

外科手術ステレオ画像からの鉗子領域抽出

Extraction of Forceps Area from Surgical Stereo Images

情報工学専攻 三宅 陸也
Information and System Engineering Rikuya MIYAKE

概要

内視鏡手術は、内視鏡手術画像に基づいておこなわれる、術者による手術器具と臓器の相互作用であり、両者の相互関係に関する定量的な情報を抽出する技術は、術者を補佐する手術支援ロボットの自律レベル向上に極めて有効である。

本研究では、外科手術ステレオ画像から手術器具と臓器の位置関係を算出するために、DP ステレオ照合を用いた距離測定をおこなう。DP ステレオ照合を用いて生成された深度画像には、水平線上バースト誤りがしばしば発生する。これにより、深度画像の品質が低下する。深度画像を高品質化するためには、あらかじめ手術器具である鉗子の領域を抽出し、その領域内外それぞれで深度推定をおこなうことが鍵である。

そこで本研究は、外科手術ステレオ画像の深度画像を用いた鉗子領域の抽出手法を提案する。

さらに本研究は、抽出した鉗子領域に対してハフ変換をおこなうことで検出した直線および楕円を用いた、鉗子形状の検出手法を提案する。その結果、ノイズを多く含むエッジ画像から鉗子形状の一部を自動的に検出することができた。

キーワード：ステレオカメラ、ステレオ内視鏡、距離測定、DP ステレオ照合、深度画像、領域抽出、ハフ変換、楕円検出。

1 序論

近年、内視鏡手術における術者の負担を軽減するための、手術支援ロボットの自律化に向けた研究が注目されている [1][2][3]。

内視鏡手術は、内視鏡手術画像に基づいておこなわれる、術者による手術器具と臓器の相互作用であり、それに関する定量的な情報を実時間で抽出する技術は、術者を補佐する手術支援ロボットの自律レベル向上に極めて有効である。

本研究では、外科手術ステレオ画像から手術器具と臓器の位置関係を算出するために、DP ステレオ照合を用いた距離測定をおこなう。DP ステレオ照合を用いて生成された深度画像には、水平線上バースト誤りがしばしば発生する。これにより、深度画像の品質が低下し、術者が手術器具と臓器の位置関係を正確に捉えることができない恐れがある。深度画像を高品質化するためには、あらかじめ手術器具である鉗子の領域を抽出し、その領域内外それぞれで深度推定をおこなうことが鍵である。

そこで本研究は、外科手術ステレオ画像における鉗子領域の抽出手法を提案する。本手法は、鉗子領域抽出のために深度画像を用いる。さらに本研究は、抽出した鉗子領域に対してハフ変換をおこなうことで検出した直線および楕円を用いた、鉗子形状の特定手法を提案する。その結果、ノイズを含むエッジ画像から鉗子形状の一部を自動的に特定することができた。

2 ステレオ法による深度推定

本研究は、標準ステレオカメラモデルを用いたステレオ法により深度推定をおこなう。本研究におけるステレオ法とは、同じ方向を向き、同じ高さであり、撮影

方向に対して垂直の向きに水平にずらした位置に設置された2台のカメラを用いて、撮影対象までの距離を推定する方法である。

3 深度情報を用いた鉗子領域抽出

本研究では、色深度値が256段階のグレースケールで表現された深度画像を用いた鉗子領域の抽出方法を提案する。本論文では、各画素の画素値を深度値とよぶ。

3.1 領域統合

まず、各画素に対して、隣接画素との深度値の差の絶対値が閾値 T_d 以下の場合、これらを一つの領域とみなしリストに登録する。そして、その領域を部分領域とよぶ。部分領域における深度値は、部分領域内の深度値の平均値とする。さらに、部分領域を拡張する場合は、同様に、部分領域と隣接するすべての画素や別の部分領域との深度値の差の絶対値を計算し、閾値 T_d 以下となった隣接画素を統合する。この処理を全ての部分領域の統合先が無くなるまで再帰的に繰り返す。

鉗子領域は、一定の大きさが保証されているものである。よって、画素数が極端に少ない部分領域（微小領域とぶ）は光の反射などによって生じたノイズである可能性がある。このノイズを無くすために、微小領域統合閾値 T_r 以下の画素数となる部分領域を隣接する部分領域に強制統合する。まず、各対象微小領域 j と、その全ての隣接部分領域 jk の平均深度濃度 $\overline{f_j}$ と $\overline{f_{jk}}$ を求める。対象領域は平均深度濃度の差が最小となる隣接領域と統合をおこなう。

3.2 最外輪郭線の特定

領域統合によって生じた部分領域は、さらに大きな部分領域の一部と見なすことができる。統合可能な最大領域を見つけるために、最外輪郭線の特定をおこな

う。最外輪郭線の特定には、チェーンコードを用いる。また、輪郭線の内外判定は最外輪郭線が単純閉曲線であることを利用し、座標とリストの交差数により判定をおこなう。

3.3 鉗子部分領域の特定

本研究は、鉗子領域の特定にステレオカメラの撮影画像の色情報を用いる。色情報の表色系として RGB 表色系と RGB 表色系から計算された Smith の HSV 表色系 [5] を用いて、各部分領域の特徴の調査をおこなった。

調査の結果にもとづき、本研究においては、S と V の色情報を用いて鉗子部分領域を特定する。まず、右カメラ画像と左カメラ画像の S 濃度を足し合わせた濃度ヒストグラムを作成する。その中で指定した範囲 $[S_{\min}, S_{\max}]$ のグレースケールを持つ画素の割合が、その領域の左右の総画素数で割った数値が閾値 T_s 以下の領域を探す。V 色濃度についても同様に、両カメラ画像の濃度を足し合わせた濃度ヒストグラム作成し、その中で指定した範囲 $[V_{\min}, V_{\max}]$ のグレースケールを持つ画素の割合が、その領域の左右の総画素数で割った数値が閾値 T_v 以下の領域を探す。両方の閾値以下となった領域を最終的な抽出鉗子領域とする。図 1 に抽出された鉗子領域の画像を示す。



図 1: 抽出された鉗子領域

4 欠損楕円抽出法

第 3 章にて抽出した鉗子領域の輪郭線には、凸凹や、分裂がある。より正確な鉗子領域を抽出するためには、抽出した鉗子領域の輪郭線を補正する必要がある。補正の方法として鉗子の概形の特徴を踏まえて、欠損楕円抽出法による楕円検出 [6] とハフ変換を用いた直線検出 (後述する) をおこない、その有効性について考察をおこなう。

楕円は中心座標 (x_c, y_c) 、軸長 $2\alpha, 2\beta$ 、回転角 θ の 5 つのパラメータで記述できる。欠損楕円抽出法は、この 5 つのパラメータを左から順にハフ変換を用いて段階的に求める。5 つのパラメータを段階的に求めることによって、ハフ変換に使用する投票空間を 2 次元以下で抑えることができる。また、接線情報を活用することによって、輪郭線画素が 50% 以上欠落している楕円の検出も可能である。

4.1 接線情報の抽出

ハフ変換を用いた接線情報の抽出について述べる。

直線の傾斜角度 θ の区間 $[0^\circ, 180^\circ)$ を適当な幅 $\Delta\theta$ で等分し、量子化した 1 次元配列の投票空間を用意する。各配列要素をセルと呼び、その初期値を 0 にする。次に、注目エッジ点 $P_i(x_i, y_i)$ を中心とした適当なサイズの窓を用意する。この窓内に他のエッジ点 $P_j(x_j, y_j)$ が存在するとき、2 点 P_i, P_j を通る直線の傾きを計算する。画素は広がりを持つので、その標準化誤差を考慮する必要がある。本研究は、画素 P_i の中心を通る直線であり、その直線の角度 θ が次式

$$\tan \theta_1 = (y_j - y_i - 0.5)/(x_j - x_i) \quad (1)$$

$$\tan \theta_2 = (y_j - y_i + 0.5)/(x_j - x_i) \quad (2)$$

によって定まる範囲 $\theta_1 \leq \theta < \theta_2$ に含まれるものを、2 点 P_i, P_j を通る可能性がある直線として扱う。そして、この範囲内のセルに値 1 を加える (投票とよぶ)。ただし、 $|\tan \theta| > 1$ である場合、 x 成分と y 成分を入れ替えて θ_1, θ_2 を求める。以上の投票操作を窓内に存在する全てのエッジ点についておこなう。最後に、投票空間を走査して、閾値 T_θ を超えていて、なおかつ、投票空間内で最大得票値を持つセルに対応する角度 θ_i を注目エッジ点 P_i における接線情報として扱う。なお、投票空間で最大得票値が連続して並ぶ場合は、それらの中央に位置するセルに対応する角度を θ_i とする。

4.2 接線情報を利用した楕円抽出法

接線情報を利用した楕円抽出法は、多段階ハフ変換に基づく。中心座標 (x_c, y_c) 、軸長 $2\alpha, 2\beta$ 、回転角 θ の 5 つのパラメータをこの順に求める。なお、既に上記の方法を用いて、接線情報は求まっているものとする。楕円の中心検出には、Yuen ら [7] が提案している方法を用いる。この方法は、楕円上の 2 点 P_i, P_j の各接線 l_i, l_j が交わる点 (極点と呼ぶ) を Q_{ij} とすると、 Q_{ij} と線分 P_iP_j の中点 M_{ij} を結ぶ直線 (中心線と呼ぶ) l_{ij} が、楕円中心 O_k を通過するという幾何学的性質を利用したものである。得られた楕円中心集合 $O_k = \{(x_{O_k}, y_{O_k})\}$ に対して、リスト L からそれらに投票したエッジ点对を、各楕円中心 O_k との距離により所属する楕円ごとに分類し、同時に中心座標以外の残りのパラメータについて、楕円方程式を利用し候補となる値を算出する。そして、求めた候補の中から、ハフ変換を用いてパラメータを決定する。

4.3 最小 2 乗法によるパラメータの補正

ハフ変換によって検出されるパラメータをより正確な値にするには、投票空間の量子化幅を小さくする方法が考えられる。しかし、この方法は使用メモリ量と処理時間が増大する、投票が分散して極大値セルに投票値が集積化するなどの恐れがある。そこで、ハフ変換で得たパラメータを最小 2 乗法を用いて補正する。

5 鉗子領域の補正

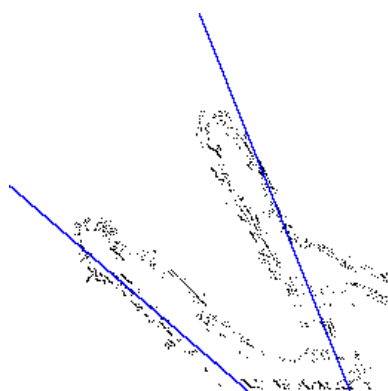
本研究では、第 3 章で抽出した鉗子領域内で、ハフ変換を用いて直線および楕円として鉗子形状を検出する。さらに、検出した鉗子形状が抽出した鉗子領域の補正に有効であるか考察する。

ハフ変換の入力に図1に示すような凹凸のある輪郭線を使うと、正しいセルの得票率が下がる。そのため、本研究は左右両原画像それぞれに、sobel 微分フィルタを適用しエッジ画像を作成する。そして、エッジ画像に図1を重ねたときに、抽出された領域内にあるエッジ情報のみを入力とする。ここで、外科手術ステレオ画像のエッジ画像は、様々なノイズを受けるので、特定した鉗子領域内に絞っていても直線や楕円検出のハフ変換の計算をおこなう際に、多数の誤った投票をする可能性がある。よって、本研究では、特定された鉗子領域の輪郭線上の画素を注目点とした閾値 T_s の大きさの正方窓内にあるエッジ点を入力画像として抽出領域の補正をおこなう。

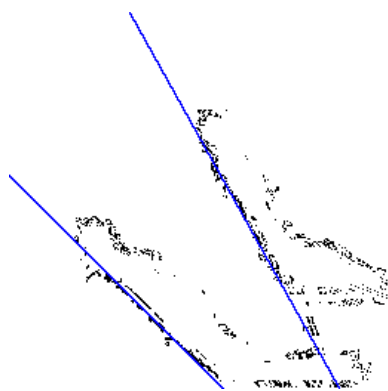
5.1 直線検出のハフ変換の実験結果

本研究では、Duda ら [8] が提案した θ - ρ ハフ変換を使用し、これを直線検出のハフ変換と呼ぶ。図2に直線検出の結果を示す。

実験の結果、鉗子の直線的な形状を検出することができた。オクルージョン領域の影響と正方窓の影響により、左カメラのエッジ画像では鉗子領域右側のエッジ点が多く残ることで鉗子領域右側の線が検出され、右カメラのエッジ画像では鉗子領域左側のエッジ点が多く残ることで鉗子領域左側の線を検出した。実験の結果より、鉗子の直線形状部分の一部を直線として検出できたので、直線検出のハフ変換は抽出した鉗子領域の補正に有効だと考えられる。



(a) 左カメラエッジ画像



(b) 右カメラエッジ画像

図2: 直線検出

5.2 欠損楕円抽出法の楕円検出による補正

欠損楕円抽出法の楕円検出の実験結果について述べる。楕円検出には、鉗子先端の丸みを帯びた形状や窪んでいる形状の検出を目標とする。楕円検出の実験結果は、目的としていた形状の検出はできなかった。これには2つの問題が考えられる。

1つ目の問題点は、最小2乗法の有効性である。欠損楕円抽出法は、ハフ変換により得られたパラメータを最小2乗法により補正する。これは、ハフ変換で得られたパラメータをもつ楕円と重なるエッジ点について最小2乗法をおこなうというものである。しかし、前述の通り、外科手術画像のエッジ画像はノイズの影響を大きく受けている。よって、最小2乗法で補正する際に、期待する曲線の周上以外のエッジ点も多く含んだ状態でパラメータの補正をする恐れがある。これが原因となり、補正後のパラメータが悪化する恐れがある。したがって、本研究は最小2乗法によるパラメータの補正をおこなわず、ハフ変換で得られるパラメータを最終的なパラメータとする。

2つ目の問題点は、接線情報の正確さである。欠損楕円抽出法は、曲線を直線に近似して接線情報を抽出する。しかし、この方法には曲率の大きいエッジ点における接線情報の誤差が大きくなるという欠点がある。欠損楕円抽出法は接線情報を積極的に利用するので、接線情報に大きな誤差があると、誤った値を何度も利用することになり、その結果、検出される楕円のパラメータに大きな影響を与えられられる。よって、他の接線情報抽出法を検討する必要がある。

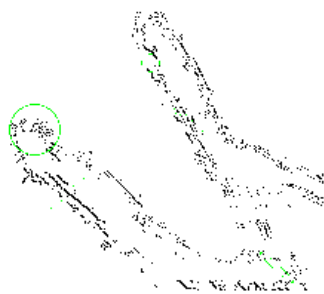
接線情報抽出の改良について述べる。本研究は、接線情報の改良に円弧当てはめによる接線情報抽出法 [9] を用いる。これは、ハフ変換を用いて注目点を中心とする曲線に沿った円を定めた窓内から検出し、検出した円の注目点における接線を、曲線の接線とするというものである。曲線に近い円弧を当てはめて考えることによって、直線に近似して考える方法より誤差を小さくできると考えられる。よって、本研究では円弧当てはめによる接線情報の抽出を利用した欠損楕円抽出法を用いる。

図3を確認すると、鉗子先端部分の丸みを帯びた形状を捉えていることがわかる。検出できていない丸みを帯びた形状があったり、余分な楕円を誤検出しているが、円弧当てはめによる接線情報の抽出を利用した欠損楕円抽出法は有効な手段だと考えられる。

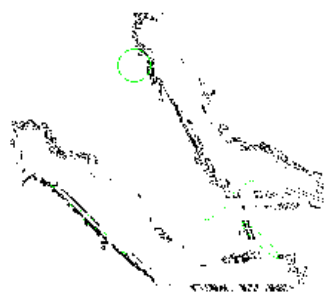
6 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、外科手術ステレオ画像から一定の正確度で鉗子領域を抽出することができた。特定された鉗子領域は凹凸があるが、ノイズを含むエッジ画像に適用すると、鉗子の概形のみを抽出できていることが確認できた。さらに、その特定された鉗子領域のエッジ画像に正方窓を適用し、直線検出のハフ変換と円弧当てはめによる接線情報の抽出を利用した欠損楕円抽出法を用いて鉗子の概形の一部を検出することができた。この検出した概形は、特定した鉗子領域の補正に活用することが期待できる。



(a) 左カメラエッジ画像



(b) 右カメラエッジ画像

図 3: 円弧当てはめによる接線情報改良後の楕円検出

6.2 鉗子領域抽出における課題

鉗子領域抽出における課題について述べる。本研究で提案した鉗子領域の抽出は、水平線上バースト誤りの影響を受けているものの、一定の正確度で鉗子領域の抽出をおこなうことができた。しかし、深度画像内で対象領域（本研究における鉗子領域）が他の領域と区別できないほど深度情報が曖昧な場合は、領域分割が不安定となり、その結果、領域抽出も不安定になる。これを改善することは今後の課題である。

6.3 ハフ変換を用いた補正の考察

本研究では、特定された鉗子領域を補正するために、直線検出のハフ変換の検証をおこなった。実験の結果、実際の鉗子の直線に近い部分を検出することができたことから、直線検出のハフ変換は補正に有効な手段であると考えられる。しかし、外科手術ステレオ画像に対し、sobel 微分フィルタを用いたエッジ画像は、エッジ点となる画素の不連続性や、照明の反射部分、影などの様々な要因によって、ノイズの影響を受ける。このノイズにより、鉗子のエッジ部分となる画素の特定が難しくなり、ハフ変換の投票に悪影響を与える。よって、ノイズの除去やより安定したエッジの抽出をおこなうことが今後の課題である。

6.4 欠損楕円抽出法による楕円検出を用いた補正の考察

次に、欠損楕円抽出法による楕円検出を用いた補正についての考察を述べる。欠損楕円抽出法による楕円検出は、直線検出のハフ変換と比べ多くの投票空間を

必要とする欠損楕円抽出法による楕円検出は、入力画像のノイズなどの影響を受けると、本来投票されるべきセルの得票率が減ることで、計算で使うセルが変わり、計算結果が少しずつかけ離れたものになってしまう恐れがある。また、欠損楕円抽出法による楕円検出は計算途中に閾値が多く、入力画像によって適切な値が変化するので、動画で使用するには閾値の自動設定が必要となる。よって、閾値の自動設定を今後の課題とする。

参考文献

- [1] Yang GZ, Cambias J, Cleary K, et al., “Medical robotics-Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy,” *Sci Robot*, 2: eaam8638, Mar. 2017.
- [2] YIP M, Das N, “Robot Autonomy for Surgery,” In Desai JP, Patel RV eds.: *The Encyclopedia of Medical Robotics*, Vol. 1. World Scientific, Singapore, 2018, pp. 281-313.
- [3] Haidegger T, “Autonomy for surgical robots: Concepts and paradigms,” *IEEE Trans Med Robot Bionics* 1: 65-76, 2019.
- [4] J.Z. Lim, H. Suzuki, S. Utugi, et al, “Experimental Development of a Multi-view Stereo EndoScope System,” *Experimental Development of a Multi-view Stereo Endoscope System*, Vladivostok, pp. 14-18, 2017.
- [5] A.R. Smith, “Color Gamut Transform Pairs,” *SIGGRAPH* 78, 1219.
- [6] 渡辺孝志, 畠山雅充, 木村彰男, “ハフ変換を用いた接線情報の抽出と欠損楕円の検出,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J82-D-II, no. 12, pp. 2221 – 2229, Dec. 1999.
- [7] H. K. Yuen, J. Illingworth, and J. Kittler, “Detecting partially occluded ellipses using the Hough transform,” *Image and Vision Computing*, vol. 7, no.1, pp. 31-37, Feb. 1989.
- [8] R. O. Duda and P. E. Hart, “Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures,” *Communications of The ACM*, no.1, pp.11-15, 1972.
- [9] 木村彰男, 柴田俊浩 “アフィン変換に不変な任意図形検出法として拡張された一般化ハフ変換,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J84-D-II, no. 5, pp. 789-798, March 2001.