

静脈注射支援システムとそのコントローラの開発 Computer Aided Intravenous Injection System and its Controller.

○萩原義裕, 村田大将, 熊谷崇平, 萩原由香里,
アデルジャン・イミティ, 及川果春, 三好扶

Yoshihiro HAGIHARA, Hiromasa MURATA, Shuhei KUMAGAI,
Yukari HAGIHARA, Adiljan Yimit, Miharuru OIKAWA, Tasuku MIYOSHI

岩手大学
Iwate University

キーワード: コンピュータ外科手術支援(Computer Aided Surgery), 血管(Blood Vessel), 静脈注射
(Intravenous injection), マハラノビスの距離(Mahalanobis' distance), ロボティクス(Robotics)

連絡先: 〒020-8551 岩手県 盛岡市 上田 4-3-5 岩手大学 工学部 機械システム工学科

萩原義裕, Tel.: 019-621-6400, Fax.: 019-621-6400, E-mail dhag@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 医療従事者の不足と負担の増加は, 医師だけでなく患者や看護に携わるものにとっても大きな問題となっている. こうした問題に対処するために, 手術支援システムや診断システム, 教育支援システムなど, 様々な取り組みが行われている¹⁾. 血液採取や薬剤投与などに利用される静脈注射は, 投与した薬剤の効果が他の注射方式に比べて最も早く, また確実に現れ, 救急時の緊急処置の目的などで利用されている. しかし, 災害時や検診時など, 時を争い多数の患者等を扱う場合, 採血・静脈への薬剤投与・点滴など静脈注射実施による医療従事者への負担は大きく, 患者等への影響も少なくない.

本研究の目的は, 静脈注射を支援するシステム²⁾を構築することによって, こうした医療

従事者への負担を軽減することである. 時を争い多くの患者を扱うケースを想定しているため, 多数の注射支援システムが必要であると考えられる. 従って, 比較的安価なシステムであることが要求されているといえる. こうした背景を踏まえて, 安価な光学カメラとロボットによる静脈注射支援システムの構築を目指す.

本稿では, 静脈注射支援システムとそのコントローラの開発について述べる.

はじめに, 一般的な静脈注射の手順とシステムの概要について述べ, 次に静脈注射システムで重要な役割を担う静脈血管の抽出と2値画像から注射位置と方向を決定する手法を説明する. さらに, 求められた穿刺位置まで注射針を誘導するアクチュエータについて述べる. また, それぞれについて有用性を検討

した結果について報告する。

2. 静脈注射の手順と注射支援システムの概要

2.1 静脈注射の手順

医師、看護師により手動で静脈注射を実施する際の一般的な手順は、以下のとおりである³⁾。

1. 患者の状態をアセスメント。
2. 実施する環境の調整。
3. 薬剤の準備。
4. 身体的拘束や侵襲が最小限となるような方法の選択。
 - 4.1 目視による大まかな確認
 - 4.2 侵襲によるダメージ評価
 - 4.3 最適位置の決定
5. 注射針の無菌操作による挿入。
6. 注射針の固定。
7. 薬液注入。
8. 注射針の抜去。
9. 医療廃棄物の処理。

健常者の採血や予防注射と異なり、傷病者の点滴や注射には様々な困難が伴う。血圧の低下により極度に弛緩した場合や、その逆に肥厚・硬直した血管では、「血管が逃げる」「血管が固くてささらない」という状態になりやすく、穿刺行為に高い技術を要求される場合も多い。これらのケースは必ずしも傷病者のみではなく、健常者であっても体質に大きく依存する問題である。

2.2 支援システムの概要

静脈注射支援システムは対象となる穿刺位置の決定と抽出された血管への穿刺針のアプローチからなる。概要を Fig. 1 に示す。

穿刺位置の決定では、光学カメラで撮影された画像から穿刺位置を決定する。まず光学カメラからのデータからマハラノビスの距離を用いて、静脈血管を2値画像として抽出する。次に、静脈血管の境界を線分として取り出し、血管の太さを算出する。求められた血管の太さを評価し、穿刺位置を決定する。

抽出された血管への穿刺針のアプローチは、4自由度のアクチュエータを利用して決定した注射位置に注射針を誘導する。まず、画面上の穿刺位置から空間上の目標位置を算出する。次にこれに対応したアクチュエータの姿勢を求め、その姿勢への制御パラメータを算出する。それに基づき穿刺動作を行いながら必要に応じて補正処理を行う。

各手順の詳細は後述する。

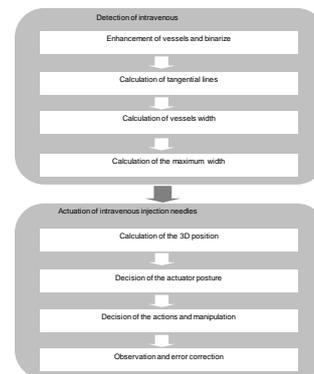


Fig. 1 提案システムの概要. The outline of proposed system.

3. 穿刺位置の決定

3.1 静脈血管の抽出

(1) 抽出手順

本段階では、入力された画像に対して、空間フィルタリング、カラー補正を施し、 L^*a^*b 色空間で画像の正規化を行う。

皮膚の凹凸や体毛、そばかす、不規則な脂肪層などにより生じたノイズを除去するため、

空間フィルタリングを行ってノイズを低減する。皮膚と静脈血管を明確に区別するため、または明度の影響を防ぐため、カラー補正を施し、血管を強調する。次に、RGB 色空間から L^*a^*b 色空間に変換する。さらに、照明条件や皮膚色の相違を抑えるため、Lab 系の各成分値の平均を 0、分散を 1 として画像の正規化により Lab 系の各成分の平均値差を除去することで、血管抽出の向上を図る。

このようにして得られた画像に対して、式(1)により、血管クラスと皮膚クラスとのマハラノビス距離を計算し、距離が小さい方のクラスに属することとする、すなわち、血管クラスとの距離が小さければ、血管と判断する。

$$D^2(x, \mu_j) = (x - \mu_j)^t \sum_j^{-1} (x - \mu_j) \quad \dots(1)$$

ここで、 μ_j はあらかじめ準備したティーチング画像の平均値であり、 \sum_j^{-1} は分散共分散行列 \sum_j の逆行列である。

マハラノビス距離により抽出された 2 値画像の中で、血管の誤判別によって生じたノイズに対して、モロフロジフィルタおよび動的 2 値化を施し、ノイズを低減する⁴⁻⁵⁾。

(2) ティーチングデータベースの作成

前記の手順を実現するためにはあらかじめ既知のティーチング画像を用いてクラスタリングに用いる情報を算出しておく必要がある。光学カメラで撮影されたティーチング画像に対して目視により血管位置を手動的に決定し、マスクをかけておく。このようにして得られたティーチング画像に対して、手動的に決定したマスクにより血管クラス I_1 と皮膚クラス I_2 に分ける。得られた 2 つのクラス

$I_j (j=1,2)$ に対し、式(2)および式(3)より、平均値 μ_j および分散共分散行列 \sum_j を計算し、学習データベースに格納する。

(1)

$$\mu_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_{j,n} \quad \dots(2)$$

$$\sum_j = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (I_{j,n} - \mu_j)(I_{j,n} - \mu_j)^t \quad \dots(3)$$

3.2 穿刺位置の算出

2 値血管画像から注射位置と方向を決定する処理手順を Fig. 2 に示す。

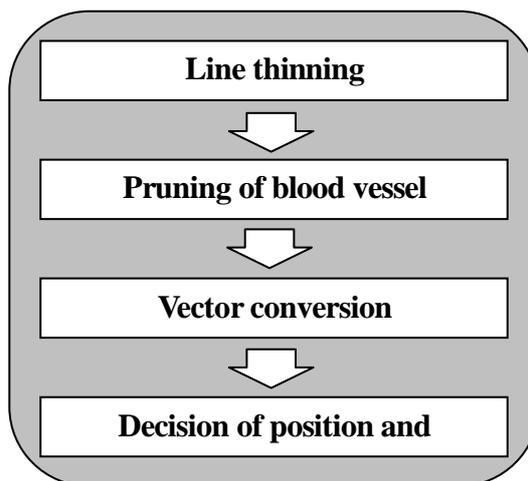


Fig.2 注射位置と方向の決定手順. The outline of decision of injection position and direction.

(1) 細線化

連結成分の連結性を保持したまま画素を削る処理を繰り返す。これにより 2 値血管画像から、血管の中心線である線幅が 1 画素の連結した線図形が求められる。

このとき得られた画素がそれぞれ血管径の中心であるとみなし、注射位置はこれら画素のいずれかになるとした。

(2) 血管径の計測

血管領域の中から注目画素を設定し、こ

の注目画素における血管径を求める。血管径の定義は、注目画素を通り、かつ、血管壁と交わる 2 点間の距離が最小となる線分の長さとした。注目画素における最小距離の算出方法は、次の(A)～(C)の手順である。

(A) 複数の角度 θ ($0^\circ \leq \theta < 180^\circ$) において血管走行方向の候補となる直線を作成する。直線の角度 θ がとる間隔は小さいほど精度は良いが、本システムでは 15° とした。

(B) (A) で定めた複数の直線において、血管領域内の線分長を求める。

(C) (B) で求めた線分長のうち、最小の線分長を、その画素での血管径とする。

注目画素を血管径の中心画素とし、前記の処理をすべての注目画素において行う。その後、求めた血管径が閾値に満たなかった画素を削除する。

(3) 血管の選定

まず(2)で求めた血管径が条件値より小さい血管中心画素を消去する。次に血管の交差部位は注射位置として適切ではないため、連結度が 2 以上となる血管の中心線画素とその周囲の画素を消去する。しかし太い血管に細い血管が交差している場合、その交差部位は消去しないものとする。最後に血管の長さを測定し、条件値より短い血管線を消去する。

これらの処理を行うことで血管を分岐のない一本の線に分けることができ、この中から静脈注射に適した血管を決定することとなる。

(4) チェイン符号化によるラベリング

(3) で求めた血管の中心線画像において、線図形の始点となる画素から 8 方向に延長方向を探索し、画素が存在したらそこに移動す

る。そして、互いに連結する画素に同じ値を与え、異なる連結成分には異なる値を与える。

これにより、同じ値を持つ画素を数えることによって、一つの連結成分の長さである血管の長さが求められる。

(5) 2 分割法によるベクトル化

ラベル化された線図形の始点と終点をつないだ直線に対して、他の各画素からの直交距離を計算する。最大距離が閾値以上であったとき、血管が湾曲しているとしてその画素を削除する。

その後、分割された線図形の始点と終点を直線で結び、注射位置決定の判断材料となる、血管の角度と長さを求める。

4. アクチュエータの開発

穿刺する対象である静脈は人体組織であり、正確な位置への針の誘導が求められる。また、静脈注射に使用する針は 20～23G (0.65～0.8mm) であり、血管の幅は 1～3 mm である。本研究の注射用アクチュエータは、位置制御にステッピングモータおよびネジ機構を用いて針を正確な位置へ誘導することを目指している。

アクチュエータの自由度は、XYZ の 3 軸に加え、穿刺角度の設定が必要となる。したがって最小 4 自由度必要であるが、本システムでは微調整のために 2 台のモータを利用して穿刺角度と位置を同時に制御できるようにしている。

Fig. 3 に本システムのアクチュエータの概念図を、Fig. 4 に実機を示す。

4.1 制御メカニズム

位置制御のための機構はユークリッド空間 (X, Y, Z 軸) の位置決めステッピングモータ

とスライドベースに取り付けた「送りネジ」による移動を用いた機構を用い、針の穿刺角度の決定には 2 つのホビー用のラジコンサーボモータ (RC サーボ) を使用した。

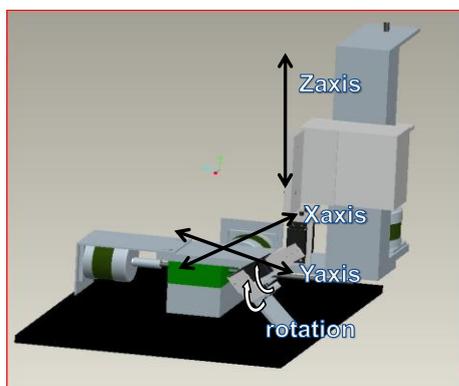


Fig. 3 アクチュエータの概念図. The designed actuator for an intravenous injection support system.

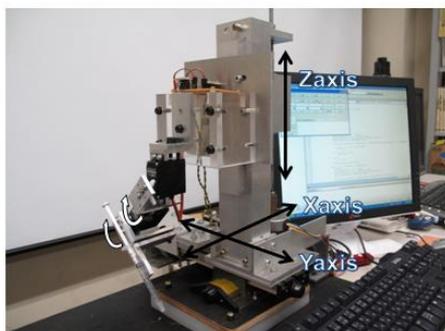


Fig. 4 実機. The realized actuator for an intravenous injection support system.

ステッピングモータはパルスごとに角度を制御することができ、今回使用したものは1-2相励磁で 1.8 度制御することが可能である。ネジ機構のピッチは 1 mm であり 1 回転を 200 分割して制御しているステッピングモータと併用することにより理論的には 1 mm の 200 分の 1 すなわち 0.005 mm 単位で制御することが可能である。

ネジのバックラッシュがあるためモータの回転は回転方向が変化する際にはあらかじめバ

ックラッシュを測定し考慮に入れた上で回転するようにした。

4.2 コントローラとドライバ

コントローラは MicroChip 社の PIC18F2550 を核にした単純な回路である。ステッピングモータは FET アレイを通してドライブし、RC サーボは PIC の出力をそのまま利用した。

PIC18F2550 は USB を内蔵したチップである。PC 側の制御ソフトの開発負担を軽減するためにフォースフィードバック (FF) ジョイスティック用のデバイスドライバを開発し、PC からは FF コントローラとして認識するようにし、DirectX で簡単に制御できるようにした。また、Xinput.dll を偽装することにより XNA からでも利用できるようにした。これによりソフトの計算負荷とソフト自体の開発負担の軽減を実現した。

5. 実験

静脈血管の抽出、穿刺位置の算出、アクチュエータの動作に関し、それぞれ基礎実験を行った。

5.1 静脈血管の抽出

(1) 実験方法

320×240 画素の 20 枚血管画像 (肘と手の甲の血管画像各 10 枚) を肘、手の甲、肘と手の甲の 3 種類に分けて実験を行った。比較手法として、血管と皮膚濃淡モルフォロジー処理の一種であるブラックトップハット処理を行った画像に対して、大津の自動 2 値化より血管を抽出することにした。また、比較手法に

において得られた血管画像をマスク画像として、マハラノビス距離によりさらに血管抽出を行った。提案手法では、あらかじめ用意しておいた学習画像から作られた3種類のティーチングデータベースにもとづいて血管を抽出した。なお、この画像の血管位置は目視により事前に決定した。また、抽出率を評価するため、テスト画像にも目視により血管位置を決定した。

(2) 結果と考察

Table 1は肘、手の甲、肘と手の甲の全体ティーチング画像に対して、血管抽出を行った結果である。

Table1 抽出結果.Results of blood vessels extraction.

Teaching data	Conventional		Proposed	
	TPR	FNR	TPR	FNR
Elbow	35.4%	93.4%	51.2%	92.6%
Hand	57.7%	94.6%	70.0%	90.3%
Hand and Elbow	46.5%	94.0%	63.7%	90.6%

提案手法は従来手法より良好な結果になり、従来手法で抽出できなかったところまで抽出することができた。しかし、マハラノビス距離の誤判別により血管ではないところでノイズを生じてしまった。これは学習画像のコントラストなどのより生じたと考えられる。Table 1から分かるように、手の甲の血管は肘の血管より容易に判別することができるため、手の甲の抽出率が高かった。

5.2 穿刺位置の算出

(1) 実験方法

あらかじめ2値化されたファントム画像を

作成し、処理結果を調べた。ファントム画像は仮想的な静脈を手作業で描いた画像である。作成した画像の数は26枚で、各画像サイズは320×240画素とした。

(2) 結果と考察

26枚のファントム画像中、23枚の画像で注射位置が検出された。そのうち22枚で適正な位置が決定された。Fig. 5に原画像、Fig. 6に結果を示す。(a)は成功、(b)は失敗したケースである。処理に要した時間は、一枚あたりおよそ5秒であった。



Fig. 5 原画像.The original images.

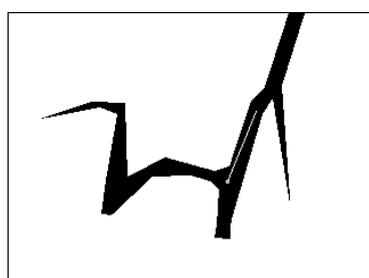
注射位置が検出されなかった3枚は、血管が細かったか交差部位が多いため、中心線画像が分割されて短くなり、条件を満たす箇所が存在しなかったためであった。適正な位置が決定されなかったと判定した1枚は、注射位置が交差部位となったためであった。Fig. 6(b)はそのケースである。原因は、太い血管に細い血管が交差する場合に（細い側の中心線だけを消去するはずであるが）、交差部

位が大きかったため中心線が湾曲し、ベクトル化の処理過程で余計に分割されてしまったためであった。

本実験では前述の条件下で実施したが、条件次第では処理結果がさらにより良くなる画像もあれば、悪くなる画像も存在した。そのため撮影条件を一定にする、または画像それぞれに適した条件を自動で設定するアルゴリズムが必要であると考えられる。



(a)Result of the case 1



(b)Result for the case 2

Fig.6 算出結果.The results with this system.

5.2 アクチュエータ

(1)実験方法

アクチュエータ部分の精度を計測するためにコンピュータからの制御信号による理論的な位置と実際の位置を比較する実験を行った。アクチュエータの先端にマーカを取り付け、パソコンから目標点を4か所設定し、目標点到達時にマーカで印を付け、誤差を測定した。

(2)結果と考察

セクションペーパーにおいて目視では確認できるほど大きな誤差は生じなかったが、送りネジ角度測定により20mmの移動時に最大で10ステップ(0.05mm)の誤差が生じることが確認された。

穿刺対象である血管の太さは1~3mm、静脈注射用の針の太さは0.65~0.8mmであるので、血管が最小かつ針が最大の場合でも左右の余裕は0.1mmで誤差を含めても0.05mmの誤差は許容範囲内と考えられる。

6. おわりに

本稿では、静脈注射支援システムとそのコントローラの開発について述べた。はじめに、一般的な静脈注射の手順とシステムの概要について述べ、次に静脈注射システムで重要な役割を担う静脈血管の抽出と2値画像から注射位置と方向を決定する手法を説明した。さらに、求められた穿刺位置まで注射針を誘導するアクチュエータについて述べた。また、それぞれについて有用性を検討した結果について報告した。今後の課題は、穿刺針のアプローチまでの処理の自動化、医療従事者の関与部分の検討、実証試験である。

参考文献

- 1) 呉宗, 孟宗, 張儀中: 静脈注射装置, 特開 2005-66310 (2005)
- 2) 徳光聡, 血管注射補助装置: 特開 2004-267534 (2004)
- 3) 徳嶺譲芳: 超音波ガイド下中心静脈穿刺法マニュアル, 総合医学社, 東京, (2007)
- 4) 下田他: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版社, (1991)
- 5) 中川 俊明, 畑中 裕司, 林 佳典: 眼底画像におけるモルフォロジーフィルタを用いた血管抽出および視神経乳頭部の認識, Technical report of IEICE. P RMU 105(62) pp. 67-71 (2005)