

極変換を用いて線図形の 3 次元面方位を推定する大脳皮質 CIP 野モデル An Area CIP Model Presuming the 3D Surface Orientation of a Line Drawing using Polar Transformation

坂本一寛(P)¹⁾, 小濱卓也¹⁾, 杉江雄生¹⁾, 川上進¹⁾, 橋元惇¹⁾, 矢野雅文¹⁾

Kazuhiro Sakamoto(P), Takuya Kohama, Yuki Sugie, Susumu Kawakami, Makoto Hashimoto and Yuzo Hirai

¹⁾東北大学電気通信研究所

sakamoto@riec.tohoku.ac.jp

Abstract Perspective cue is an important monocular cue for presuming the three-dimensional (3D) structure of real world. Here, we present a novel neuronal model for presuming the 3D surface orientation of a line drawing. By using polar transformation, our model can reproduce the surface-orientation-selective cells of area CIP from line segments, or orientation selective cells.

Keywords Monocular, 3D Surface Orientation, Polar Transformation, Area CIP, Orientation Selective Cell

1 背景と目的

空間の三次元構造を理解することは、視覚系の主要な機能の一つである。この理解には様々な手がかりが存在する(両眼視差, 運動立体視, 陰影, テクスチャー勾配など)。その中で遠近法手がかりは、遠方や、静止した物体に有効であり、視覚系は線図形からでも、面の向きを推定することが出来る。

実際、大脳皮質において、立体視に中心的な役割を果たす頭頂連合野のcaudal intraparietal area(CIP野)と呼ばれる領野には、線図形から推定される面方位によって応答が変化する細胞が存在することが知られている[1]。また、CIP野は主にV3A野からその投射を受けるが[2]、そのV3A野には多数の方位選択性細胞が存在することが知られている[3]。しかしながら、そのような方位選択性細胞による局所線分検出からCIP野の面方位細胞の性質がどのように得られるかといった神経メカニズムは依然として不明である。

一方、遠近法の理論である射影幾何学によると、射影された平行四辺形の 2 対の辺から消失点が得られ、それらから面方位を求めることが出来る。さらに、球面の射影幾何学を用いると、投影像中の局所線分に対して極という概念を導入し、極変換と呼ばれる変換を行い、1 対の局所線分から消失点をロバストに求めることが可能である[4]。

本研究では、球面射影幾何学を利用して、極めて単純な線図形からでも面方位を推定する神経モデルを提案する。本モデルは、CIP野の面方位細胞の性質を再現するだけでなく、ノイズ等を含む線図形からでもロバストに面方位を推定する。

2 アルゴリズム

図1(a)のように、射影幾何学においては、平行な対辺は無遠で収束し、消失点を生じる。消失点が二箇所存在すれば、そこから面の方位を求めることが可能である。投影像中の対辺が平行な場合でも球面の射影幾何学を考えると、消失点を求めることが可能となる。

球面の射影幾何学では、図形を構成する線分は大円の一部と考えることができる(図 1(b))。図形の線分 L_{11} は大円 gPL_{11} の一部である。この時、大円 gPL_{11} に対し極 PL_{11} は、ちょうど地球における赤道と北極の関係に等しい。このような大円と極との双方向の変換を極変換と呼ぶ。

極は、CIP野に投射するV1野、V3/V3A野の方位選択性細胞から、以下のように計算される。線分 L_{11} を検出する方位選択性細胞の受容野の位置を点 RF_{11} とする。また、視線方向を FP とする。点 RF_{11} を通る球の接平面をとり、線分 L_{11} を投影する。この接平面に直交座標軸 x_{RF}, y_{RF} を(2.1)のように定める。

$$\mathbf{x}_{RF} = \mathbf{RF}_{11} \times \mathbf{FP}, \quad \mathbf{y}_{RF} = \mathbf{RF}_{11} \times \mathbf{x}_{RF} \quad (2.1)$$

\mathbf{x}_{RF} と線分 L_{11} をこの接平面に投影した線分の方位をとると極 PL_{11} は次のように表される。

$$\mathbf{PL}_{11} = \cos(\theta) \cdot (-\mathbf{x}_{RF}) + \sin(\theta) \cdot (-\mathbf{y}_{RF}) \quad (2.2)$$

同様に、線分 L_{12} に対する極 PL_{12} も求める。すると、線分 L_{11}, L_{12} の消失点 VP_1 は、

$$\mathbf{VP}_1 = \mathbf{PL}_{11} \times \mathbf{PL}_{12} \quad (2.3)$$

のように求められる(図 1(c))。同様に、線分 L_{21}, L_{22} の消失点 VP_2 を求めると、最終的に面方位 SO を、

$$\mathbf{SO} = \mathbf{VP}_1 \times \mathbf{VP}_2 \quad (2.4)$$

と得ることが出来る(図 1(d))。まとめると、線分方位やそれを検出した受容野の位置から直接、面方位、

$$\mathbf{SO} = \begin{bmatrix} \{\cos(\theta_{11}) \cdot (-\mathbf{RF}_{11} \times \mathbf{FP}) + \sin(\theta_{11}) \cdot (-\mathbf{RF}_{11} \times (\mathbf{RF}_{11} \times \mathbf{FP}))\} \\ \times \{\cos(\theta_{12}) \cdot (-\mathbf{RF}_{12} \times \mathbf{FP}) + \sin(\theta_{12}) \cdot (-\mathbf{RF}_{12} \times (\mathbf{RF}_{12} \times \mathbf{FP}))\} \\ \times \{\cos(\theta_{21}) \cdot (-\mathbf{RF}_{21} \times \mathbf{FP}) + \sin(\theta_{21}) \cdot (-\mathbf{RF}_{21} \times (\mathbf{RF}_{21} \times \mathbf{FP}))\} \\ \times \{\cos(\theta_{22}) \cdot (-\mathbf{RF}_{22} \times \mathbf{FP}) + \sin(\theta_{22}) \cdot (-\mathbf{RF}_{22} \times (\mathbf{RF}_{22} \times \mathbf{FP}))\} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

が求まる。

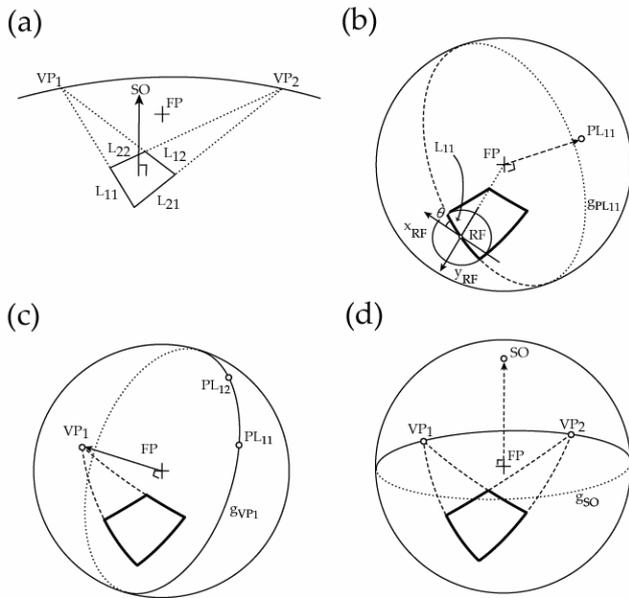


図1 アルゴリズムの概要 (a)二つの消失点 VP_1 , VP_2 より,面の方位 SO を求めることが出来る. FP は視線方向.(b)極変換により,線分 L_{11} が張る大円 $g_{PL_{11}}$ の極 PL_{11} が求まる.(c)極 PL_{11} , PL_{12} が張る大円 g_{VP_1} を極変換し,消失点 VP_1 を求める.(d)二つの消失点 VP_1 , VP_2 が張る大円 g_{SO} の極変換で面方位 SO が求まる.

3 計算結果

図2は,面が $slant=30^\circ$, $tilt=315^\circ$ の場合の投影像から面方位を推定した結果である.図2(a)の面をその場で回転させ投影像中に平行線が存在する場合も同様の推定結果が得られている(図2(b)).また,平行移動に対しても同様の結果が得られた(図2(c)).

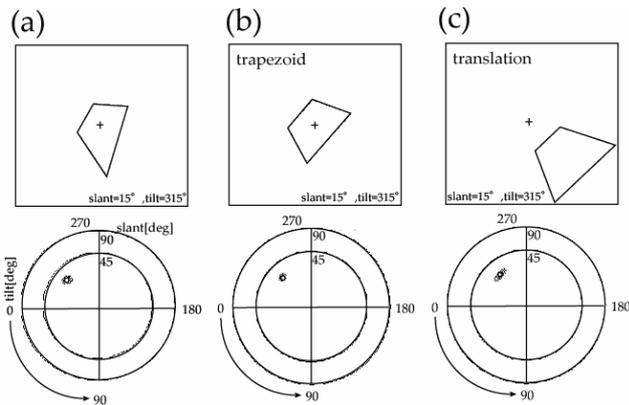


図2 $slant=15^\circ$, $tilt=315^\circ$ の場合の出力.上段:入力画像,下段:推定された $slant$ と $tilt$

$Slant$, $tilt$ を変えても,面方位が正しく推定された.また,輪郭が途切れている場合,辺の一部が遮蔽された場合,線分にぼかし効果が加えられた場合,背景にランダムドットノイズが加えられた場合でも,面方位のロバストな推定が可能であった.

また,1つのCIPモデル細胞に着目し,様々な $slant$, $tilt$ 図形に対する応答を見ると,実際のCIP野の細胞と同様に,特定の $slant$, $tilt$ に選択的に応答していることが確認された(図3).

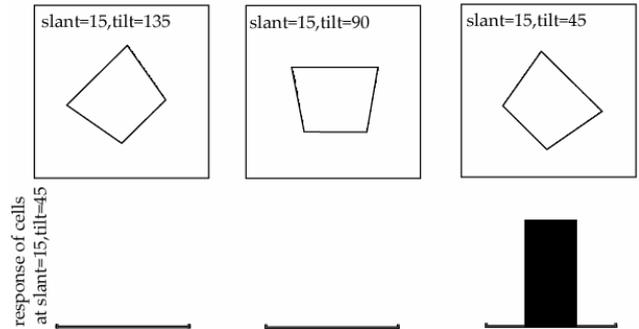


図3 $slant=15^\circ$, $tilt=45^\circ$ に選択性を持つ細胞の異なる入力画像に対する応答

4 結論

本研究では,極変換を用いて,平行四辺形の3D面方位を,単眼情報のみから推定する神経モデルを提案した.本モデルは,CIP野の面方位細胞の性質が,V1野,V3/V3A野など前段階の細胞の性質からどのように得られるかを初めて提案したものである.その性能をシミュレーションにより確認した結果,CIP野の面方位細胞の性質を再現するだけでなく,輪郭の不連続や,ノイズを含む場合でもロバストな面方位の推定が可能であることが明らかとなった.

参考文献

[1] K. I. Tsutsui, M. Jiang, K. Yara, H. Sakata, M. Taira (2001) "Integration of perspective and disparity cues in surface-orientation-selective neurons of area CIP." *Journal of Neurophysiology*, **86**, 2856–2867.

[2] H. Nakamura, T. Kuroda, M. Wakita, M. Kusunoki, A. Kato, A. Mikami, H. Sakata, K. Itoh, et al. (2001) "From three-dimensional vision to prehensile hand movements: The intraparietal area links the area V3A and the anterior intraparietal area in macaques." *Journal of Neuroscience*, **21**, 8174–8187.

[3] S. M. Zeki (1978) "Uniformity and diversity of structure and function in rhesus monkey prestriate visual cortex." *Journal of Physiology (London)*, **277**, 273–290.

[4] 杉江雄生, 川上進, 坂本一寛, 矢野雅文 (2006) "直線の到達時間を検出する運動視神経網モデル." 日本神経回路学会 第16回全国大会論文集, P3-03.