

遮蔽された輪郭を補完する神経回路モデル Neural Network Model for Completing Occluded Contours

福島 邦彦

Kunihiko Fukushima

関西大学

fukushima@m.ieice.org

Abstract— This paper proposes a neural network model capable of completing partly occluded contours. The model is a hierarchical multi-layered network. Using the responses of bend-extracting cells, which are found in area V2 and respond selectively to a particular angle of bend, the model extrapolates the curvature and location of the occluded contours.

Keywords— Vision, Occlusion, Amodal completion, Neural network, Bend-extracting cell

1 はじめに

視覚パターンの一部がほかの物体で覆われて隠されていても、われわれ人間は、見えている箇所の輪郭をもとに、隠されている箇所の輪郭の形状を推測することができる。このようなアモダル補完の能力を持った神経回路モデルを提唱する。なお、このモデルの予備実験の結果はすでに発表した [1]、今回は、それよりも簡単な神経回路で同じ機能が実現できることを示す。

ネコやサル V1 野には、特定の方位のエッジに選択的に反応する単純型細胞や、複雑型細胞がある。また、サル V2 野には、輪郭の折れ曲がりの角度に選択的に反応する細胞（折れ曲がり抽出細胞）があることが報告されている [2]。モデルは、このような細胞を持つ階層型の多層神経回路で、ボトムアップとトップダウンの信号経路を持つ。折れ曲がり抽出細胞の出力をもとに、隠されている輪郭の曲率と位置を予測し、輪郭を少しずつ外挿していく。その信号はトップダウン経路を経由してエッジ抽出細胞層にフィードバックされ、フィードバックされた信号をもとに、欠損している輪郭の推定が再行なわれる。このようにして信号がフィードバックループを循環するにつれて輪郭の外挿が進んでいき、ついには遮蔽によって欠損していた輪郭が完全に補完される。

2 神経回路モデル

モデルは図 1 に示すように、ボトムアップとトップダウン信号経路をもつ階層型多層神経回路で、回路内にはフィードバックループが形成されている。

刺激パターンは入力層 U_0 層に呈示される。 U_G 層は、網膜神経細胞に似たコントラスト抽出細胞の層である。その次の U_{S1} 層の S1 細胞は、V1 野の単純型細胞に似た細胞で、特定の方位のエッジに選択的な反応を示す。したがって入力パターンの輪郭は、 U_{S1} 層で、各方位のエッジ成分に分解される。 U_{S1} 層の出力は、V1 野の複

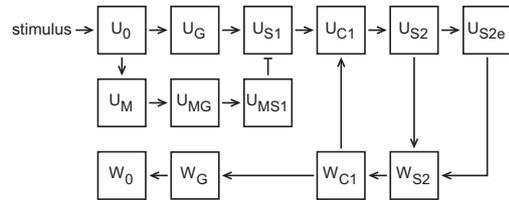


図 1: アモダル補完を行なう神経回路の構造

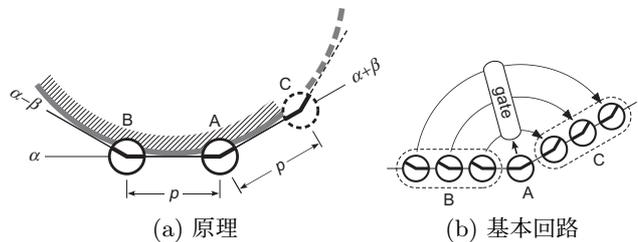


図 2: 曲がり抽出細胞の反応に基づく輪郭外挿

雑型細胞に似た C1 細胞の層 U_{C1} に送られる。ここまでの構造は、ネオコグニロンとほぼ同じである [3]。

ところで入力層 U_0 層には、部分的に遮蔽された目的のパターンの像だけでなく、それを遮蔽している物体の像も同時に呈示されている。遮蔽物体に起因するエッジ情報を除去するために働いているのが、 $U_M \rightarrow U_{MG} \rightarrow U_{MS1} \rightarrow U_{S1}$ の経路である [1]。

U_{C1} 層の出力は、S2 細胞の層 U_{S2} に送られる。S2 細胞は、サル V2 野で観測されている折れ線に反応する細胞 [2] に似た細胞である。特定の角度で折れ曲がったエッジ、すなわち方位の異なる二つのエッジが受容野の中心で折れ曲がるように組み合わせたパターンに選択的に反応する。入力パターンの輪郭が曲線で形成されている場合には、その接線の折れ曲がりを抽出する。

輪郭の外挿 U_{S2e} 層は、 U_{S2} 層の出力を受けて、遮蔽によって隠されている輪郭の曲がりを予測し外挿する。

図 2(a) に実線で示すような曲線を描く輪郭が存在し、A の位置に受容野を持つ S2 細胞がこの輪郭の接線の折れ曲がりに反応したとする。その左側のエッジの延長線上で、同じ角度の折れ曲がりを抽出するもう一つの S2 細胞 B も反応したとしよう。AB 間の距離を p とする。この輪郭が、同じ曲率を保って点 A の右側に破線のように伸びているならば、A の右側のエッジの延長線上に距離 p だけ離れた C の位置で、同じ角度の折れ曲がりを抽出する S2 細胞が大きな出力を出すはずである。

モデルでは、 U_{S2} 層で細胞 A と B が反応したときに、 U_{S2e} 層の細胞 C が反応するようになっている。これは

図 2(b) のような回路で簡単に実現できる。図で、細胞 A の左側のエッジの延長線上にある細胞は、それぞれ、右側のエッジの延長線上に、等距離だけ離れた位置にある細胞に興奮性結合をしているが、その信号は、細胞 A の出力によってゲートされる。

トップダウン経路 W_{S2} 層には、 U_{S2} 層で抽出された曲がりの情報と、それをもとにして推定された外挿信号 (U_{S2e} 層の出力) とが加算されて、遮蔽箇所の輪郭を予測する曲がり情報が現われる。

W_{S2} 層から W_{C1} 層への結合は、 U_{C1} 層から U_{S2} 層への結合と、信号の流れの方向は逆になっているが、その空間分布は全く同一である。その結果、輪郭の外挿によって修復されたエッジの情報が W_{C1} 層に現われる。

この W_{C1} 層に現われたエッジ情報は、 U_{C1} 層に送られ、 U_0 からのボトムアップ信号に加えあわされる。階層型回路内に、このようにして形成されたフィードバックループを信号が流れるにつれて、遮蔽によって欠損していた輪郭は次第に修復されていく。

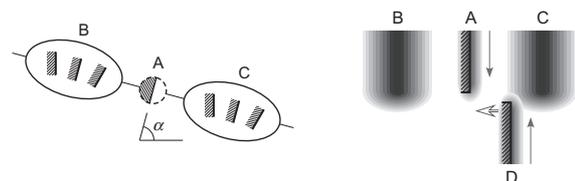
W_{C1} 層の反応はまた、 W_G 層を経由して W_0 層にも送られる。 W_0 層は、遮蔽された輪郭の修復状況を直感的に観測するために設けた仮想的な細胞層である [3]。

予測誤差の吸収 U_{S2e} 層での輪郭の曲がりの予測にはある程度の誤差を伴うので、 W_{C1} 層に再現されるエッジの位置にも、ある程度の誤差が生じる。したがって、遮蔽箇所の両側から外挿されてきた輪郭が出会う箇所では往々にして、二つの輪郭の位置に食い違いが生じ、本来ならば閉じた 1 本の輪郭になるべき輪郭が、合体できずに別々の方向に伸びていってしまうことがある。

U_{C1} 層は、このような輪郭位置の食い違いを吸収する働きをしている。 U_{S1} 層の反応は、 U_{C1} 層において空間的にぼかされる。 U_{S2} 層の $S2$ 細胞の入力結合も、ぼかされた U_{C1} 層の反応をもとに形成されているので、 W_{S2} 層から W_{C1} 層にフィードバックされる信号も、同程度のぼけを持つ。 W_{C1} 層から U_{C1} 層にフィードバックされる信号の位置に多少の食い違いがあっても、ぼかしの効果によって反応が太くなっているため、 U_{C1} 層では重なり合い、1 本の輪郭に合体する。

しかし位置の食い違いが大きすぎると、 $C1$ 細胞によるぼかしだけでは吸収できなくなる。そのようなときに有効に働くのが、 W_{C1} 層内の側抑制機構である。大きな位置の食い違いを、 $C1$ 細胞によるぼけの効果が有効に働く程度にまで、縮小する働きをする。各 W_{C1} 細胞は、自分とほぼ同じ最適方位を持つほかの W_{C1} 細胞から、図 3(a) のような側抑制結合を受け取っている。

本来ならば合体すべき 2 本の縦のエッジが、上と下から伸びてきたが、その位置に左右のずれがあったとしよう。図 3(b) は、縦の最適方位を持つ細胞の反応を示している。上から来た縦のエッジによって A の領域内の細胞が反応し、B および C の領域の細胞に抑制信号を送る。このとき下から伸びてきたもう一方のエッジに対する反応 D は、C の領域の細胞が抑制信号の影響で反応しにくくなっているために、左側にシフトしながら伸びていき、A と D の間の距離は次第に縮まっていく。



(a) 側抑制結合の空間分布 (b) 抑制で反応位置がシフト
図 3: W_{C1} 層内の側抑制結合の効果

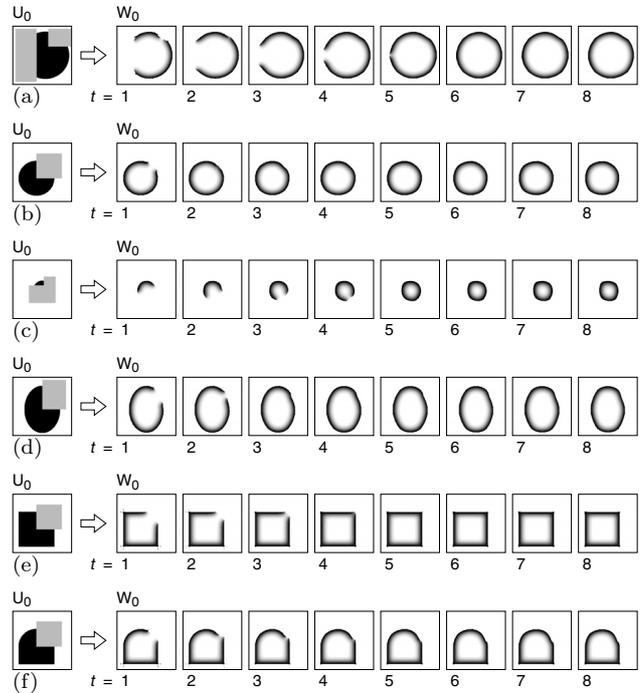


図 4: アモーダル補完の進行の時間経過

3 計算機シミュレーション

部分的に遮蔽されたパターンが入力層 U_0 に呈示されたときに、アモーダル補完の結果を示す W_0 層の反応が、時間とともにどのように変化していくかを図 4 に示す。つまり、遮蔽された輪郭の修復の進行状況である。

同図 (a) では、2 個の四角形で遮蔽された円盤が、きれいに補完されていく状況が見られる。同図 (b) や (c) に示すように、遮蔽されている円盤の直径が変わっても、可視部の曲率に応じて輪郭はなめらかに補完される。また図 (d) のように、遮蔽箇所の両側に見える輪郭の曲率が異なっても、曲率の多少の違いは吸収されて、両側から外挿されてきた輪郭はきれいに合体して、自然な形状に内挿される。図 (b), (e), (f) では、いずれも見えている輪郭と遮蔽物体との交点の座標は同じであるが、可視部の輪郭の曲率の違いに応じて、異なった補完が行なわれている様子が見られる。

参考文献

- [1] 福島邦彦 (2008): “アモーダル補完を行なう神経回路”. 電子情報通信学会 NC 研究会, No. NC2007-189.
- [2] M. Ito, H. Komatsu (2004): “Representation of angles embedded within contour stimuli in area V2 of macaque monkeys”. *J. Neuroscience*, **24**[13], 3313–3324.
- [3] K. Fukushima (2005): “Restoring partly occluded patterns: a neural network model”. *Neural Networks*, **18**[1], 33–43.