

胃の2次元モデルによるX線像の胃領域形状の予測

喜多 泰代

電子技術総合研究所

胃X線立位充満正面像での胃領域の形状から構成した2次元モデルをもとに、異なる手法で撮影された二重造影正面像での胃領域の形状を予測する手法について述べる。二つの画像はどちらも同じ角度から撮影されるが、撮影条件の違いにより胃に対してかかる力が異なるため、胃の形状が異なる。このため、まず立位充満正面像の胃領域の胃の上側の輪郭（小弯という）と下側の輪郭（大弯という）を長さや曲率を保とうとするばねでモデル化し、さらに大弯と小弯をばねで結合して柔軟性のある胃の鉛直断面モデルを作成する。このモデルに両画像間での胃にかかる力の差異を考慮した外力を加えて変形することにより、二重造影正面像での胃形状を予測する。約10例で実験を行い、良好な予測結果が得られた。

PREDICTION OF STOMACH SHAPE IN X-RAY IMAGES USING 2 DIMENSIONAL MODEL

Yasuyo Kita

Electrotechnical Laboratory

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

A method to predict stomach shape in double contrast radiograph(DCR) from one in barium filled stomach radiograph(BFR) is described. Although both of the images are taken from the same direction, the difference of barium quantity in stomach makes stomach deform. In order to simulate stomach deformation, flexible 2 dimensional model of stomach section is constructed using springs based on the shape in BFR. Some force which corresponds to barium gravity is added to the model and deform it to get the shape in DCR. Predicted shape is obtained well for actual 10 X-rays.

1. はじめに

胃の集団検診の普及に伴い、大量の枚数のX線像の処理に、計算機による自動診断が期待されている。胃の集団検診では、被検者にバリウム溶液を飲ませ、被検者の体の向き、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。通常の診断では、熟練した医師がこれらを一度に見比べながら異常箇所の有無を調べる。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る。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。

図1(a)の二重造影正面像(以下二重造影と略す)では付着したバリウムによって胃壁のしわや背景との境界の輪郭線が明るい線で現れる。自動診断のためには、まず画像からこの線をもとに胃領域を抽出して、その領域内のしわの状態から異常箇所を検出する必要がある。しかし、線と背景とのコントラストが弱く、さらに紛らわしい線が多く存在するため、胃の輪郭抽出は非常に難しい。

一方、我々は同方向から撮影した図1(b)の立位充満正面像(以下立位充満と略す)から胃領域を抽出する手法を既に開発している¹⁾。この結果から二重造影での胃の形が予測できれば、二重造影から胃領域を抽出する処理に有用である。

ただし、胃は柔らかな組織で変形するため、図1のように両者の間で形が異なる場合が多い。この主な原因は、二重造影では胃内部に空気が充満し胃壁のどこにも同じ力が加わっているのに対して、立位充満では胃の中にバリウム溶液を充満させ被検者が立った状態で撮影するので、胃はバリウム溶液の重さで下に引き延ばされることである。この力の影響を取り除くように変形すれば、二重造影での胃の形が予測できると考えられる。胃は円筒袋状の組織であるが、力の差異は

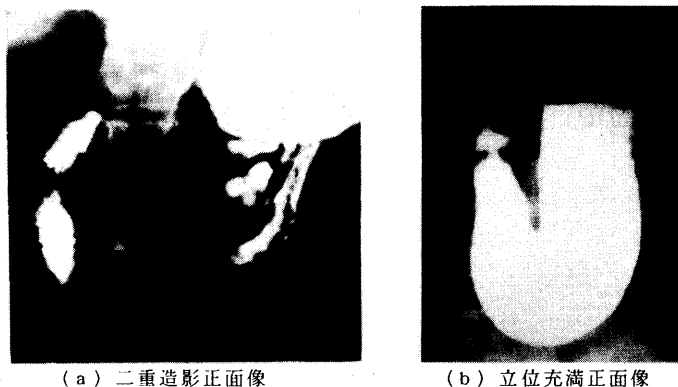


図1 同一胃の異種X線像

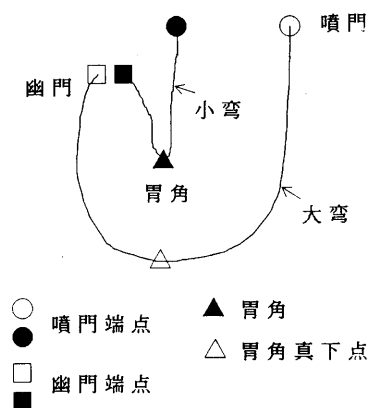


図2 胃の鉛直断面と特徴点

画像の二次元平面内の真下方向だけなので、二次元平面上の胃の輪郭の変形だけで処理できる。

本手法では、まず立位充満の胃領域をもとに、ばねを用いて柔軟性のある胃の鉛直断面モデルを作成する。このモデルに両画像間での胃にかかる力の差異を考慮した外力を加えて変形し、二重造影の胃の形の予測を行った。以下、胃の断面モデル、力の加え方、モデル変形算出法、実験結果と考察の順に述べる。

2. 胃の鉛直断面モデル

2.1 断面モデルの構成

胃領域の輪郭である大弯、小弯を直線で近似する。代表点は図2に示す胃の部位の特徴点を含むように選ぶ。胃壁は弾性の物質であるから、隣接点間の距離は

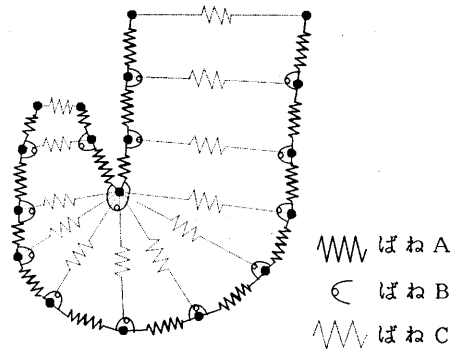


図3 胃の鉛直断面モデル

変化しうるが基本的には同じ長さを保とうとする。そこで、各点間はばねA (ばね定数 k_a) でつながっているとす (図3 参照)。さらに、二重造影、立位充満共に、内部からの圧力により胃壁が張っている状態なので、輪郭の滑らかさが保たれたままの変形であると考えてよい。そこで、図3 に示すように、隣接線分のなす角度の変化に対して逆向きのトルクが働くようなばねB (ばね定数 k_b) を考える。この2種類のばねの強さは胃の輪郭の変形しやすさを表す。このモデルはKassら²⁾によるスプラインに力の場をかけてその連続性を保たせながら変形するsnakeモデルとよく似ている。ここでは立位充満の時の輪郭の長さ、滑らかさをできるだけ変えないようにばね定数 k_a 、 k_b を決定する。

さらに胃は円筒袋状の組織であり、小弯と大弯は実際には胃壁でつながっているので、小弯側と大弯側の最も距離の近い点間をばねCで連結する(図3参照)。

各ばね定数は単位長さあたりのばね定数 k が同じとなるよう定める。

2.2 モデル作成手順

文献1)の手法で得られる立位充満の胃領域の小弯、大弯の輪郭点列と6点の特徴点(図2参照)から、2.1で述べたモデルを形成する具体的手順を、図4を用いて説明する。

(1)小弯上から代表点を選び、その対応点を大弯上から選ぶ(図4(b))。

(1-1)小弯上の代表点を約50点間隔で特徴点を含むように選ぶ。

(1-2)噴門端点間、胃角と胃角真下点、幽門端点間をそれぞれ結合する。

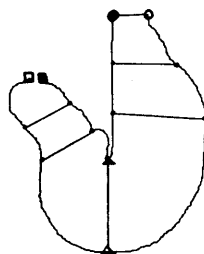
(1-3)残りの小弯代表点からひいた法線と、大弯との交点をそれらのペアの大弯代表点とする。

(2)大弯下部で代表点間の間隔が広がるので、胃角真下点前後の点の間隔が、約50点間隔になるように、代表点を追加する(図4(c))。これらは胃角のペアとする。

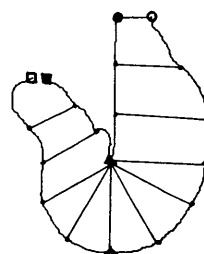
(3)立位充満では、図4(a)の例のように、バリウム不充満が原因で、大弯噴門側の胃が縮んだ状態で細くなっている場合が多くある。モデルを胃壁が張った状態で作成するため、噴門側が細くなっている場合、次のように設定する。胃角とペアの大弯の代表点のうち一番噴門に近いものとの距離を噴門側の幅 W とし、それより噴門側で短い距離のペアがあれば、距離を W に大弯外側に延長し、大弯代表点を修正する(図4(d))。



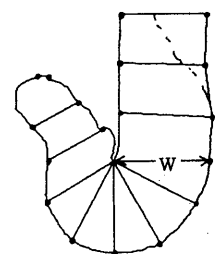
(a)立位充満正面像



(b)



(c)



(d)

図4 鉛直断面モデル作成例

3. 力の加え方

立位充満では図5に示すように、大弯の接線が水平に近い部分ほど胃内部のバリウム溶液の重力を大きく受けていて、胃が下に引き延ばされている。この大弯の水平部分にかかる力の影響を取り除くために、立位充満の状態を外力0の平衡状態として、大弯の鉛直な部分に図5の矢印方向に外力を加える。具体的には大弯側の各点に外側法線方向に働く力、

$$|F| = f_0 (1 - \cos \theta)$$

を加える。ただし、 θ は各点の接線が水平となす角度、 f_0 は定数である。小弯側では外力は加えないが、大弯部とばねでつながっているので大弯の変形に伴って力が加わる。

4. 変形過程の算出

2. で作成したモデルの大弯代表点系、小弯代表点系それぞれの系に外力が加わったときの各点での力のつりあいの式を解く。3. で述べた大弯代表点に加える力Fの他に、大弯小弯間のばねによる力も外力として扱う。外力を受けて点が移動するときの速度を制御するために、緩衝係数 γ を導入する。時刻 t での各点 i の位置を $(x_{i,t}, y_{i,t})$ 、各点に加わる外力を

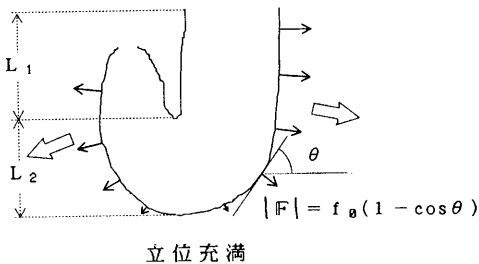
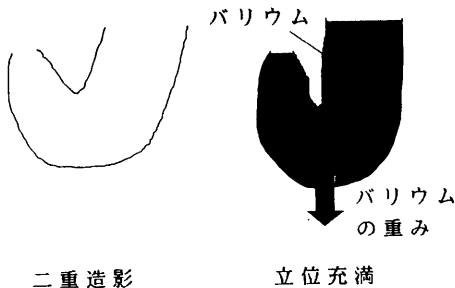


図5 力の加え方

$(f_x(x_{i,t}, y_{i,t}), f_y(x_{i,t}, y_{i,t}))$ 、点 i と $(i-1)$ の距離を $l_{i,t}$ 、点 i での輪郭の角度を $\theta_{i,t}$ 、それぞれの初期値を $l_{i,0}$ 、 $\theta_{i,0}$ とすると、各点の x 方向のつりあいの式は、

$$\begin{aligned} & -\alpha_{i,t} (x_{i,t} - x_{(i-1),t}) \\ & + \alpha_{(i+1),t} (x_{(i+1),t} - x_{i,t}) \\ & + \beta_{(i-1),t} (x_{(i-2),t} - 2x_{(i-1),t} + x_{i,t}) \\ & - 2\beta_{i,t} (x_{(i-1),t} - 2x_{i,t} + x_{(i+1),t}) \\ & + \beta_{(i+1),t} (x_{i,t} - 2x_{(i+1),t} + x_{(i+2),t}) \\ & + f_x(x_{i,t}, y_{i,t}) + \gamma dx_{i,t} / dt = 0 \end{aligned}$$

$$\alpha_{i,t} = k_a (l_{i,t} - l_{i,0}) / l_{i,t}$$

$$\beta_{i,t} = k_b (\theta_{i,t} - \theta_{i,0}) / d_{i,t}$$

$$d_{i,t} = \sqrt{(x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})^2}$$

である。ここで、 γ を大きな負の値とすると、 Δt 間の点の移動は微小なので、 $f_x(x_{i,t}, y_{i,t}) \approx f_x(x_{i,t-1}, y_{i,t-1})$ が成り立ち、

$$Ax_t + f_{x,t-1} = -\gamma (x_t - x_{t-1})$$

$$x_t = \begin{pmatrix} x_{1,t} \\ x_{2,t} \\ \vdots \\ x_{n,t} \end{pmatrix} \quad f_{x,t} = \begin{pmatrix} f_x(x_{1,t}, y_{1,t}) \\ f_x(x_{2,t}, y_{2,t}) \\ \vdots \\ f_x(x_{n,t}, y_{n,t}) \end{pmatrix}$$

となる。ここでAは5重対角行列である。y方向についても同様である。これより、

$$x_t = (A + \gamma I)^{-1} (x_{t-1} - f_x(x_{t-1}, y_{t-1}))$$

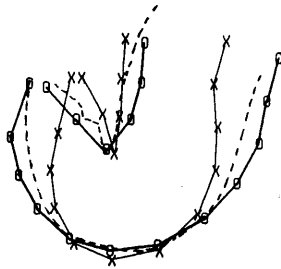
$$y_t = (A + \gamma I)^{-1} (y_{t-1} - f_y(x_{t-1}, y_{t-1}))$$

として、次のように逐次解を求めることができる。

①時刻 t における大弯の各点にかかる外力(Fと時刻 t の大弯、小弯間のばねによる力の和)を求め時刻 $(t+1)$ の大弯の各点の位置を算出する。

②時刻 t における小弯の各点にかかる外力(時刻 $(t+1)$ の大弯、時刻 t の小弯間のばねによる力の和)を求め時刻 $(t+1)$ の小弯の各点の位置を算出する。

①、②を繰り返し、両者を少しずつ交互に変形していく。周りの臓器からの力などもモデル化すれば、つりあう位置が存在するだろうが、これは個体差が大き



x—x 立位充満正面像から作成したモデル
 ●—● 変形後の胃のモデル
 - - - - 二重造影正面像から人が抽出した胃の形

図6 図1の胃に対する変形結果例(変形結果例その1)

く求めることが不可能であるので、適度な回数だけ繰り返し停止する。立位充満で胃の下部にバリウムが多く溜っているときは変形が大きいため、図5中の L_1 、 L_2 を用いて $100 \times L_2 / L_1$ 回繰り返すこととした。

5. 実験結果

$k_a = 50$ 、 $k_b = 10$ 、 $k_c = 100$ 、 $\gamma = -100$ で、10例について実験を行い、6例で二重造影での胃の形とほぼ重なる結果が得られた。図6は図1の胃に対する結果で、このうちの1例である。ほぼ重なる結果のもう一例を図7に示す。

うまく重なった6例のうち、2例に関しては、図8に示すように、モデルが二重造影の輪郭の全部を予測できていない。これは立位充満正面像で抽出される胃領域はバリウムの充満している部分だけであることが原因である。

重ならない部分がある4例のうち1例は立位充満での胃の形が二重造影の形とほぼ同じで、変形する前の方が近い形であった。残り3例は胃を胃角で左右に2分した半分はほぼ重なり、残り半分は原型の方が近いという結果であった。図9にこの例を示す。これら4例の原因として、背景の組織によって一部の部位が固定されていて部分的に変形が起きないことが考えられる。

しかし、一部モデルが欠けている場合もずれのある場合でも、二重造影内のエッジと組み合わせればモデルとして十分参照できる。約6割でほぼ重なる形が得られていることとあわせ考えると、この予測形状は二

重造影正面像から胃領域を抽出するために非常に有用と思われる。また、異なる被検者に対しても同じ k_a 、 k_b 、 k_c の値を用いて予測できるので、立位充満の処理から二重造影の胃の予測までのすべての処理を自動的に行える。

6. おわりに

立位充満正面像から得られる胃鉛直断面の輪郭をその長さ、滑らかさを保つようなモデルで表し、力を加えて変形させて二重造影正面像の胃の形の予測を行い、有望な結果を得た。こうして得られた予測輪郭は、処理が難しい二重造影像からの胃領域抽出の際のモデルとして有効である。また胃X線像の自動診断のためには、各画像を統合解析する必要があるが、このモデルを用いれば両画像間での胃の対応をとることができる。現在はこの予測形をモデルとして用いて二重造影正面像から胃領域を抽出する手法の開発を行っている。

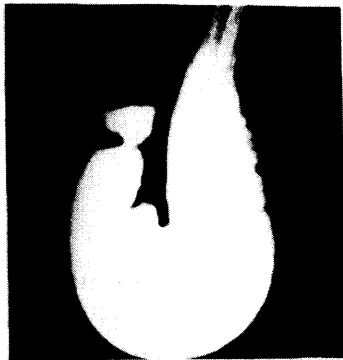
今回扱った画像は、胃を同方向から撮影したものであるが、今後は異なる方向から撮影された画像間の対応も考えたい。このためには胃の柔軟性を考慮した3次元モデルの構築が必要であると思われる。

<謝辞>

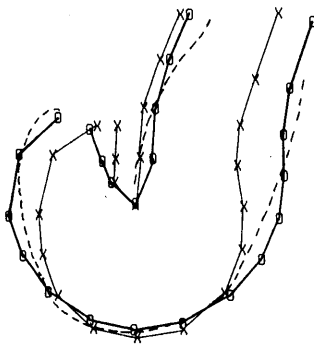
胃X線像読影に関して御指導いただいた筑波大医学部福富久之教授、伊藤葉子医師に感謝いたします。また日頃有益な御助言をいただいている阪大の白井良明教授に感謝いたします。研究の機会を与えてくださり、ご支援をいただいた電総研知能システム部の弓場敏嗣部長および視覚情報研究室の大島正毅室長に感謝いたします。日頃有益な討論をいただいている視覚情報研究室の皆様にも感謝いたします。適切なアドバイス及び暖かい援助を与えてくれる喜多伸之主任研究官に感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 喜多、白井：”胃X線立位充満像からの異常候補の検出”、信学論(D), J71-D, no. 11, pp. 2370-2380(1988)
- 2) Kass, M., Witkin, A., and Terzopoulos, D. : "Snakes: Active Contour Models", International Journal of Computer Vision, pp. 321-331(1988).



立位充滿正面像



x—x 立位充滿正面像から作成したモデル
 o—o 変形後の胃のモデル
 ----- 二重造影正面像から人が抽出した胃の形

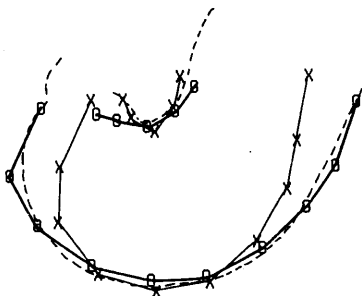


二重造影正面像

図7 変形結果例その2 (ほぼ重なる例)



立位充滿正面像



x—x 立位充滿正面像から作成したモデル
 o—o 変形後の胃のモデル
 ----- 二重造影正面像から人が抽出した胃の形

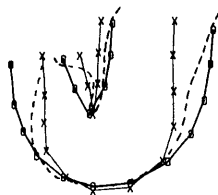


二重造影正面像

図8 変形結果例その3 (一部欠ける例)



立位充滿正面像



x—x 立位充滿正面像から作成したモデル
 o—o 変形後の胃のモデル
 ----- 二重造影正面像から人が抽出した胃の形



二重造影正面像

図9 変形結果例その4 (一部ずれのある例)