 066138, 2004.