

深層学習モデルでの主観的輪郭線の認識可能性の調査

Investigation of Subjective Contour Recognition Feasibility with Deep Learning Models

小川 航平* 神野 健哉*
Kohei Ogawa Kenya Jin'no

概要

人間は輪郭線を知覚することで物体認識や形状認知を行う。輪郭線は通常、色や輝度が急激に変化した部分に知覚されるがそのメカニズムに反して知覚する輪郭線を主観的輪郭線^[1]と呼ぶ。主観的輪郭線の発生メカニズムを機械的側面からのアプローチすることを試みるために、本稿では主観的輪郭線がコンピュータビジョンにおいても認識可能であるかの検証を行う。その手法として深層学習モデルの畳み込みニューラルネットワーク(CNN)^[2]を用いる。主観的輪郭線データセットを作成し、2クラス分類と3クラス分類の実験をデータセットを組み合わせて行うことにより多くのパターンでそれぞれ行い、その結果を考察して深層学習モデルにおける主観的輪郭線の認識可能性について検討する。

1 はじめに

主観的輪郭線の最も有名な例としてカニツァの錯視画像が挙げられる。図1は部分円が3つ存在している画像であるが、中央部分に三角形が知覚できる。部分円間

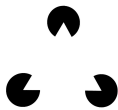


図1 主観的輪郭線の錯視画像

には色や輝度の変化がないが三角形の輪郭線があるかのように感じる、このような線を主観的輪郭線と呼ぶ。従来から主観的輪郭線の発生メカニズムについては議論されてきており、複数の仮説やモデルが示されている。しかしながら、その発生メカニズムを明確にしたものはなく完全な解明には至っていない。コンピュータビジョンでは深層学習モデルの研究が近年盛んに行われており、その中で大量の画像データを学習することで人間の知覚行動のように物体認識や物体検知などが可能なCNNが発表されている。これは画像の特徴量を抽出し、それを何度も更新することによって画像認識を可能としたモデルである。大野ら^[3]やPangら^[4]などがCNNが主観的輪郭線の認識が可能か検証を行った先行研究はいくつか存在するが、明確な結論づけはされていない。我々は

* 東京都市大学大学院総合理工学研究科情報専攻
Informatics, Graduate School of Integrative Science and Engineering, Tokyo City University

独自にデータセットを用意し、それらで主観的輪郭線の有無で分類可能であるか、主観的輪郭線の状態別で分類可能かの実験を行うことで深層学習モデルのCNNで主観的輪郭線の認識が可能か検討する。

2 データセット

本稿で扱うデータセットはすべて自作した画像データセットのみである。データセットはカニツァの三角形を参考にして作成し、3つまたは4つの部分円のみで構成された256×256サイズの1チャンネル画像である。作成したデータセットは全8種類であり、データセットの名称は(三角形の主観的輪郭線を構成するものをT, 四角形を構成するものをS)-(画像内の部分円の個数)-(主観的輪郭線を構成している部分円の個数)で表す。8種類のデータセットをそれぞれ図2~9*に示す。



図2 T-3-3 図3 T-3-0 図4 T-3-2 図5 T-4-3

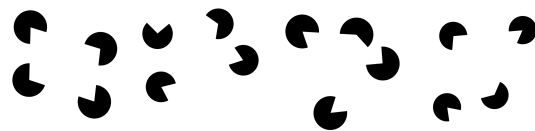


図6 S-4-4 図7 S-4-0 図8 S-4-2 図9 S-4-3

3 実験1

CNNが主観的輪郭線の有無を判別可能かの検証を行うために、T-3-3、T-4-3、S-4-4データセットを「主観的輪郭線あり」、それ以外の5つのデータセットを「主観的輪郭線なし」ラベルとして2クラス分類実験を行う。CNNの学習には各ラベル6000枚ずつのデータセットを用いて、未学習の各4000枚のデータセットで評価を行った。表1~3に実験結果を示す。各列に「主観的輪

* 図2 T-3-3: 三角形を形成する3つの部分円の画像
図3 T-3-0: 部分円が3つあるが、主観的輪郭線を形成しない画像
図4 T-3-2: 三角形を部分的に形成する2つの部分円の画像
図5 T-4-3: 四角形を部分的に形成する3つの部分円の画像
図6 S-4-4: 四角形を形成する4つの部分円の画像
図7 S-4-0: 部分円が4つあるが、主観的輪郭線を形成しない画像
図8 S-4-2: 四角形を部分的に形成する2つの部分円の画像
図9 S-4-3: 四角形を部分的に形成する3つの部分円の画像

郭線あり」、各行に「主観的輪郭線なし」のデータセットを示し、これらをデータセットを用いて学習、評価を行った際の未学習データでの分類正解率を示す。

表 1 2 クラス分類結果 1

	T-3-3	T-4-3	T-3-3,T-4-3
T-3-0	99.89%	99.99%	98.72%
T-3-2	98.85%	100.0%	94.82%
T-3-0,T-3-2	99.75%	99.90%	98.15%

表 2 2 クラス分類結果 2

	S-4-4
S-4-0	99.94%
S-4-2	99.74%
S-4-3	90.31%
S-4-0,S-4-2,S-4-3	98.77%

表 3 2 クラス分類結果 3

	T-3-3	T-4-3	T-3-3,T-4-3
S-4-0	99.90%	99.61%	98.05%
S-4-2	99.99%	98.85%	99.46%
S-4-3	100.0%	99.15%	98.03%
S-4-0,S-4-2,S-4-3	100.0%	98.21%	98.80%

表から CNN は主観的輪郭線の有無の判断が高精度に可能であることが分かる。データセットの組み合わせや混合させた場合においても分類精度がほとんど低下しない。しかし、表 2 より画像内の 4 つの部分円の内 3 つで主観的輪郭線を構成している S-4-3 の分類精度が他の場合よりも低下していることから、CNN が S-4-4 と S-4-3 は似たような状態と判断し、分類がより難しくなったのではないかと考えられる。

4 実験 2

実験 1 では主観的輪郭線の有無の判別実験を行ったが、ここでは「主観的輪郭線一部あり」ラベルを追加して、より複雑な主観的輪郭線の状態についても CNN が判別可能か実験を行い検証する。T-3-2、S-4-2、S-4-3 を「主観的輪郭線一部あり」のデータセットとする。学習には各 4000 枚を用いて、各 2667 枚の未学習のデータセットで評価を行う。表 4~6 に実験結果を示す。

表 4 3 クラス分類結果 1

主観的輪郭線あり	主観的輪郭線なし	主観的輪郭線一部あり	正解率
T-3-3	T-3-0	T-3-2	98.28%
T-3-3	T-3-0	S-4-2	99.88%
T-3-3	T-3-0	S-4-3	99.91%
T-3-3	S-4-0	T-3-2	99.14%
T-3-3	S-4-0	S-4-2	93.55%
T-3-3	S-4-0	S-4-3	98.98%

表 5 3 クラス分類結果 2

主観的輪郭線あり	主観的輪郭線なし	主観的輪郭線一部あり	正解率
T-4-3	T-3-0	T-3-2	96.25%
T-4-3	T-3-0	S-4-2	99.73%
T-4-3	T-3-0	S-4-3	99.51%
T-4-3	S-4-0	T-3-2	99.93%
T-4-3	S-4-0	S-4-2	96.79%
T-4-3	S-4-0	S-4-3	98.53%

表 6 3 クラス分類結果 3

主観的輪郭線あり	主観的輪郭線なし	主観的輪郭線一部あり	正解率
S-4-4	T-3-0	T-3-2	96.16%
S-4-4	T-3-0	S-4-2	99.88%
S-4-4	T-3-0	S-4-3	99.60%
S-4-4	S-4-0	T-3-2	99.96%
S-4-4	S-4-0	S-4-2	97.78%
S-4-4	S-4-0	S-4-3	99.63%

表から主観的輪郭線の一部が存在している状態も CNN は高精度に判別することができる。また、表 2 の 2 クラス分類時では S-4-4 と S-4-3 の分類精度が低くなったが、表 6 の 3 クラス分類では分類正解率が約 99%と向上した。

5 まとめ

本稿では深層学習モデルの CNN で人間の知覚行動で発生する主観的輪郭線が認識できるか実験的に検証を行った。主観的輪郭線の有無と一部に主観的輪郭線が存在するかの判別が CNN は学習したパターンのデータセットではテストデータにおいても非常に高い精度で可能であることが明らかになった。今後は学習済みの CNN に対して学習させていないパターンのデータセットを入力することで CNN の持つ汎化能力を検証することを行う。また、五角形の主観的輪郭線のデータセットでも CNN は分類が可能であるのかの検証も行っていく予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 23K11266、23H03387、24K15115、東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究、東京都市大学重点推進研究未来知能ユニットの助成によるものです。

参考文献

- [1] 北岡明佳, 錯視入門, 朝倉書店, 2010.
- [2] A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton, "ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks", 2012.
- [3] 大野, 白川, 大原, 豊田, "Deep Learning による主観的輪郭線の抽出 Subjective Contour Extraction Using Deep Learning", 人工知能学会知識ベースシステム研究会資料, 2016.
- [4] Zhaoyang Pang, Callum Biggs, O' May, Bhavin Choksi, Rufin VanRullen, "Predictive coding feedback results in perceived illusory contours in a recurrent neural network", 2021