

予測形を用いた二重造影像の胃領域輪郭抽出

喜多 泰代

電子技術総合研究所

胃X線二重造影正面像から胃領域の輪郭を高精度に自動的に抽出する手法について述べる。二重造影像の胃領域輪郭抽出は非常に困難であるので、同一胃の異種X線像(立位充満正面像)から得た胃領域の予測形を利用する。まず、予測形を二重造影像の輪郭らしい部分に最もよく重なるように位置合わせし、さらに輪郭らしい部分に近付くように変形して、大まかに胃領域輪郭を推定する。この結果は良好であるが分解能が低いので、推定された輪郭の近傍で局所処理を行うことにより、高分解能で正確な輪郭を抽出する。X線像13例で実験を行った結果の考察も述べる。

EXTRACTION OF STOMACH CONTOUR IN DOUBLE CONTRAST RADIOGRAPH USING PREDICTED SHAPE

Yasuyo Kita

Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305 Japan

This paper describes a method for detecting the contour of the stomach region in a double contrast radiograph image. This method uses a predicted shape of the region obtained from a different type X-ray image of the stomach. First, a predicted shape is registered in a double contrast radiograph image so that the shape is close to possible lines for the stomach contour. Then the predicted contour is transformed such that the contour is closer to the possible lines. By local processing in the vicinity of the transformed contour, the stomach contour in the image is accurately extracted with high resolution. Stomach contours were well obtained for 13 actual double contrast radiograph images.

1. はじめに

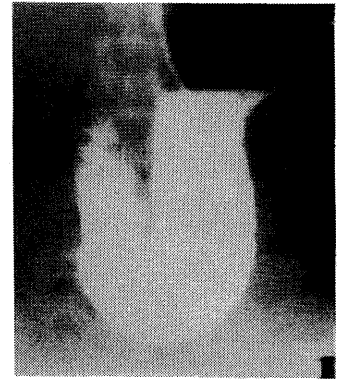
胃の集団検診では、被検者にバリウム溶液を飲ませ、身体の向き、バリウムの充満状態、カメラの位置などを変えて5、6枚のX線像を撮影する。計算機で自動診断を行うためには、各画像ごとに異常候補を検出し、その結果を統合解析する必要がある。X線像はバリウムが胃に充満した状態で撮影した充満像と、胃壁に少量付着した状態で撮影した二重造影像に大別でき、充満像は胃領域の輪郭に現れる異常、二重造影像は胃領域内部の異常を調べるのに用いられる。この両者は画像としての性格が大きく異なるため、計算機処理ではそれぞれ固有の手法が考案されてきた。

二重造影正面像（以下、二重造影像と略す）では、図1(a)のように付着したバリウムによって胃壁のしわや胃領域の輪郭が明るい線として現れる。この画像の診断は、胃領域内の明るい線、すなわち胃壁のしわの状態から行われる。このためにまず画像から胃領域を抽出する必要があるが、輪郭を表す線と背景とのコントラストが必ずしも強くなく、さらに紛らわしい線が多く存在するため、輪郭抽出は非常に難しい。このような場合、抽出すべき形状があらかじめ与えられていれば、それを参照することにより、正しい輪郭抽出が可能となる。しかし、胃の形は個人差が大きく、あらかじめこの形状を与えることができない。

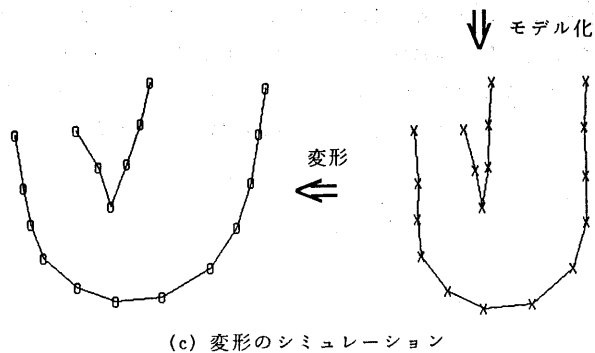
そこで、比較的輪郭が容易に抽出できる立位充満正面像（以下、立位充満像と略す、図1(b)）の胃領域抽出結果¹⁾をもとに、同じ胃の二重造影像の胃領域の形を予測して、これを二重造影像の輪郭抽出に利用することを考える。両画像は同方向から撮影されるが、図1(a),(b)を見てわかるように、胃は柔軟なので外力を受けて変形している。そこで、胃壁の弾性をばねでモデル化し変形をシミュレーションする²⁾。こうして図1(b)の輪郭抽出結果をもとに得られた図1(a)の胃領域の予測形を図1(c)に示す。X線撮影中に胃に作用するすべての力をシミュレーションしたわけではないので、得られた予測形は実際とは多少異なる。



(a) 二重造影正面像



(b) 立位充満正面像



(c) 変形のシミュレーション

図1 立位充満正面像から得られる胃領域予測形

本稿では、この予測形を利用し、二重造影像の胃領域を抽出する手法について報告する。まず、予測形が二重造影像の輪郭らしい部分にもっとも多く重なるように位置合わせをし、これをもとに予測輪郭線分を決定する。次に、この予測輪郭線分を動的輪郭モデル(snake)³⁾で表し、輪郭らしい部分により近づくように変形して、大まかな胃領域輪郭を推定する。この推定結果は、胃領域内部の異常を調べるためには十分であるが、分解能が粗いため胃領域輪郭付近の異常を検出するには不十分である。またまれではあるが、ノイズが非常に強い所や輪郭線のコントラストが極端に弱い所では間違えた推定結果がでる場合もある。そこで、この後、この推定輪郭の近傍で局所処理を行い、高精度に輪郭を抽出する。以下、予測輪郭線分の決定、大まかな胃領域輪郭推定、高精度輪郭抽出の順に述べる。

2. 予測輪郭線分の決定

2.1 二重造影像の白線度算出

二重造影像上で、予測形を輪郭である確率の高い所に

位置合わせし変形するための目安として、あらかじめ各画素の輪郭点らしさを求めておく。始めに述べたように、二重造影像では輪郭線は基本的に明るい線（以下白線と呼ぶ）として現れるので、輪郭点らしさとして各画素の白線度を算出する。抽出すべき領域の予測形が得られているため、その予測形と一致する方向を持つという条件で考慮すべき白線を制限できるので縦、横、右斜め、左斜めの4方向の方向別白線度画像（多値） W_k ($k=1\sim 4$, 方向を示す)を作成する。白線度の値は、方向別のマスク処理によって算出する。図2に図1(a)の縦方向の白線度画像を示す。

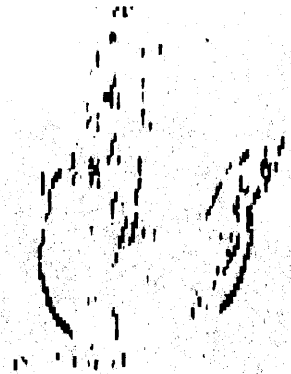
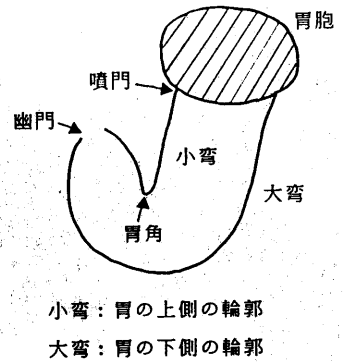


図2 図1(a)の縦方向の白線度画像



小弯：胃の上側の輪郭
大弯：胃の下側の輪郭

図3 胃の各部名称

2.2 予測輪郭の決定

文献2)で述べた手法では、胃内部のバリウム溶液に加わる重力によって、柔軟で固定されていない胃がどのように変形するかを予測した。しかし、実際には個人差によって幽門や噴門（図3参照）が固定されている場合もあり、このときは胃領域の左半分が右半分が変形せずに立位充満とほぼ同じ形となる。そこで、立位充満の胃領域（Oとする）と、変形予測後の胃領域（Tとする）、さらに右半分がOで左半分がT、右半分がTで左半分がOの4つの形を予測形候補とする。

各候補形を胃胞（図3参照）を目安に画像上に大まかに位置合わせした後、近傍で平行移動させて各位置での白線との重なり度 M を次に述べるように算出し、重なり度 M が最大となる形、位置での予測形を二重造影像の予

測輪郭とする。候補形と白線との重なり度 M は、候補形上の各代表点 p （図1(c)の o や x ）の白線との重なり度 m_p の総和とする。 m_p は、点 p が点 p における候補形接線方向の白線度の高い点に近いほど大きな値となるようにする。すなわち、点 p （二重造影像上での座標 (x_p, y_p) ）での候補形の接線方向を k_p としたとき、近傍の各点 $(x_p + \Delta x, y_p + \Delta y)$ に対して、

$$W_{k_p}(x_p + \Delta x, y_p + \Delta y) \cdot (1 - c_0 \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2})$$

を算出し、その最大値とする。ここで c_0 は定数 ($0 < c_0 < 1$)である。

図4に図1(a)の胃に対する予測輪郭を示す。ここでは左半分が立位充満の胃領域O、右半分が変形予測後のTである候補形が選ばれた。

2.3 予測輪郭線分の決定

二重造影像では明るい腸領域が胃に重なって、輪郭を隠している場合がある。このような状態を無視して、無

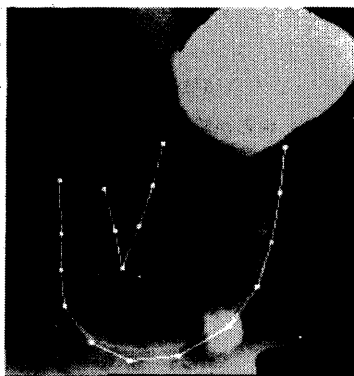


図4 位置合わせ後の予測形

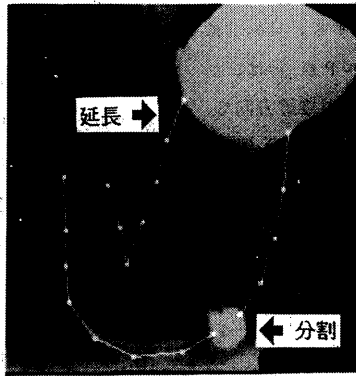


図5 予測輪郭線分

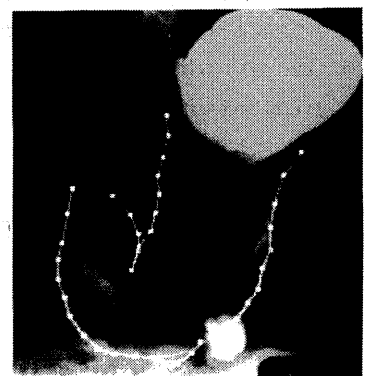
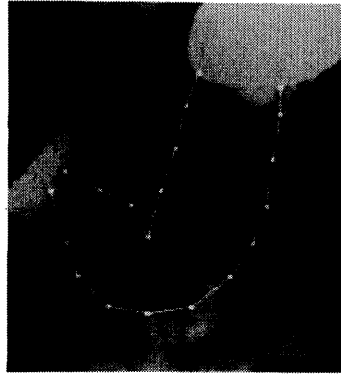


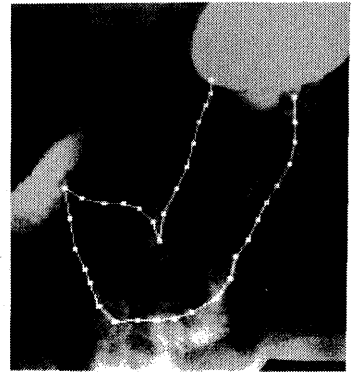
図6 大まかな胃領域輪郭推定結果



(a) 二重造影像



(b) 予測輪郭線分



(c) 大まかな胃領域輪郭推定結果

図7 輪郭推定を一部間違える例

理に輪郭を抽出しようとするすると誤った抽出結果となる。そこで、前もって予測輪郭上で二重造影像の明るい領域との重なりを調べ、その部分を探索すべき輪郭から削除しておく。また、立位充満像で得られる輪郭は二重造影像に現れる輪郭より欠けていることが多いが、胃脘近傍では容易に推定できるので、予測輪郭を延長しておく。これらの処理により、図4の予測輪郭から、図5の3本の予測輪郭線分が得られる。

3. 大まかな胃領域輪郭の推定

予測輪郭線分を動的輪郭モデル(snake)³⁾で表し、初期形状を保とうとする力と、二重造影像の輪郭線候補に重ならせようとする力との均衡を保つように、エネルギー最小化原理を用いて変形する。

輪郭線候補と重なるように動的輪郭モデルに外力を及ぼす場としては、予測輪郭線分と方向の一致する明るい白線に近い画素ほど絶対値の大きい負の値(安定状態)を持つように輪郭度ポテンシャルを計算する。具体的には、点 (i, j) における輪郭度ポテンシャル $P(i, j)$ は、 (i, j) に最も近い予測輪郭線分上の点 q での接線方向を k_q としたとき、白線度画像 W_{k_q} において、近傍の各点 $(i + \Delta i, j + \Delta j)$ に対して、

$$-W_{k_q}(i + \Delta i, j + \Delta j) \cdot (1 - c_1 \sqrt{(\Delta i)^2 + (\Delta j)^2})$$

の値を算出し、その最小値とする。ここで c_1 は定数($0 < c_1 < 1$)である。

各予測輪郭線分を表す動的輪郭モデルのエネルギーは、モデル上の各代表点を用いて、

[内部エネルギー] =

[隣接する各点間の距離の初期値からのずれの大きさの総和に比例する正のエネルギー] +

[各点における角度の初期値からのずれの大きさの総和に比例する正のエネルギー]、

と、

[外部エネルギー] =

[各点における輪郭度ポテンシャルの総和]

の和と定義する。この値が最小値をとるような各点の座標を逐次近似法で求めることにより、安定状態を得る。図5の予測輪郭線分を、この処理により安定状態まで変形した結果、図6のように胃領域輪郭が推定される。分解能が低いため、2本の輪郭線が近接している胃角部では輪郭の融合がみられるが、大まかな胃領域としては十分な結果が得られている。実際のX線像13例について実験を行ったところ、7例で同様に良好な結果が得られた。残り6例では一部輪郭が正しく得られなかった。図7にその一例を示す。図7(a)は原画像、図7(b)は予測輪郭線分、図7(c)が大まかな胃領域輪郭推定結果である。幽門側の大弯(図3参照)輪郭が暗いため、近傍の明るい白線を誤って推定している。このような間違いや、融合している輪郭線を高分解能で正確に求め直す処理を次節に述べる。以後、ここで推定した大まかな胃領域輪郭を推定輪郭と呼ぶ。

4. 高精度輪郭抽出

高精度に輪郭を決定するために、まず推定輪郭の近傍

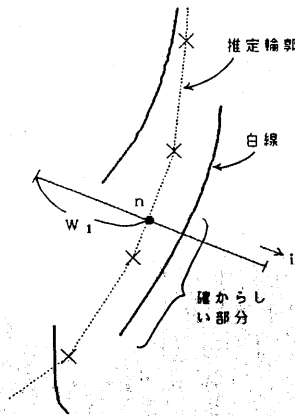


図8 確實線分の抽出

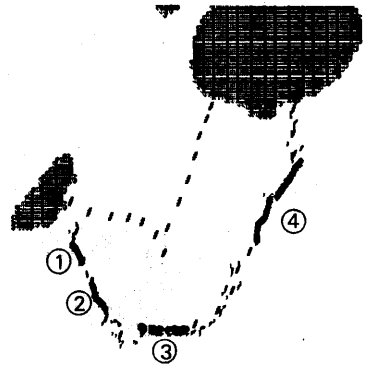
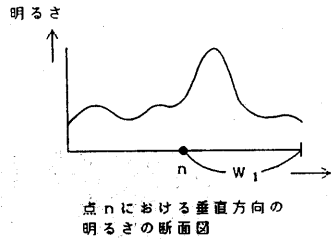


図9 図7の大湾部の確實線分

で、確からしい輪郭線分を抽出し、残りの部分はその延長上に探索する二段階の手法をとる。(以後、第一段階で抽出する確からしい輪郭線分を確實線分と呼ぶ。)

4.1 確實線分の抽出

推定輪郭の近傍で推定輪郭と同じ傾きを持つ白線が唯一存在するとき、これを確實線分として抽出する(図8参照)。このために、推定輪郭上の各点で、推定輪郭の垂直方向の明るさの断面図を幅 w_1 (推定輪郭の予測誤差)で調べ、明かなピークがただ一つある場合だけ、このピークを示す点を確實線分を構成する候補点とする。推定輪郭線上のすべての点でこの処理を行った後、候補点が連続(隣接候補点との距離が d_1 以下(d_1 は定数))する区間のうち、長さが一定の長さ(端点間の距離 d_2 (d_2 は定数))以上のものを確實線分として抽出する。図9に図7(a)の大湾部の確實線分を示す。確實線分には以降の処理のために推定輪郭に沿って番号が与えられる。

4.2 確實線分の延長

次に、輪郭が得られていない部分を、確實線分の延長上に次のように探索する。図10(a)に示すように、確實線分の端点をA、Aからの距離が d_3 の線分上の点をBとする。点Bの点Aに対する対象点を B' とし、線分 AB' 上の点Aに近い側の点から線分 AB' の垂直方向の明るさの断面図を幅 w_2 で調べ、ただ一つだけのピークがあれば、確實線分の点列に加える。 w_2 は、図10(a)に示すように、既に抽出された点からの距離に比例して決定する。この幅 w_2 は、4.1で用いた幅 w_1 より小さく設定するので、近傍に紛らわしい線が存在しても、延長上に白線を示すピークが存在すれば候補線分に加えられる。点 B' まで探索を終えた時点で、他の確實線分と交わらず、かつ、

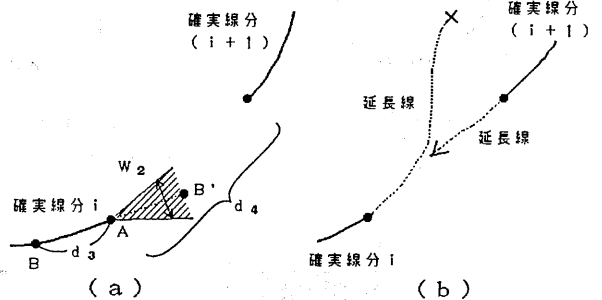


図10 確實線分の延長

予測到達距離(図10(a)中の d_4)を大きく越えておらず、さらに新たに点加えられているうちは新しい点を加えた確實線分で延長を続ける。図10(b)に示すように確實線分 i の延長で次の確實線分 $(i+1)$ と接続しない場合は、確實線分 $(i+1)$ から延長を行い接続を試みる。

図11に図9の確實線分の延長処理過程及び最終結果を示す。この画像は骨や腸、また胃内部のしわなど紛らわしい白線が多く推定輪郭の段階では大湾部の両端を間違えていたが、図11(a),(b)に示すようにより確かな輪郭を基準にして紛らわしい部分の輪郭を探索した結果、図11(c)に示すように正しく抽出し直されている。

4.3 推定輪郭形状を考慮した探索手順

推定輪郭が得られていることは、より確かな輪郭線分を抽出する際の指標となるだけでなく、輪郭抽出を間違いない易い部分を考慮できるという利点がある。例えば輪郭が図1(a)の胃角部のように近接して並ぶ場合、片方の輪郭を探索する時に隣りの輪郭を誤検出する恐れがあるが、このような部分に対して特定の探索手順をとることによ

り誤検出を避けることができる。この場合の探索手順を
 図12の例を用いて示す。推定輪郭は急曲点で分離し処
 理するので、小穹部は図12(a)の推定輪郭 m , $(m+1)$
 からなる。推定輪郭 m の処理では、まず近接部分を除い
 た残りの部分だけで确实線分の検出を行う(図12(b))。
 次に确实線分を延長することにより、正しい方の輪郭が

抽出できる(図12(c))。推定輪郭 $(m+1)$ の処理は
 既に得られた片側の輪郭の左側に探索領域が限定でき
 るので、図12(d)に示すように确实線分が検出され、それ
 を延長処理したのち(図12(e))、最終的には図12(f)
 に示すように、胃角部分においても正しく輪郭が抽出さ
 れる。

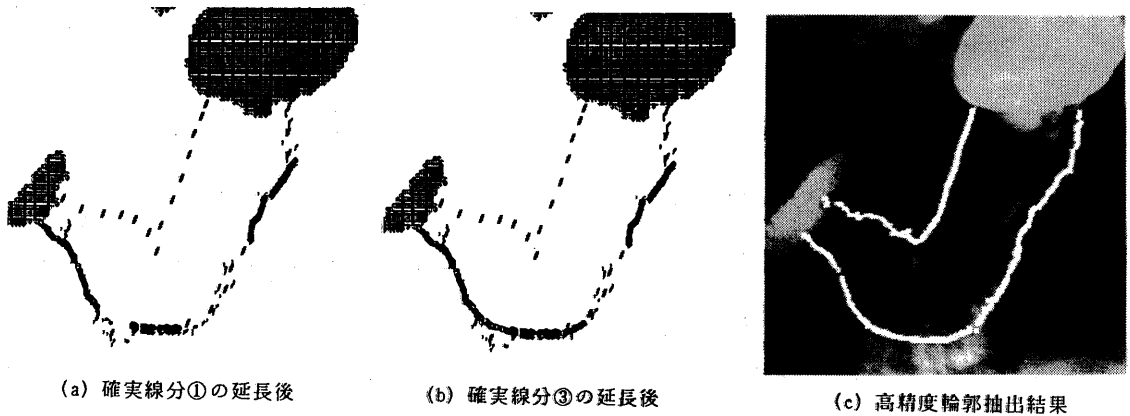


図11 図7(a)の高精度輪郭抽出結果

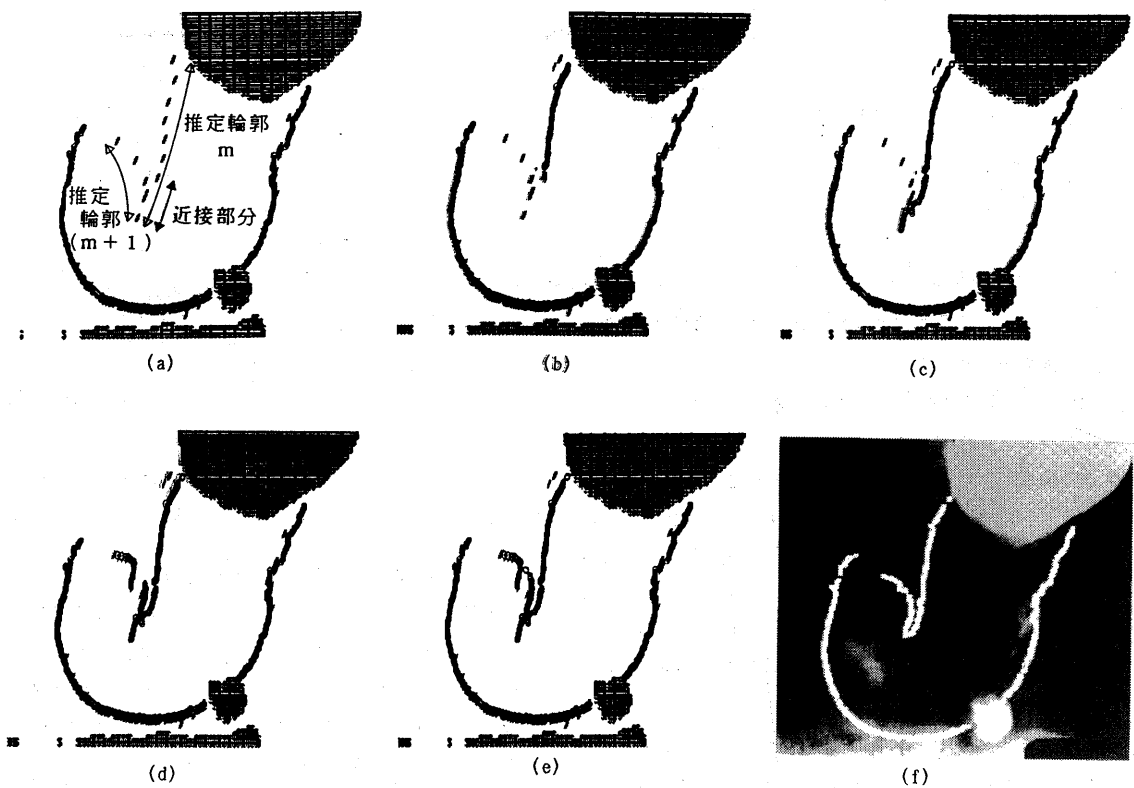


図12 図1(a)の高精度輪郭抽出結果

5. 輪郭抽出結果及び考察

実際のX線像13例に対して、以上述べた手法で高精度輪郭抽出を行った。このうち、3章で得られる推定輪郭のすべての部分に対して、高精度な輪郭が抽出されたのは6例であった。残りの7例では、輪郭が白線として現れていない部分が存在し、その部分が抽出されなかった。

図13の例では、小弯部幽門側が抽出されなかった。この部分では骨などの線がはっきりと現れているのに対して輪郭は白線として現れておらず、人が見ても輪郭抽出が不可能な場合である。このような場合、高精度輪郭が抽出されなかった部分に関しては推定輪郭の結果を組合せると良い(図13(c)点線部)。

図14は、予測輪郭線分決定時に明るい領域として抽出されなかった腸領域(大弯噴門側)が輪郭に重なっているために、その部分の輪郭が抽出されなかった。この場合、高精度輪郭が抽出されなかった部分に関して、推定輪郭の近傍の明るさの分布を調べれば、腸領域に隠されていることがわかる。

図15の例では、大弯部幽門側が極度に暗いため、白線度をもとに得た推定輪郭(図15(c))が正しい輪郭から大きくずれている。これをもとに高精度輪郭を抽出すると、図15(d)のように大弯部幽門側の輪郭が抽出されない。この場合、その部分に関して感度を上げて入力した画像(図15(e))をもとに処理し直すことにより図15(f)のように輪郭が抽出されることがある。

6. おわりに

立位充滿正面像から得られる二重造影正面像の胃領域の予測形を利用して、二重造影正面像の胃領域輪郭を高精度に抽出する手法を開発した。まず、二重造影正面像から得た白線度画像に、予測形を輪郭の方向性を重視して、位置合わせし変形することにより、大まかな胃領域を推定した。次に、この大まかな胃領域を推定輪郭として、その近傍で局所処理を行い、高精度な胃領域輪郭抽出を行った。推定輪郭の形状より、輪郭が間違えて得られ易いところ(急曲点、輪郭同士が接近している所など)をあらかじめ考慮した高精度輪郭抽出を行えたことと、推定輪郭の近傍で確実な輪郭線分をまず抽出し、その線分間を埋めていく探索手法を用いたことにより、紛らわしい線の多い画像からも正しい胃領域の輪郭を精度良く抽出することができた。さらに、高精度な輪郭が抽出不

可能な部分では推定輪郭を組み合わせて輪郭抽出結果とすることにより、多様なX線像に対処できる頑健な輪郭抽出手法となった。実際のX線像13例で実験を行い良好な結果を得ている。

X線像に限らず多様性のある画像から輪郭抽出を行う場合、本手法のように順次精度をあげて多段階にわたって輪郭を抽出して行くことが有効である。これにより、画一的な処理では不可能な、精度良く抽出できるところは精度良く、曖昧な部分は大まかな結果を得る処理が可能となり、実際的な結果が得られる。

本手法の胃領域抽出成功により、柔軟な胃の変形を考慮した個別の胃領域の予測形を用いることの有効性が実証された。また、非常に困難な二重造影像からの胃領域抽出が可能になったことは、自動診断の実用化に向けた大きな前進である。さらに、輪郭抽出と同時に、立位充滿像、二重造影像間での胃の部位の対応がとれるので、自動診断のために必須である複数X線像の統合解析に一步近付いたといえる。

今回扱ったX線像は、胃を同方向から撮影したものであるが、今後は異なる方向から撮影されたX線像間の対応を考えたい。

<謝辞>

胃X線像読影に関して御指導いただいた筑波大医学部福富久之教授、伊藤葉子医師に、また有益な御助言をいただいた阪大の白井良明教授に深謝いたします。知能システム部弓場敏嗣部長には研究の機会を与えていただき、大島正毅室長はじめ視覚情報研究室の皆様には日頃の有益な討論及び、良好な研究環境を提供くださり、感謝いたします。喜多伸之主任研究官には適切なアドバイス及び暖かい援助を与えていただきました。

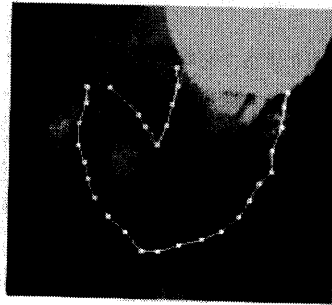
本研究の一部は厚生省がん研究助成金(1-49)による。

<参考文献>

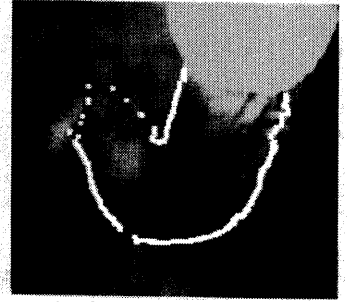
- 1) 喜多、白井：“胃X線立位充滿像からの異常候補の検出”、信学論(D), vol. J71-D, no. 11, pp. 2370-2380 (1988).
- 2) 喜多：“胃の2次元モデルによるX線像の胃領域形状の予測”、情報処理研究 vol. 60-5 (1989).
- 3) M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos.：“Snakes: Active Contour Models”, International Journal of Computer Vision, pp. 321-331 (1988).



(a) 二重造影像



(b) 大まかな胃領域推定結果

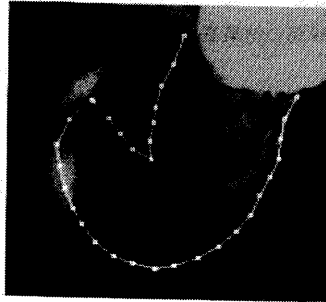


(c) 高精度輪郭抽出結果

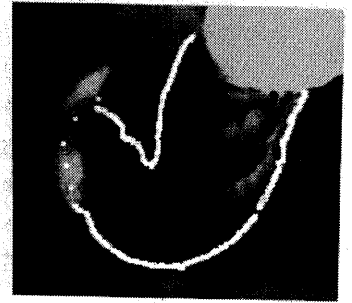
図13 高精度輪郭抽出結果(一部推定を含む例)



(a) 二重造影像



(b) 大まかな胃領域推定結果

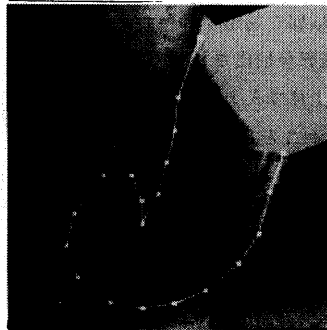


(c) 高精度輪郭抽出結果

図14 高精度輪郭抽出結果(明るい領域に重なる例)



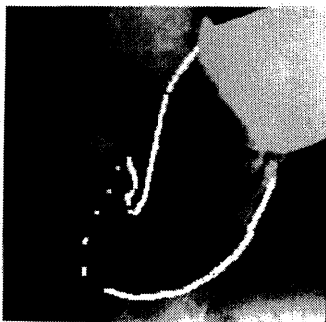
(a) 原画像



(b) 予測輪郭線分



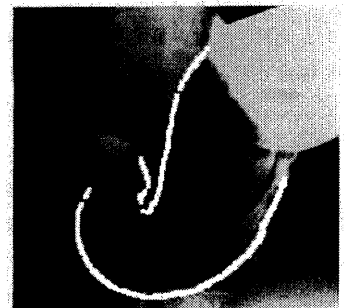
(c) 大まかな胃領域輪郭推定結果



(d) 高精度輪郭抽出結果



(e) 感度を上げて入力した画像



(f) (e)を利用した再抽出結果

図15 高精度輪郭抽出結果(暗い線を抽出できる例)