

CT ガイド下穿刺における穿刺経路選択手法の提案

花田 真輝¹ 増井 浩二² 後藤 佑介¹ 酒井 晃二²

概要: 近年, CT 画像を用いた画像誘導穿刺として, CT ガイド下穿刺が利用されている. CT 画像は, 体のどの部位についても範囲にほぼ制限なく画像を取得できる. このため, CT ガイド下穿刺は, 体内のすべての部位にあるターゲットに対して理論上は穿刺可能である. しかし, 現在の CT ガイド下穿刺における課題として, 穿刺可能な範囲が限定される点, および医師が事前に決定した穿刺経路の有効性を医師自身で判断できない点が挙げられる. そこで, 本研究では, CT ガイド下穿刺における穿刺経路の選択手法を提案する. 提案手法では, ボリュームレンダリング技術で 3D 化した CT 画像を用いて, 骨, 血管, および臓器といった体内で穿刺不可能な領域を判別する. また, 穿刺不可能な領域と交わらない線分のうち, 穿刺の開始位置からターゲットまでの距離が一番短い経路である最短経路, 穿刺不可能な領域からの距離が一番遠い経路である安全経路, および最短経路と安全経路の情報に基づく最適経路をそれぞれ導出する. 実際の患者の CT 画像を用いた評価の結果, 穿刺における最短経路, 安全経路, および最適経路を導出し, 医師が複数の穿刺経路から選択できることを確認した.

1. はじめに

現在, 医療現場で US (Ultrasonography) 画像や CT (Computed Tomography) 画像をガイドとして用いて穿刺を行う画像誘導穿刺が利用されている. 穿刺とは, 体外から針状の医療機器 (穿刺針) を体内に刺し, 細胞の摘出, 薬品の注入, および放射線照射による治療を行う医療行為である. 医師は, 肺腫瘍, 肝腫瘍, 腎腫瘍, および椎間膿瘍といったターゲットに対して, 画像を見ながら穿刺針を挿入し, 治療を行う. 画像誘導穿刺技術を用いることで, 体内の様子を画像で確認しながら穿刺を行うことができ, 体外から見えない病巣を正確に穿刺できる. この技術は, 医療現場で生検, 膿瘍ドレナージ, および癌の局所治療に用いられており, 有用な治療法である.

これまでの画像誘導穿刺では US 画像を用いてきたが, US 画像で表示可能な体の範囲に限界があり, 近年は CT 画像を用いた画像誘導穿刺である CT ガイド下穿刺 [1] が利用されている. ここで, CT 画像の例を図 1 に示す. CT 画像は, 体のどの部位についても範囲にほぼ制限なく画像を取得できる. このため, CT ガイド下穿刺は, 体内のすべての部位にあるターゲットに対して理論上は穿刺可能で



図 1 CT 画像

ある.

しかし, 現在の CT ガイド下穿刺において, 課題が二つ挙げられる. 一つ目は, 穿刺可能な範囲が限定される点である. 穿刺では, 骨, 血管, および臓器といった体内で穿刺不可能な領域がある. また, CT 断面に沿った穿刺が基本であるため, 穿刺の開始位置からターゲットまでの穿刺経路は, できるだけ CT 断面に対して平行とする必要がある. 二つ目は, 医師が事前に決定した穿刺経路の有効性を医師自身で判断できない点である. 医師は, 手術前に, 事前に取得した患者の CT 画像をもとに穿刺経路を決定する. このとき, 患者への負担がより小さい穿刺経路の有無を自身で確認できず, 複数の医師で確保する必要がある.

本研究では, CT ガイド下穿刺における穿刺経路の選択手法を提案する. 提案手法では, ボリュームレンダリング

¹ 岡山大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Technology,
Okayama University

² 京都府立医科大学大学院放射線診断治療学講座
Graduate School of radiology, Kyoto Prefectural University
of Medicine

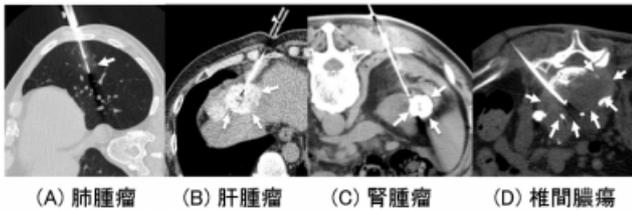


図 2 CT ガイド下穿刺

技術で 3D 化した CT 画像を用いて、骨、血管、および臓器といった体内で穿刺不可能な領域を判別する。また、穿刺不可能領域を通過しない線分のうち、穿刺の開始位置からターゲットまでの最短経路、穿刺不可能領域からの距離が一番遠い経路である安全経路、および最短経路と安全経路の情報に基づく最適経路をそれぞれ導出する。

2. CT ガイド下穿刺補助システム

2.1 CT ガイド下穿刺

図 2.3 に示すように、CT ガイド下穿刺では、医師は肺腫瘍、肝腫瘍、腎腫瘍、および椎間膿瘍といったターゲットに対して、画像を見ながら穿刺針を挿入し、治療を行う。画像誘導穿刺技術を用いることで、体内の様子を画像で確認しながら穿刺を行うことができ、体外から見えない病巣を正確に穿刺できる。この技術は、医療現場で生検、膿瘍ドレナージ、および癌の局所治療に用いられており、有用な治療法である。

2.2 提案システムの概要

筆者らの研究グループでは、CT ガイド下で様々な方向からの穿刺を補助する CT ガイド下穿刺補助システム [2] を提案している。提案システムでは、穿刺針に搭載されたセンサデバイスにより穿刺針の位置情報を継続的に取得することで、CT ガイド下でターゲットと穿刺針の位置関係を空間的に把握できる。また、CT 画像をもとにボリュームレンダリング技術で作成した 3D 画像を利用することで、CT 画像のみの情報による断面に沿った穿刺だけでなく、様々な方向から最適な穿刺経路を見つけることが可能となる。さらに、穿刺情報表示機能により、現在の穿刺針からターゲットまでの穿刺経路を提示することで、熟練した医師でなくても正確にターゲットへの穿刺を行うことができる。

2.3 システム構成

提案システムの構成を図 3 に示す。提案システムは、4 種類の処理部で構成される。

(1) センサデバイス情報処理部

提案システムで想定する穿刺のためのセンサデバイスを図 4 に示す。センサデバイス情報処理部では、穿刺針に組み合わせたセンサデバイスと 3D モーションセ

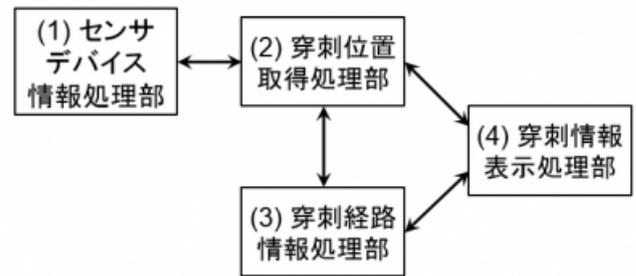


図 3 CT ガイド下穿刺補助システムの構成

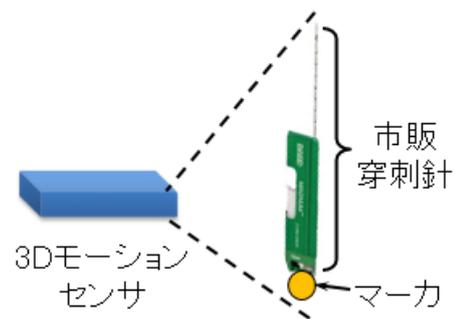


図 4 穿刺センサデバイス

ンサを用いて、位置情報を定期的に測定する。また、穿刺位置が事前に選択した経路と比較して一定以上離れた場合、穿刺位置情報処理部からの要求に応じて、センサデバイスは医師に穿刺経路の修正を伝える。

(2) 穿刺位置情報処理部

センサデバイス情報処理部から取得した穿刺針の位置に基づいて、穿刺針の先端部の位置情報を出力する。また、2D の CT 画像をもとに、ボリュームレンダリングを用いて 3D の CT 画像に変換する。

(3) 穿刺経路情報処理部

穿刺位置情報処理部で出力した 3D の CT 画像をもとに、経路候補を選択するアルゴリズムを用いて、穿刺に適した複数の穿刺経路を求める。

(4) 穿刺情報表示処理部

提案システムで想定する穿刺情報表示機能を図 5 に示す。穿刺情報表示処理部では、3D の CT 画像情報、穿刺針の先端部の位置情報、および医師が選択した穿刺経路の情報を組み合わせて手術室内のディスプレイに表示することで、医師による穿刺を補助する。

また、提案システムにおける検討項目として、穿刺センサデバイスの開発、穿刺経路選択アルゴリズムの提案、および穿刺情報表示機能の設計および実装の 3 項目が挙げられる。本研究では、穿刺経路選択アルゴリズムの提案を行う。

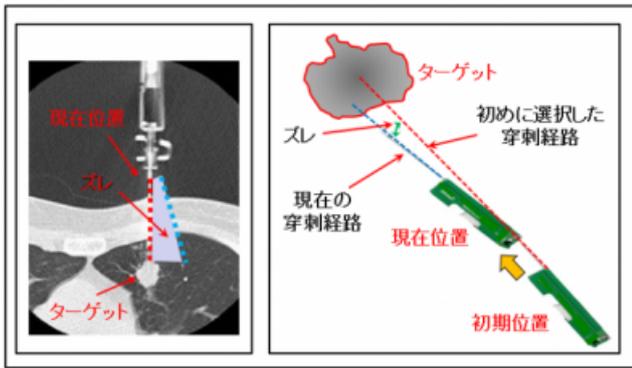


図 5 穿刺情報表示機能

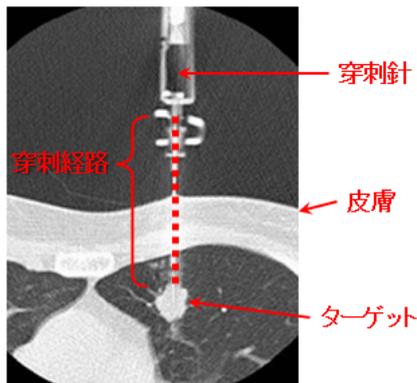


図 6 穿刺針を用いたターゲットへの穿刺

2.4 現状の課題

現在の CT ガイド下穿刺における穿刺経路の選択手法では、課題が二つ挙げられる。一つ目は、穿刺可能な範囲が限定される点である。穿刺では、骨、血管、および臓器といった体内で穿刺不可能な領域がある。また、CT 断面に沿った穿刺が基本である。このため、図 6 に示すように、穿刺の開始位置からターゲットまでの穿刺経路は、できるだけ CT 断面に対して平行とする必要がある。二つ目は、医師が事前に決定した穿刺経路の有効性を医師自身で判断できない点である。医師は、手術前に、事前に取得した患者の CT 画像をもとに穿刺経路を決定する。このとき、患者への負担がより小さい穿刺経路の有無を自身で確認できず、複数の医師で確認する必要がある。

3. 関連研究

3.1 CT 画像を用いた処理技術

CT 画像を用いた処理技術として、多方向から計測した画像から血管を 3 次元再構成するコンベーム CT を用いた 3 次元血管像処理アルゴリズム [3] が提案されている。このアルゴリズムを用いることで、血管走行方向の抽出、血管断面積の計測、血管経路の選択、および経路の距離計測を可能にし、血管障害の定量的な診断や治療計画を支援できる。

表 1 体内組織ごとの CT 値

体内組織	CT 値
気道内, 消化管内の空気 (比重 0)	-1000
脂肪組織	-50 ~ -100
脳脊髄液, 脳室	10
脳室周囲白質	20 ~ 30
大脳皮質 (灰白質)	30 ~ 40
筋肉, 肝臓等の臓器	30 ~ 60
血液 (比重 1.05 ~ 1.06)	50 ~ 60
凝固血液 (血栓)	50 ~ 100
甲状腺 (比重 1.10 ~ 1.12)	100 ~ 120
骨, 石灰化病変	250 ~ 1000

3.2 経路導出手法

障害物を考慮した 2 点間の最短直線となる経路導出手法の代表例として、プレゼンハム・アルゴリズム [4] が挙げられる。プレゼンハム・アルゴリズムでは、事前に設定された始点と終点との間で連続した点を置くことで、近似的な直線を引くことができる。このアルゴリズムは、計算機の画面上で直線を描画するために開発され、整数の加減算とビットシフトのみで実装できるため、計算処理のコストが小さく、処理速度を上げることができる。また、プレゼンハム・アルゴリズムを拡張して、太い直線を描画するアルゴリズム [5] が開発されている。

障害物の重みを考慮した最短経路問題において、2 点間のマンハッタン距離が最短となる経路を求めるアルゴリズム [6] が提案されている。このアルゴリズムでは、障害物をすべて回避する最短経路ではなく、水平もしくは垂直な線分のみを考慮した上で、屈折数が最小となる経路を導出している。また、このアルゴリズムを用いることで、ロボットの移動経路や無線通信における中継基地局の設置場所を決定できる。

4. 提案手法

4.1 概要

本研究では、CT ガイド下穿刺における穿刺経路の選択手法を提案する。提案手法では、はじめに、2D の CT 画像をもとにボリュームレンダリング技術で 3D 化した CT 画像を用いて、骨、血管、および臓器といった体内で穿刺不可能な領域を判別する。次に、穿刺の開始位置からターゲットまでの距離が一番短い経路である最短経路、および穿刺不可能な領域からの距離が一番遠い経路である安全経路、および最短経路と安全経路の情報に基づく最適経路をそれぞれ導出する。

4.2 想定環境

提案手法において、想定される環境を以下に箇条書きで示す。

- CT 画像を構成するデータは、ピクセル数が縦 512,

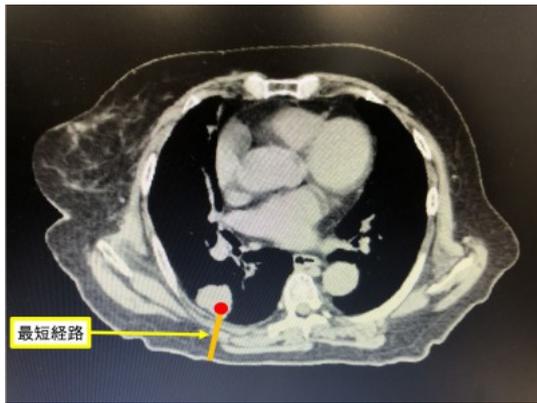


図 7 最短経路

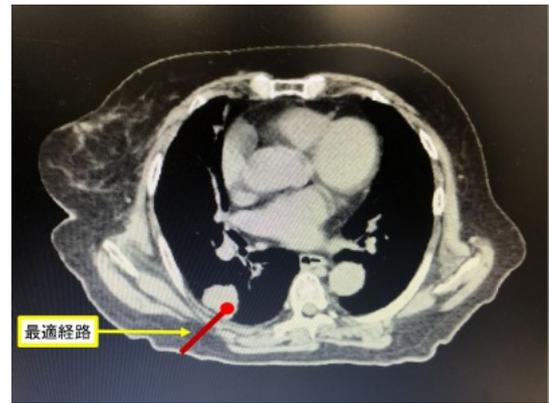


図 9 最適経路

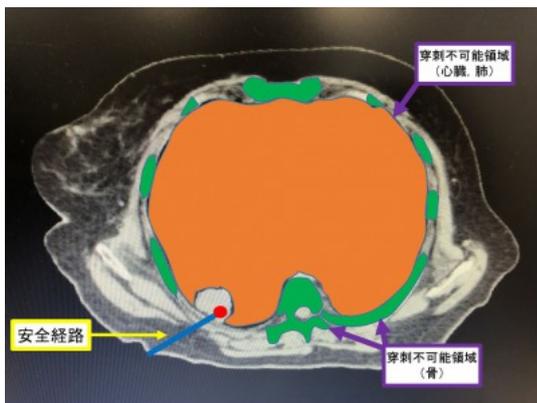


図 8 安全経路

横 512 の 2 次元データである。

- 各ピクセルで設定される CT 値のデータは、配列に格納されている。
- ターゲットの位置は、医師の意見をもとに設定する。

実際に穿刺を行う経路は、穿刺を行う医師が提案手法で求めた複数の穿刺経路から決定する。また、各ピクセルで設定される CT 値 [7] について、体内組織ごとの値を表表 4 に示す。CT 値は -2000 から 4000 の範囲で設定され、CT 値の大きさに応じて、白黒で表示される。

4.3 提案手法を求める経路

4.3.1 最短経路

CT 画像における穿刺の最短経路の例を図 7 に示す。最短経路は、ターゲットの座標に含まれるピクセルから体外で接するピクセルまでの穿刺経路における複数の候補のうち、一番短い経路である。最短経路を選択することで、医師は穿刺時間を短縮するとともに、CT スキャンによる被爆線量を削減できる。

4.3.2 安全経路

CT 画像における穿刺の安全経路の例を図 8 に示す。安全経路は、穿刺経路上のピクセルから穿刺不可能領域となるピクセルまでの距離が一番長い経路である。医師が穿刺を行う場合、事前に設定した穿刺経路と実際の穿刺針の

軌跡との間でズレが発生する。安全経路を選択することで、穿刺距離が長くなる一方で、穿刺不可能領域に穿刺針が重なる可能性が低くなり、安全に穿刺を行うことができる。

4.3.3 最適経路

CT 画像における穿刺の最短経路の例を図 9 に示す。最適経路は、最短経路と安全経路に基づいて、多くの医師にとって穿刺に適した経路である。最適経路を選択することで、穿刺距離の短縮と医療事故防止の両面を考慮した穿刺を行うことができる。本研究では、穿刺の角度に応じて測定した最短経路の値と安全経路の値の積をもとに算出する。

4.4 提案手法の処理手順

提案手法における処理手順は、以下の通りである。

- (1) 医師の判断に基づき、穿刺を行うターゲットの座標を設定する。
- (2) ターゲットが含まれる CT 画像を構成する $262,144$ ($= 512 \times 512 \times 1$) 個のピクセルのデータを配列に格納する。
- (3) 表 4 で示した体内組織ごとの CT 値、および医師の判断に基づき、(2) で格納した配列データの値を用いて、各ピクセルを穿刺可能領域、穿刺不可能領域、体外を表す空気の領域、およびターゲット領域の 4 種類に分類する。
- (4) ターゲットから一定の長さに設定した線分を 1 度ずつ回転させて、0 度から 359 度のすべての角度について、試行を繰り返す。試行では、線分に接する各ピクセルに対して、(3) で分類した 4 種類の領域のうちいずれに該当するかに応じて、以下の (a) もしくは (b) の場合分けを行い、判断する。すべての角度について試行が終了した場合、(6) へ。
 - (a) 線分に接するピクセルに穿刺不可能領域が含まれる場合、現在の角度における試行を終了し、次の角度で試行を開始する。
 - (b) 上記以外の場合、現在の角度でターゲットからの

線分を延長し、(5)へ。

- (5) 延長した線分が体外のピクセルに接した場合、この線分を穿刺経路の候補とし、穿刺経路の長さを穿刺距離として算出する。また、次の角度で試行を開始するため、(4)へ。
- (6) (5)で求めた穿刺経路の候補のうち、穿刺距離がもっとも短い経路から順番に、最短経路として求める。
- (7) (5)で求めた穿刺経路の候補のうち、穿刺経路上にある各ピクセルから穿刺不可能領域上で一番近いピクセルまでのユークリッド距離が一番長い経路から順番に、安全経路として求める。
- (8) (5)で求めた穿刺経路の候補のうち、経路の長さを穿刺不可能領域からの距離で除した値が小さい順番に、最適経路として求める。
- (9) 医師は、ランク付けされた複数の最短経路、安全経路、および最適経路の情報をもとに、実際に穿刺で利用する経路を選択する。

5. 評価

5.1 評価

本研究では、CT 画像データを利用して、穿刺時における最短経路、安全経路、および最適経路を導出する提案手法の有用性を検証する。

5.2 評価環境

評価環境として、計算機端末を用いたシミュレーション評価を行うため、評価環境を構築した。評価に用いた計算機の性能を表 2 に示す。また、評価では、京都府立医科大学大学院放射線診断治療学講座より提供を受けた被験者の CT 画像の情報を用いる。

5.3 評価に用いる CT 画像と CT 値

本研究の評価では、図 1 で示した 262,144 (= 512×512×1) 個のピクセルで構成される CT 画像を用いる。ターゲットの座標は、図 10 の赤点で示すように、 $(x, y) = (214, 345)$ で設定する。また、CT 画像を構成する各ピクセルの位置情報と CT 値は、表 3 を用いる。

はじめに、各ピクセルに座標と CT 値を設定し、医師の判断に基づき、各ピクセルを体内の穿刺可能領域、体内の穿刺不可能領域、体外の空気領域、およびターゲット領域の 4 種類の状態に分類する。

次に、ターゲットからの線分を設定する。本研究では、線分の長さを 1 ピクセル分の 0.5 mm とする。ターゲットから X 軸正方向の直線を基準線として、線分を 0 度から 359 度まで 1 度ずつ回転して、試行を繰り返す。試行では、角度ごとに、線分が交わるピクセルの領域を確認し、この領域が体内の穿刺不可能領域であれば、この角度における試行を中止する。残りの試行については、線分の長さを 1

表 2 計算機の性能

CPU	Intel (R) core TM 2 i5-4590 (3.30 GHz)
Memory	8.00 GBytes
OS	Windows 8.1 Pro
NIC	Inter (R) Ethernet Connection I217-LM

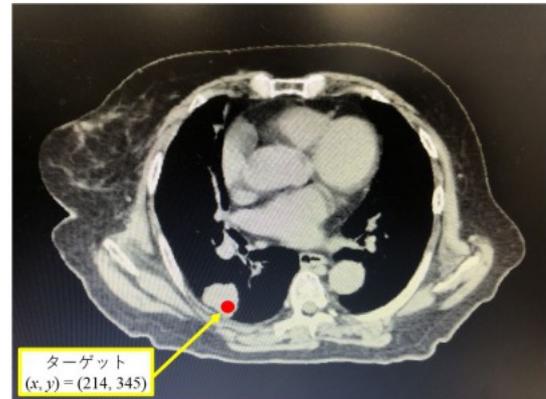


図 10 CT 画像上におけるターゲットの表示

表 3 評価に用いる CT 画像の CT 値

ピクセル位置	CT 値
1	-2048
2	-2048
3	-2048
4	-2048
5	-2048
:	:
:	:
:	:
262140	-1000
264141	-1000
264142	-1000
264143	-1000
264144	-1000

ピクセルずつ伸ばし、試行を繰り返す。試行対象となるピクセルの領域が体外の空気領域となった場合、この線分を穿刺経路と判断し、角度、穿刺経路の長さ、および穿刺不可能領域からの距離を取得する。

最後に、0 度から 359 度までの穿刺経路の情報をもとに、最短経路、安全経路、および最適経路のランク付けを行う。

5.4 評価項目

評価では、4 章で述べた穿刺経路の選択手法の有用性を確認する。評価項目として、ターゲットに対する最短経路、安全経路、および最適経路の 3 種類とする。

表 4 最短経路

rank	角度 (度)	経路の長さ (mm)	穿刺不可能領域からの距離 (mm)
1	255	21.00	1.12
2	254	21.10	1.12
3	253	21.20	1.12
4	258	21.25	0.50
5	257	21.30	0.50

表 5 安全経路

rank	角度 (度)	経路の長さ (mm)	穿刺不可能領域からの距離 (mm)
1	209	33.45	6.50
2	208	33.55	6.26
3	206	33.10	6.04
4	207	33.40	6.04
5	220	27.65	6.00

表 6 最適経路

rank	角度 (度)	経路の長さ (A) (mm)	穿刺不可能領域からの距離 (B) (mm)	(A)/(B)
1	220	27.65	6.00	4.61
2	219	28.25	6.00	4.71
3	218	28.85	6.00	4.81
4	222	26.60	5.52	4.82
5	221	27.10	5.52	4.91

5.5 評価結果

5.5.1 最短経路

最短経路の評価では、ターゲットの座標に含まれるピクセルから体外に接するピクセルまでの穿刺経路において、距離ベースで穿刺経路の候補を複数求める。距離ベースの穿刺経路の候補を表 4 に示す。rank は優先順位であり、5 個の候補を順番に示している。各候補について、角度、穿刺経路の長さ、および穿刺不可能領域からの距離を示している。

表 4 について、5 個の最短経路の候補における最短経路の長さは 21.00 mm から 21.30 mm、角度は 253 ~ 258 度の間となった。肺は穿刺不可能領域であり、肺と交わる方向に穿刺できない。このため、穿刺経路の角度は限定され、穿刺経路のうち、ターゲットから一番近い距離となる体外のピクセルの周りが最短経路の候補となる。

5.5.2 安全経路

穿刺経路上のピクセルから穿刺不可能領域となるピクセルまでの距離が長い順番に、安全経路となる。穿刺経路の候補を複数求める。安全経路の穿刺候補を表 5 に示す。rank、角度、穿刺経路の長さ、および穿刺不可能領域からの距離は、5.5.1 項と同じとする。

表 5 について、5 個の安全経路の候補における穿刺経路の長さは 27.65 mm から 33.45 mm の間、角度は 206 ~ 209 度、および 220 度となった。また、穿刺不可能領域からの距離は 6.00 mm から 6.50 mm の間となった。今回の評価で用いた CT 画像は、穿刺不可能領域である肺がターゲットの腫瘍を包む形である。このため、肺を安全に避ける穿刺経路が安全経路として導出された。

5.5.3 最適経路

最短経路と安全経路に基づく最適距離において、穿刺経路の候補を複数求める。最適経路の穿刺候補を表 6 に示す。rank、角度、穿刺経路の長さ、および穿刺不可能領域からの距離は、5.5.1 項と同じとする。

表 6 について、5 個の最適経路の候補における角度は 218 度から 222 度の間、穿刺経路の長さは 26.6 mm から 28.85 mm となった。また、最適経路の候補は、安全経路で rank が 5 の候補のみが同じとなった。このため、最適経路を求めることで、最短経路や安全経路で導出できなかった新たな穿刺経路を導出できた。

6. おわりに

本研究では、CT ガイド下穿刺における最短経路、安全経路、および最適経路を導出するための穿刺経路選択手法を提案し、評価を行った。提案手法では、CT 画像における 2 次元データ配列を利用して、ターゲットからの線分が接するピクセルの領域の状態をもとに穿刺経路を決定する。また、これらの穿刺経路を最短経路、安全経路、および最適経路の基準に応じてランク付けし、複数提示することで、医師は実際に穿刺で利用する経路を選択できる。

評価では、最短経路、安全経路、および最適経路の選択候補について、各経路の導出基準に応じて優先順位の結果が異なった。以上より、医師は、自身のスキルや許容される手術時間に応じて、穿刺経路を選択できることを確認した。

今後の予定として、穿刺経路の導出時間の短縮、穿刺経路の長さにおける計測精度の向上、および 3D の CT 画像データへの応用が挙げられる。

謝辞

本研究は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究）（課題番号：18K15557）の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 山田隆之, 磯部義憲, 上野恵子, 新見晶子, 山田明義: CT ガイド下穿刺による生検およびドレナージ, 日本医学放射線学会雑誌, Vol.48, No.6, pp.694-701 (1988).
- [2] 後藤佑介, 増井浩二, 福岡健太, 花田真輝, 山下万乃楓, 酒井晃二: CT ガイド下穿刺補助システムの提案, 第 81 回情報処理学会全国大会講演論文集 (分冊 3), pp.25-26(2019).
- [3] 川田佳樹, 仁木登, 隈崎達夫: コーンビーム CT の 3 次元血管像処理アルゴリズムについて, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.6, pp.1134-1145 (1996).
- [4] Bresenham, J.E.: Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter, IBM Systems Journal, Vol.4, No.1, pp.25-30 (1965).
- [5] Murphy, A.S.: Line Thickening by Modification to Bresenham's Algorithm, IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol.20, No.12, pp.1-8 (1978).
- [6] 安留誠吾, 増澤利光, 辻野嘉宏, 都倉信樹: 障害物の重みを考慮した最短経路問題, 電子情報通信学会論文誌 D-I,

Vol.J76-D-I, No.4, pp.157-163 (1993).

- [7] 塚越伸介 : X 線 CT 第 2 回 : CT 画像の基本と画像表示,
Medical Imaging Technology, Vol.27, No.4, pp.258-262
(2009).