Digital Radiography による喉頭の Motion Subtraction 画像処理

熊川 孝三, 宮川 晃一

Motion Subtraction of the Larynx Using Digital Radiography

Kohzoh Kumakawa, M.D., and Kouichi Miyakawa, M.D.

Department of Otolaryngology, Toranomon Hospital, Tokyo

The development of digital radiography (DR) has made it possible to analyze the contour of the laryngeal soft tissue structures in more detail than the conventional screen-film method. The authors first used the DR system for time subtraction of the larynx during inspiration and phonation.

The images are acquired by means of frontal tomography of the larynx using the imaging plate during inspiration and phonation separately, and stored into the memory of the DR system. The thickness of the slices is 5.0 mm. Time subtraction between the mask image during inspiration and the live image during phonation is performed using digital processing on CRT. Superimposing the two images at the upper trachea and the thyroid cartilage of the same depth, makes it possible to measure movement of the vocal cord and false vocal cord quantitatively in three dimensions. The authors named this time subtraction as motion subtraction of the larynx.

This motion subtraction image can be obtained by on-line digital processing without complicated development technique, but has so high spatial resolution. This image processing seems to be useful in functional radiographic analysis of laryngeal diseases.

Key words : digital radiography, motion subtraction, larynx

I. はじめに

近年の半導体技術の進歩により、高速演算化と大容量の画像記憶が可能となった。これに伴い、膨大な画素数の高速処理が必要なデジタル画像処理システムの開発が急速に発展しつつある。とくにサブトラクション、重ね合わせなどの画像処理がきわめて容易になったことは、デジタル化の最大の利点と考えられる。

筆者ら^{1,2)}はすでにデジタル撮影法 digital radiography (DR) を用いた喉頭の X 線撮影における階調処理、周波数強調処理の有用性について報告し、また、一回曝射によるエネルギーサブトラクション処理によって、これまで診断価値が少ないとされてきた喉頭の正面単純撮影の診断能を格段に向上させようことを報告した。

さらに今回は、時間的に異なる喉頭の画像間でデジタル処理によるサブトラクションを行った。これまでこのような画像処理の報告はなく、これを喉頭の motion subtraction (MS) 画像処理と命名した。この新しい画像処理の方法

虎の門病院耳鼻咽喉科

別刷請求：〒105 東京都港区虎ノ門2-2-2

虎の門病院耳鼻咽喉科 熊川孝三

投稿受付：1989年5月23日

を中心に述べ、その臨床応用の可能性についても言及する。

II. 方 法

1. DR の原理

使用した DR は Fuji CR-101 システムである。その詳細は高野³⁾、蜂谷ら⁴⁾の論文に述べてあり、ここでは基本的な原理と特徴について述べる。X 線撮影装置は従来の装置をそのまま使用するが、従来の X 線フィルム増感紙の代わりに薄いポリエステル板にハロゲン化物結晶を塗布したイメージングプレート (IP) と呼ばれる検出器を使用する。IP は従来のフィルムと同様にカセットに入れて撮影に用いる。IP は画像読み取り装置で、径 100 μm という微小なレーザースポット走査を受け、蓄えられた X 線エネルギーが励起され読み取られる。これが高い空間分解能をもつ理由の一つである。その出力は AD 変換された後、コンピュータによって種々の画像処理を受け、診断目的に合った最も見やすい画像を作り出すことができる。映像信号は内蔵の磁気メモリーに記憶される。処理された画像信号は画像記録装置でフィルムにレーザースポットで書き込まれる。

2. 撮影条件

喉頭の前額断層撮影を行う。撮影台上の患者の体位は仰臥位とし、下顎を前方に突出させて前頸部をやや進展させ、安静吸気時と、母音 /イ/ の持続発声時に撮影した。前頸部皮膚面より頸椎方向に向かって 5 mm 間隔で 10~30 mm まで撮影した。X 線断層撮影装置は、日立 DH-185 を用いた。管球移動は直線軌道 (最大角 40 度)、焦点-フィルム面距離は 130 cm、撮影電圧は 100~120 kVp、電流は 10~40 mA、撮影時間 0.5 秒である。撮影された IP は Fuji CR-101 で画像処理され、磁気メモリーに記憶された。

3. レジストレーションと減算処理

方法の原理は時間差のある 2 枚の画像間で減算することである。ここでは喉頭内腔の発声時の形状変化をとらえる目的で、安静吸気時の像をマスク像、発声時像をライブ像として 2 枚の画像間で減算処理を行った。減算処理に用いる画像は同一深度の断面とした。マスク像に比べて発声時に新たに動きのあった部分は黒く、移

動した部分は白く、動きのなかった部分は黒と白の合わさった、すなわち灰色として描出されるように合成減算画像のコントラストをつけた。

吸気時から発声時に移ると喉頭および気管上部は頭側に移動し、声帯、仮声帯は内転し、声門下腔の形状も変化するが、輪状軟骨以下の気管腔の形状はほとんど変化しないことが武馬ら⁵⁾、広戸ら⁶⁾によってすでに指摘されている。筆者らは彼らの方法にさらに改良を加え、2 枚の画像の上部気管腔ならびに甲状軟骨像が一致するように CRT 上で重ね合わせを行った。この結果、上下方向、側方向、そして前額面の同一深度という 3 次元で喉頭のフレームワークのレジストレーションを行ったことになり、喉頭内腔のある部分での運動量を単独に計測することができるわけである。

このレジストレーションを行うにあたって喉頭の上方向移動が小さい場合は CR-101 によるオンライン処理が可能である。移動が大きい場合には、いったんフィルム上に断層像を書き込み、それを Angio-Imager YKO 3000 に乗せ、用手にて CRT 上で減算処理した。ただし後者の場合にはこの装置の画像マトリックスが 640×512 であるので、前者の場合に比べて空間分解能が低下することと、オンライン処理ではないという欠点をもつ。

III. 実際の MS 画像

1. 正常例

図 1 は正常例の安静吸気時像、発声時像、そして両者の間で減算処理を行った MS 画像である。すべて前頸部皮膚面から 20 mm の断層面である。吸気時には両側の仮声帯と声帯は外転し、喉頭内腔は弓状の線を描いている。発声時には両側の仮声帯、声帯が正中まで内転し、梨子状窩が開いている。MS 画像では発声時に内転した両側の仮声帯と声帯は黒く描出され、開いた梨子状窩は白く描出されている。気管腔と甲状軟骨の重ね合わせの状態から 2 枚の画像のレジストレーションがうまく行われているのがわかる。

2. 異常例

ここでは 3 例の反回神経麻痺症例を呈示す

図1 正常例
左：安静吸気時像，中央：発声時像，右：motion subtraction 像。

図2 左反回神経麻痺症例
左：安静吸気時像，中央：発声時像，右：motion subtraction 像。

る。

症例1 図2は左反回神経麻痺症例である。吸気時には健側（右）の仮声帯と声帯は外転し喉頭内腔は弓状の線を描くが、患側（左）のそれらは内転したままの状態である。発声時には右の仮声帯と声帯が内転する。仮声帯はむしろ過内転ぎみである。左の声帯の厚みはそれほど

減少しておらず、萎縮は軽度と推定される。ただし左声帯の声門下壁への移行角度は鈍角化している。

MS画像では発声時に内転した右の仮声帯と声帯が黒く描出されているが、患側のそれらはコントラストとしては灰色として描出され、吸気時から発声時に移ってもほとんど動きがなか

図3 左反回神経麻痺症例
左：安静吸気時像，中央：発声時像，右：motion subtraction 像。

図4 右反回神経麻痺症例
左：安静吸気時像，中央：発声時像，右：motion subtraction 像。

ったことがわかる。この MS 像は典型的な一側反回神経麻痺症例のそれである。

症例 2 図 3 は左反回神経麻痺症例である。吸気時，発声時の形状は症例 1 とほぼ同様であるが，異なる点は麻痺側の喉頭室が吸気時よりも狭くなっていることである。MS 画像では右

声帯，仮声帯の内転が黒く，開いた右梨子状窩が白く描出されているとともに，左声帯では吸気時の位置（白い部分）の頭側に黒く描出される部分が生じていることがわかる。これは声帯辺縁でより明らかである。したがって発声時に喉頭室が狭く見えた理由は麻痺声帯が挙上され

たためと考えられる。さらに MS 画像で吸気時の麻痺声帯と、発声時の健側声帯とを比べてみると両者のレベル差はあまりないが、発声時の麻痺声帯は健側声帯よりも明らかに高位であり、レベル差が生じている。したがってこの場合の声帯のレベル差は発声に伴って生じたものであるといつてよい。

症例 3 図 4 は右反回神経麻痺である。吸気時には左仮声帯と声帯は外転しているが右のそれらは内転したままである。発声時にはこの症例でも喉頭室が狭くなっている。MS 画像では左仮声帯と声帯の内転が黒く、開いた左梨子状窩が白く描出されているとともに、この症例でも発声時に麻痺声帯が挙上し軽度外転したことが認められる。症例 2 と同様、吸気時の麻痺声帯と発声時の健側声帯とは同じ高さにあり、発声時のレベル差（右声帯の高位）は発声動作によって引き起こされたものであることが MS 画像からわかる。

なお症例 2, 3 でみられた麻痺声帯の発声時挙上現象は、筆者らが検討したところでは麻痺声帯の萎縮例に有意に多く認められた。さらに、このような症例のうち吸気発声が可能な症例では、麻痺声帯が逆に尾側へ低下する現象が認められるものもあった。以上の結果から筆者らは、この現象は振動体としてのマスとスティフネスが減少した麻痺声帯が、発声に伴う空気力学的な力によって挙上された、いわば吹き上がり現象ではないかと推測している⁷⁾。

IV. 考 按

声帯の運動を X 線学的に前額面から観察するいくつかの方法が報告されているが、喉頭の前後像では頸椎陰影の重なりがあることから、これを除外するために何らかの工夫が必要となる。このために従来行われてきた検査法は基本的には、①高圧 X 線高速度映画撮影^{8,9)}、②声帯内マーカー刺入後の X 線ストロボコピー¹⁰⁾、③喉頭造影処置後の撮影^{5,6)}、④時間経過の異なる断層撮影¹¹⁻¹³⁾、のいずれかに分類されるとしてよい。

このうち①、②は主として声帯運動の振動現象を解析しようとするものであり、研究的手法としての性格が強く、一般臨床に応用されるま

では至っていない。③は武馬ら⁵⁾、広戸ら⁶⁾のラリンググラム重ね合わせ法に代表される。この方法は喉頭造影後に吸気時と発声時の正面ラリンググラムを撮影し、トレーシングペーパーに用手トレースし、それを重ね合わせて観察する方法である。この方法における独自の点は、吸気時から発声時に移ると喉頭は頭側に移動するが、輪状軟骨の下縁以下の気管腔の形状はほとんど変化せず、したがって両者の気管腔を一致して重ね合わせれば喉頭内腔、とくに声帯の運動量を計測することができる点である。反面、喉頭造影処置が必要なために気道狭小例では適応に制限があること、造影剤による副作用の問題があること、さらに喉頭の全体像が前後像として投影された像であるために、声帯膜様部の動きを単独に観察できないこと、などの短所もあった。

一方、従来のスクリーンフィルム法による断層撮影は空間分解能とコントラスト分解能が悪く、とくに軟部組織を明瞭に描出する必要がある喉頭には十分適したものではなかった。そこで筆者らは DR による減算処理に注目したわけである。

一般的にデジタル X 線映像法といわれる方式の中で、現在実用レベルにあるものは次の 2 つの方式と考えてよい。一つはデジタル透視法 digital fluorography (DF) と呼ばれるもので、X 線イメージインテンシファイア-TV カメラ系を X 線検出器として用い、TV カメラの出力信号を AD 変換し、記憶装置に蓄え画像処理した後、DA 変換し、CRT に表示する方法である。DF は主に経静脈性の血管撮影で広く使われており、digital subtraction angiography (DSA) と称されて、侵襲の少ない、しかもリアルタイムで画像表示できる血管撮影法として多用されている。しかし空間分解能が悪く、X 線フィルム並みの空間分解能は期待できない。

もう一つの方式はデジタル撮影法 digital radiography (DR) で、これは筆者らが用いている Fuji Computed Radiography (FCR) に対応する。このシステムは直接 X 線撮影法であり、X 線フィルムの利点である高い空間分解能を損なうことなく、しかも X 線像のデジタル化を可能にしたという大きな特色がある。とく

表 1 DRによる減算処理法

1. Energy subtraction
X線エネルギーの異なる画像間での処理
2. Time subtraction
時間的に異なる画像間での処理
{ 造影剤の使用 → DSA
{ 動きの変化 → Motion subtraction

に喉頭内腔の軟部組織の描出は、陰性造影剤としての空気と軟部組織の濃度差をみるものであり、この目的のためには DR の階調処理によるコントラスト処理、周波数強調処理によるエッジ強調効果が適していることをすでに報告した¹⁾。

表 1 に示したように、減算処理の方法には、X 線エネルギーが異なる画像間での処理を行うエネルギー差分法 energy subtraction と、時間的に異なる画像間での処理を行う時間差分法 time subtraction とがある¹⁴⁾。筆者ら²⁾が報告した、銅板フィルターを用いた一回曝射による喉頭のエネルギーサブトラクション法は前者に対応する。後者において造影剤を使用して行うものが DSA である。しかし人体の同一部位で動きが変化した、時間的に異なる画像間で減算処理を行ったという報告は、これまで文献を渉猟したところではみられておらず、喉頭における時間差分法処理としては本報告が最初と考える。

筆者らの MS 画像処理には以下の利点がある。①トレース像ではなく実際の X 線画像そのものを示せること、②しかも煩雑な現像処理の必要がなく、オンラインでデジタル処理できること、③コントラストの反転、強調処理によって動きのあった部分は黒く、移動した部分は白く、変化のない部分は灰色として表現でき、喉頭内腔の機能的な形状変化を視覚的にとらえられること、④上下方向のみならず、側方向でも甲状軟骨のレジストレーションを行っている¹²⁾ので、石川ら¹²⁾がいう一側反回神経麻痺症例で発声時に甲状軟骨が健側へ傾斜する現象が起ってもその影響を消去できること、⑤マスク、

ライブ像に断層像を用いているので声帯膜様部、披裂部など、喉頭の部位別の運動量変化を観察できること、である。断層撮影は一見煩雑に思えるが、音声外科の治療方針を考える上で重要な声帯膜様部の的確な情報を得るためには必要な手段と考える。

前述の DF における時間差分法として短時間に動いた部分のみを表示する TID (time interval difference) モードがある¹⁴⁾。これは動きが発生したライブ像を新たにマスク像として設定 (リマスキング) し、以後も同様の操作を反復することで、動きのあった部分を連続的に描出する方法である。この方法を喉頭に応用して、形状変化を動的に観察することも可能である。

しかし DF はもともと空間分解能が悪い上に、動きが大きく連続して起こる場合には画像のズレによる差分値が大きくなり、良好な画像が得られない¹⁴⁾ことから、細かい画像解析には不向きと考える。さらに DF では被曝線量が DR よりも多いことが知られている¹⁵⁾。また DF 像は前後方向に投影された喉頭の全体像であり、声帯運動の部位別観察はラリンググラム同様、やはり困難である。以上から、DF と DR にはそれぞれ長所と短所があり、診断目的に応じて使い分ける必要があろう。

V. おわりに

DR を用いた喉頭の時間差分法処理を考案し、motion subtraction 画像処理と名付けた。この方法は、高い空間分解能を持ちながら、煩雑な現像処理の必要がなく、オンラインでコントラスト反転などの高度なデジタル画像処理を行える点で画期的方法であると考え。さらに、この処理を用いて、発声に伴う麻痺声帯の形状変化について興味ある所見を報告した。今後、反回神経麻痺を初めとして、種々の喉頭疾患の機能的な画像解析に応用されよう。

本論文の要旨は第38回日本気管食道科学会 (1986年11月) および第40回同学会 (1988年10月) において口演された。撮影に絶大なる協力をいただいた虎の門病院放射線科、菅野由紀雄科長、技師諸兄に深謝する。

文 献

- 1) 熊川孝三, 宮川晃一, 山口宏也・他: Digital radiography の喉頭疾患診断への応用. 日気食会報, 37: 241-247, 1986.
- 2) 熊川孝三: Digital radiography による喉頭の画像診断. 日気食会報, 37: 400-407, 1986.
- 3) 高野正雄: FCR システムの基礎原理. 画像診断, 4 (補1): 131-135, 1984.
- 4) 蜂谷純一・他: 輝尽性蛍光体を用いたコンピューテッドラジオグラフィー. 医学のあゆみ, 127: 1199-1206, 1983.
- 5) 武馬成人, 広戸幾一郎・他: Laryngogram 重ね合わせ法による喉頭の機能診断. 日気食会報, 24: 109-116, 1973.
- 6) 広戸幾一郎・他: 発声時の声帯位の変動に関する X 線学的研究. 音声言語医学, 20: 141-146, 1979.
- 7) 熊川孝三, 山口宏也, 廣瀬 肇: 発声にともなう麻痺声帯の形状変化に関する画像解析. 日耳鼻, 93: 61-70, 1990.
- 8) 清水一正: 高圧 X 線映画による語音発声時の声帯運動に関する研究. 耳鼻臨床, 53: 446-461, 1960.
- 9) 平野 実・他: 高圧 X 線映画による病的声帯運動の分析的研究. 耳鼻臨床, 62: 1209-1212, 1969.
- 10) 磯貝 豊: X 線ストロボスコーピーによる声帯振動の解析. 耳鼻と臨床, 27: 883-930, 1981.
- 11) Calderon, R., et al.: Tomographic aspect of paralysis of the vocal cords. Radiology, 63: 407-410, 1954.
- 12) 石川知子: 麻痺声帯の臨床的研究—とくに左右声帯のレベル差について. 耳鼻臨床, 70: 435-461, 1977.
- 13) 岩村 忍・他: 片側性反回神経麻痺における喉頭断層所見とその意義. 日気食会報, 29: 279-283, 1978.
- 14) 堀場勇夫: 時間差分法とエネルギー差分法の問題. 日本臨床, 41: 1434-1442, 1983.
- 15) 飯沼 武: デジタル X 線映像法. 日本臨床, 41: 1383-1387, 1983.