

遮蔽されたエッジの視覚的補間モデル

大城正典¹⁾ 塩入論²⁾ 矢口博久³⁾

¹⁾千葉大学自然科学研究科 ²⁾千葉大学工学部

遮蔽されたオブジェクトがある画像をセグメンテーションするとき、一般的な画像処理アルゴリズムでは、オブジェクトは複数の断片としてセグメント化される。一方、視覚の処理では、遮蔽によって分断された断片を、元のひとつのオブジェクトとして認識できる。これは、視覚系が遮蔽された部分を補間して、元のオブジェクトに統合する機能を持っているからであると考えられる。この視覚的なセグメンテーションの第1段階である視覚的補間のメカニズムを解明することは、重要であるといえる。我々は、遮蔽された曲線のエッジをも補間する視覚的補間のモデルを提案し、シミュレーションによって、遮蔽された曲線のエッジを補間することを確認した。

A Visual Model for Interpolation of Occluded Edges

Masanori OHSHIRO¹⁾ Satoshi SHIOIRI²⁾ Hirohisa YAGUCHI³⁾

¹⁾Graduate School of Science and Technology, Chiba University

²⁾Faculty of Engineering, Chiba University

An object partly occluded may be divided to several regions by typical computational segmentation algorithms. A biological visual system, on the other hand, is able to interpolate occluded object's regions and edges even if the edges are curved and integrate regions and edges into one object appropriately. It is very important issue to investigate such a mechanism that performs the visual interpolation. We propose a visual model for interpolation of occluded curved edges as well as straight edges. The model was applied to gray level images and the results show that occluded edges were successfully interpolated.

1. まえがき

画像処理の大きな問題のひとつに、複雑な画像のセグメンテーションがある。特に遮蔽によって分割された複数の断片を、一つのオブジェクトにまとめてセグメンテーションすること(以降、オブジェクトセグメンテーションと呼ぶ)は、一般的な画像処理アルゴリズムでは困難である。

一方、人間は分割された断片を、ひとつのオブジェクトとして容易に認識することが可能である。これは、視覚系が遮蔽されたエッジや領域を補間し、遮蔽されていないエッジと領域とあわせて、オブジェクトごとに統合・分離する機能を持っているからであると考えられる。よって、視覚系の行うオブジェクトセグメンテーションの機構を明らかにすることは、画像認識の課題として重要であるといえる。

本稿では、視覚系の行うオブジェクトセグメンテーションに関する研究の一環として、遮蔽されたエッジの補間を行う視覚系モデルの概要と、シミュレーションの結果と分析、及び今後の課題について述べる。

2. モデル

2.1 モデルの概要

Fig. 1 にモデルの概要を示す。モデルは3つのステージから構成されている。

第1ステージでは、最適方位を持つオペレータにより、入力画像上のエッジが各最適方位ごとに検出される。

第2ステージでは、第1ステージで得られた各方位の信号を比較して、各位置における有効な方位成分を抽出する。

第3ステージでは、位置情報と方位情報を入力に持つオペレータにより、遮蔽されたエッジの補間が行われる。このオペレータは、視覚的補間と同様に遮蔽された曲線エッジを補間する。

2.2 第1ステージ(エッジ検出)

第1ステージでは、Heitger らの手法⁴⁾によってエッジ検出を行う。入力画像は、同一の最適方位 θ を持った \cos 型及び \sin 型 Gabor 関数(Fig. 2)を用いて畳み込まれる。

それぞれの畳み込みの結果を $O_{\cos, \theta}$, $O_{\sin, \theta}$ とする

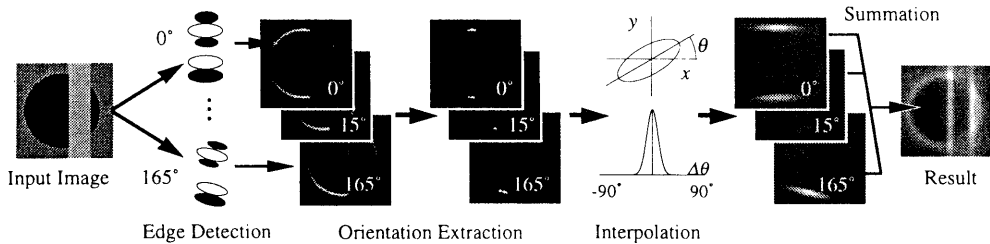


Fig.1 Diagram of the model

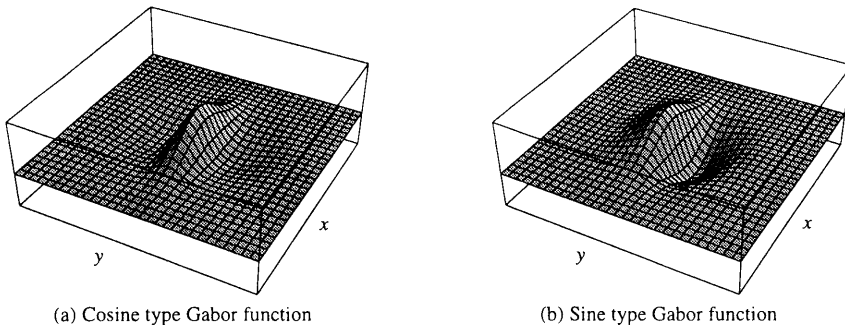


Fig. 2 Profiles of Gabor functions

と、第1ステージの最適方位 θ に関する出力は、(1)式の局所エネルギー関数 C_θ で表される。

$$C_\theta = \sqrt{O_{\cos, \theta}^2 + O_{\sin, \theta}^2} \quad (1)$$

このオペレータの特性は、複雑型細胞の入出力特性に類似している。

なお、本稿のシミュレーションでは、最適方位のきざみ幅を 15° とし、 $0^\circ \sim 165^\circ$ の12方位について計算を行った。

2.3 第2ステージ(方位成分の抽出)

第2ステージでは、入力画像の各位置における有効な方位成分を抽出する。方位 θ に関する第1ステージの出力を $C_\theta(x, y)$ とすると、各位置 (x, y) に対して、集合

$$\{ C_i(x, y) \mid i = 0, 15, 30, \dots, 150, 165 \} \quad (2)$$

のうち、最大値を持つ要素 $C_{\phi}(x, y)$ を定める方位 $D(x, y) = \phi$ を選ぶことができる。 $D(x, y)$ は、入力画像が点 (x, y) において、どの方位に最も強い信号を含んでいるかを示している。各点における有効な方位成分を一意に決定するために、第2ステージの出力 $E_\theta(x, y)$ を、 $D(x, y)$ を用いて(3)のように定義する。

$$E_\theta(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } \theta \neq D(x, y) \\ C_\theta(x, y) & \text{if } \theta = D(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

この第2ステージで行われる処理は、特定の位置における方位成分のうち、最も強い方位成分のみを有効とすることから、神経系にみられる競合システムに相当すると考えることができる。

2.4 第3ステージ(エッジの補間)

最近の神経生理学の研究から、第1次視覚野では、細胞の最適方位は、連続的に変化しながら分布していることが明らかになってきた^{2),3)}。このことにより、一般的な視覚細胞と受容野の関係と

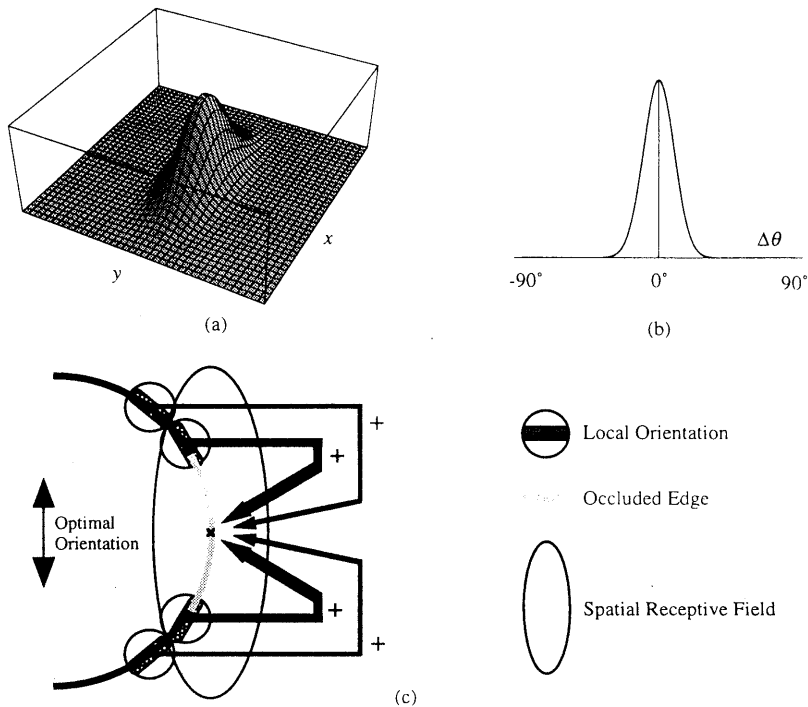


Fig. 3 Interpolation cell

同様に、最適方位がほとんど同一の細胞からは大きい寄与を受け、最適方位が大きく異なる細胞からの寄与は減少するような細胞の存在を仮定することができる。我々は、網膜受容野からの入力と、最適方位を連続的に変化させて分布している細胞群からの入力の両方を持っている細胞が、エッジの補間を行っていると考え、そのような細胞を interpolation cell と呼んでいる。Fig. 3 に interpolation cell の概念図を示す。

Fig. 3(a)は interpolation cell の空間的な受容野特性であり、最適方位を θ_0 とすれば、式(4)で表される。

$$R_{\theta_0}(x, y) = e^{-\left(\frac{S(x, y, \theta_0)}{2\sigma_1}\right)^2} \cdot e^{-\left(\frac{S(x, y, \theta_0 + 90^\circ)}{2\sigma_2}\right)^2} \quad (4)$$

Fig. 3(b)は interpolation cell の方位性細胞からの入力特性を示しており、式(5)で表される。

$$P_{\theta_0}(\theta) = e^{-\left(\frac{\theta - \theta_0}{2\sigma_3}\right)^2} \cdot \cos(\theta - \theta_0) \quad (5)$$

方位性細胞からの入力特性は、最適方位が一致する細胞からの寄与が最も高く、最適方位のずれが大きくなるにつれて、寄与が低下している。

Fig. 3(c)に、interpolation cell がエッジの補間を行うメカニズムを示す。図には、例として遮蔽によって分断された円弧状のエッジが描かれている。垂直方向の最適方位を持つ interpolation cell の空間的受容野は×印を中心に大きく広がっている。この受容野中心は、遮蔽されたエッジの中心に位置しており、近接部分に interpolation cell

の最適方位とほぼ同じ方向の方位成分が分布しているので、大きな寄与を受ける(太矢印)。受容野中心から離れた位置の方位成分は、interpolation cell の最適方位から大きくずれているので寄与は小さい(細矢印)。

この interpolation cell の働きは、式(6)で表され、第3ステージの結果は $I_{\theta_0}(x, y)$ と $\sum_{\theta} E_{\theta}(x, y)$ の畳込みで計算される。

$$I_{\theta_0}(x, y) = R_{\theta_0}(x, y) \cdot \sum_{\theta} P_{\theta_0}(\theta) \quad (6)$$

3. シミュレーションの結果と検討

3.1 第1ステージの結果

Fig.4 に入力画像及び、第1ステージのシミュレーション結果を示す。(a)が入力画像であり、黒いディスクの上に明るいグレイの垂直の帯が覆っているように配置されている。ディスクの右下のエッジ(接線の傾きが 30° となる部分の周辺)と右上のエッジ(接線の傾きが 150° となる部分の周辺)が遮蔽されていて、これらの部分に 30° と 150° の方位成分は存在しない。

Fig.4(b)は、 0° 方向のエッジ検出の結果である。使用した Gabor 関数の特性上、 90° にかかなり近い成分まで反応していることがわかる。Fig.4(c)は、 90° 方向のエッジ検出の結果である。同様に 0° にかかなり近い方位成分にも反応している。Fig.4(d)は、全12方位に対する結果の総和をとったものである。エッジが明確に検出されている。

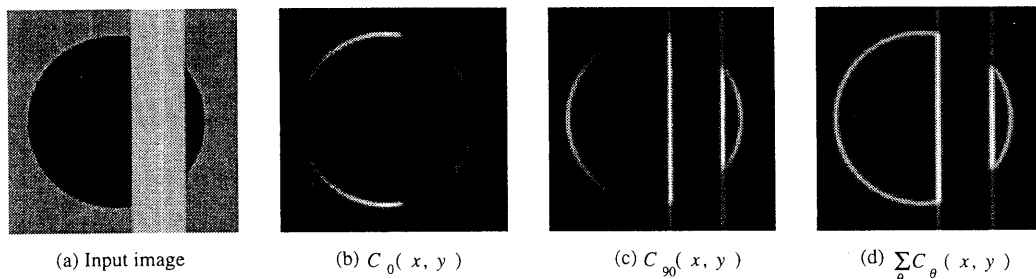


Fig. 4 Results of edge detection

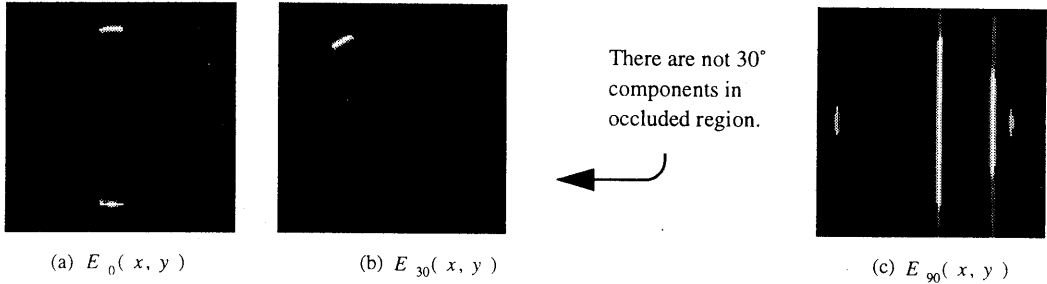


Fig. 5 Results of orientation extraction

3.2 第2ステージの結果

Fig.5 に第2ステージのシミュレーション結果を示す。 Fig.5(a)は 0° 方向の方位成分の分布である。 Fig.4(b)と比較すると、 0° 方向の成分のみが抽出されていることがわかる。 Fig.5(b)は 30° 方向の成分を抽出した結果である。右下の遮蔽部では、 30° の成分は検出されない。 Fig.5(c)は同様に 90° 方向の結果である。

Fig. 6 に第2ステージで抽出された方位成分の分布を示す。 $0^\circ \sim 165^\circ$ の方位成分を、黒から50%グレイでプロットし、信号強度が0で、有効な方位成分が存在しない点は白でプロットしてある。

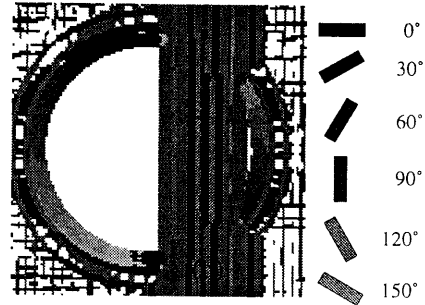


Fig. 6 Distribution of orientation components

Fig.7(b)は 30° 方向の計算結果であるが、Fig. 5(a)では存在しなかった右下遮蔽部の 30° 方向の成分が、周辺からの寄与によって補間されていることがわかる。 Fig. 7(c)は 90° 方向の計算結果である。

Fig.8 に全12方位の結果の総和を示す。遮蔽された曲線のエッジ部分が、周辺部の寄与によって補間されおり、全体として欠落のないディスクのエッジが確認できる。

3.3 第3ステージの結果

Fig.7 に 0° , 30° , 90° の各方向に対するシミュレーションの結果を示す。 Fig. 7(a)は 0° 方向の計算結果である。左側に大きく反応が広がっているのに対し、右側では遮蔽されている部分の寄与が無いために、反応の広がり小さい。 Fig.

3.4 自然画像への適用

Fig.9 に自然画像への適用例を示す。 Fig. 9(a)

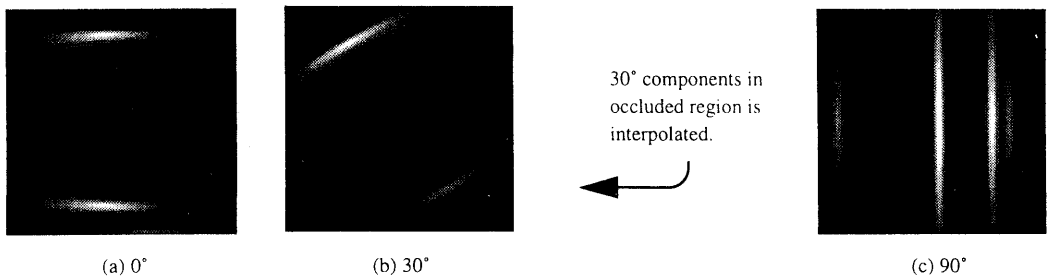


Fig.7 Result of interpolation

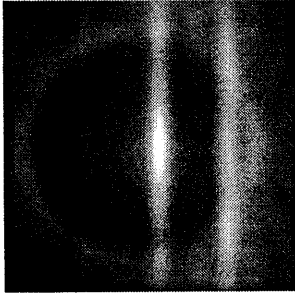


Fig. 8 Summation over all orientations

が入力画像であり、電気スタンドの笠の部分で窓枠越しに写したもので、Fig. 4(a)とほぼ同じ状況となっている。Fig. 9(b)がシミュレーションの結果であり、エッジの補間が確認できる。

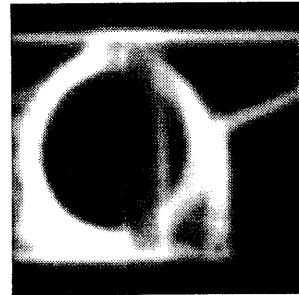
Fig. 10とFig. 11に別の自然画像への適用例を示す。Fig. 10(a)の入力画像はCD-ROMがMOディスクを遮蔽している状況を写したものである。Fig. 10(b)がシミュレーションの結果であり、遮蔽されたMOディスクの直線エッジ部分が補間されていることがわかる。また、Fig. 11(a)は逆にMOディスクがCD-ROMを遮蔽している状況を写したものである。結果はFig. 11(b)に示すとおり、CD-ROMの内円のエッジは補間されているものの、CD-ROMの外周エッジの補間は行われていない。これは、(1)遮蔽されている領域が広すぎるために、interpolation cellの空間的受容野では、遮蔽されていないCD-ROMのエッジ部分をカバーできないことと、(2)遮蔽されたエッジ部分を挟むCD-ROMのエッジの方向が、互いにほぼ直角であるために、方位成分からの寄与が少ないことに起因すると考えられる。

一方、Fig. 11(a)の画像を人間が見るときには、遮蔽されたCD-ROMの外周エッジが存在しているように感じる事が可能である。これは、視覚系の補間機能が、interpolation cellの持つ補間機能よりも高度で柔軟であることを示しているものと思われる。

4. むすび

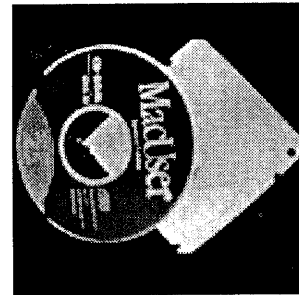


(a) Input image

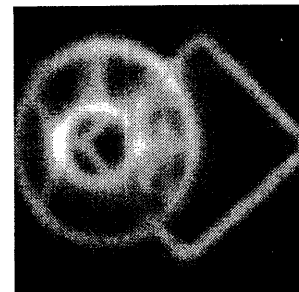


(b) Interpolated image

Fig. 9 Application to a natural image (1)

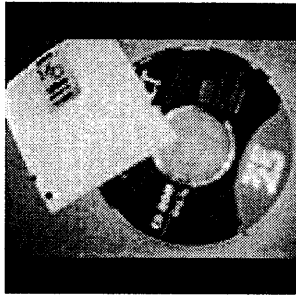


(a) Input image

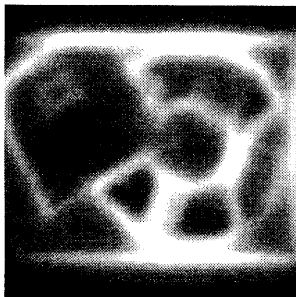


(b) Result

Fig. 10 Application to a natural image (2)



(a) Input image



(b) Result

Fig. 11 Application to a natural image (3)

(1)入力画像のエッジ検出, (2)各位置での有効な方位成分の抽出, (3)空間的受容野と, 最適方位を連続的に変化させて分布している第1次視覚野上の細胞群の両方から入力を受ける interpolation cell の3つのステージからなる, 遮蔽されたエッジの視覚的補間モデルの概要について述べた. そしてシミュレーションの結果, このモデルによって遮蔽された曲線のエッジが補間されうることを示した.

本稿で報告した研究では, 遮蔽されたエッジの補間メカニズムに注目したが, 視覚系の行うオブジェクトセグメンテーションの機能を解明するために今後に残された課題として, (1)遮蔽された領域の補間と, (2)遮蔽によって分割された要素のオブジェクトごとへの統合があげられる.

遮蔽された領域の補間については, 主観的輪郭の知覚にとまって起きる輝度変化や透明視, ネオンカラーズブレッディングなどの視知覚現象とも強く関連していると思われる.

オブジェクトへの統合問題では,

- ・遮蔽されていないエッジや面
- ・補間された遮蔽部のエッジや面

のそれぞれが, 遮蔽側オブジェクト, 被遮蔽側オブジェクトのどちらに帰属するかを, 視覚神経系がどのように決定しているかを明らかにする必要がある.

今後, これらのメカニズムを解明していく上で, 心理物理学の実験による検証も行いながら研究を続ける予定である.

参考文献

- 1) Adelson, E. H. & Bergen, J. R., "Spatio-temporal energy models for the perception of motion," *Journal of the Optical Society of America A*, 2, pp. 284-299, 1985.
- 2) Blasdel, G. G., "Orientation selectivity, preference, and continuity in monkey striate cortex," *J. Neurosci.*, 12, pp. 3139-3161, 1992..
- 3) Blasdel, G. G. & Salama, G., "Voltage-sensitive dyes reveal a modular organization in monkey striate cortex," *Nature, Lond.* 321, pp. 579-585, 1986.
- 4) Heitger, H., Rosenthaler, L., von der Heydt, R., Peterhans, E. & Kübler, O., "Simulation of Neural Contour Mechanisms: from Simple to End-stopped Cells," *Vision Research*, 32, pp. 963-981, 1992.