

# RGB-D 画像センサを用いた結紮手技訓練システム

小川 陽子<sup>1,a)</sup> 島田 伸敬<sup>1</sup> 白井 良明<sup>1</sup> 来見 良誠<sup>2</sup> 小森 優<sup>3</sup>

**概要:** 外科訓練医は熟練医の指導のもと様々な手技を習うが、手取り足取りの指導が望ましいとされる中、職務に多忙な熟練医は十分な指導の機会を確保しにくいと言われている。本稿では、訓練医の手術手技の自己学習を補助するシステムの開発を目指して、訓練者の結紮動作を画像計測し、ジェスチャ認識の技術によって模範動作と比較することで結紮手技の要改善箇所を訓練者に指摘する技術について述べる。

YOKO OGAWA<sup>1,a)</sup> NOBUTAKA SHIMADA<sup>1</sup> YOSHIKI SHIRAI<sup>1</sup> YOSHIMASA KURUMI<sup>2</sup> MASARU KOMORI<sup>3</sup>

## 1. 結紮手技と訓練システム

外科訓練医は熟練医師の指導のもとにさまざまな手技を習うが、熟練医は自身の職務に忙しく十分な直接指導の機会が確保しにくいと言われており、効果的な訓練医の自学自習が必要となっている。自学自習効果を向上する手段として、訓練医が訓練器上で実演した手術手技を自動評価するシステムが考えられる。特に学び始めの段階では、基本的な手の使い方と手順が熟練医による手本に沿っているかどうかを自動チェックして、合致しない瞬間や手指の部位を指摘できればより効率的な自学自習ができる。そこで本稿では、結紮手技（糸結び）の自学自習システムを作ること念頭に、訓練医の結紮動作を画像で観測し、ジェスチャ認識技術によって模範動作と比較し、要改善箇所を被訓練者に指摘する技術について述べる。

結紮手技における糸の結び方には種類があり、手技中の不適切な箇所を指摘するには結び方の識別が必要となる。糸の結び目を画像で識別するのは困難であるが、手指の動きは比較的観測しやすい。近年では RGB-D センサが安価に利用できるため、本稿では深度センサで観測した手技中の両手指の三次元点群を入力情報として用いる。結び動作の種類を手指形状と動きによって特徴付け、入力動作とモデル手技動作の時系列における点群情報（フレーム）同士を照合して結び動作を識別する。識別した結び動作との照合結果に基づき、モデルと照合しない不適切な手指形状を

含む入力フレームを特定する。特定された不適切な入力フレームの中で、手指のどの部位が不適切と評価されたかを特定し、空間的な情報として被訓練者に視覚的に提示して改善箇所を指摘する。

本稿では、熟練医の協力によりいくつかの糸結び動作データセットを収集しモデルを作成し、主に初学時の被訓練者を対象に動作の照合および不適切な動作の指摘をする実験を行った結果を報告する。

## 2. 結紮動作の構造

手術の際の一箇所の結紮は、表の結び目と裏の結び目が交互になるよう3回結びを繰り返す。外科医はこれをできるだけ素早く正確に行うことが要求される。1回の結び動作は、結び目を作る技術と縛る（結び目を締める）技術で評価される。本稿では一回の結紮動作を手のジェスチャとして捉え以下の3ステップに分割する。

**1.closing** 両手で持った糸を近づける

**2.tying** 結び目を作る

**3.tightening** 糸を引っ張り締める

結び目を作る際にはステップ2の手の姿勢（形状）が結び目の出来に影響する。縛る際にはステップ3での糸を引っ張る方向と強さが重要となり、手の形状は重要ではない。また結び目が表であったか裏であったかはステップ2の動作で決まる。そこで、手技動作のデータからステップ2の部分をまず抽出し、結び動作タイプの識別と不適切な動作区間や部位の特定を行う。

## 3. 結び区間候補の検出

本手法では RGB-D カメラを用いて点群を観測する。観

<sup>1</sup> 立命館大学, Ritsumeikan University

<sup>2</sup> 滋賀病院, Shiga Hospital

<sup>3</sup> 滋賀医科大学, Shiga University of Medical Science

a) ogawa@i.ci.ritsumeikan.ac.jp

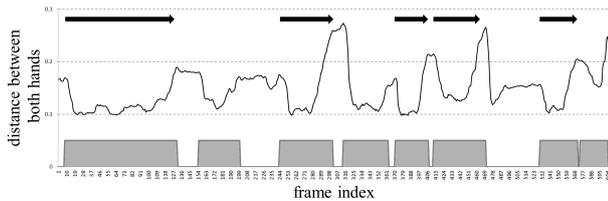


図 1 両手間距離の遷移：図上部の矢印は実際に結び動作が行われた区間，図下部の四角は検出された結び区間候補

表 1 結び動作タイプ

ラベル	結びを作る手	糸の端の向き	手の動く方向	結び目
1	両手	左手：奥 右手：手前	手前へ	裏
2	両手	左手：手前 右手：手前	手前へ	表
3	両手	左手：手前 右手：手前	奥へ	裏
4	左手	左手：手前 右手：手前	手前へ	表
5	左手	左手：手前 右手：手前	奥へ	裏
6	右手	左手：手前 右手：手前	手前へ	裏

測された点群は RGB の色情報と XYZ の位置情報を持つ。手の動作を記述するために、まず観測された点群から、色相、彩度、明度、およびカメラ座標系における X 座標、Y 座標、Z 座標に上下の閾値を設け、それぞれが閾値の範囲内に収まる点のみを手領域の点群として切り出したのち、点群を左右の手に分類する。5 回の結び動作を行った例について両手間の距離の推移 (図 1) をとると、ステップ 2 の区間で両手が近付いた状態が持続することがわかる。そこで両手間の距離を計測して結び動作区間の候補 (以下結び区間候補) を検出する。登録すべき模範手技例からこの区間を抽出してモデルとし、被訓練者の手技はその都度同じ方法で結び区間を抽出したのちモデルと照合する。

## 4. 結び動作タイプの識別

### 4.1 結び動作のタイプ

結び動作には数種類の異なる動作タイプがあり、動作タイプによって結び目の種類が決まる。できた結び目を直接観測することは難しいが、結び始めの左右の糸の持ち方や結びを作る手の動作によって結び目が変わるので、結び区間に対して手の形と動きを観測すれば結び目を判別できる。ここでは結び動作タイプを“結びを作る手”、“結び始めにおける糸の端の向き”、“手の動く方向”の 3 つの属性に基づいて 6 種類に分類した (表 1)。

### 4.2 手形状の特徴記述

結び目を作る手指の三次元形状の記述に SHOT 特徴量 [1] を用いる。この特徴は、特徴記述のためのローカル座標系

である局所参照座標 (LRF) と、その原点  $\mathbf{p}$  を中心とした半径  $R$  の球内の点群  $\mathbf{p}_j$  の法線の分布をヒストグラムで表した SHOT 記述子からなる。SHOT 記述子のヒストグラムは、方位角を 8 分割、仰角を 2 分割、半径を 2 分割した 32 の部分位置に対応する空間ビン (図 2) ごとに分けて集計され、モデルと入力の特徴を比較したときにどこが合わないのかを特定することができる。結びを行う人はカメラに正対するものとし、人に対する糸の位置はそれほど動かないとした上で、両手の点群の重心を LRF の原点とし、LRF 内の空間ビンが両手全体を含むように  $R$  を 15cm とした。

### 4.3 結び動作タイプの識別

表 1 の 6 種類の結び動作ごとに模範手技を撮影し、各時刻フレームの三次元点群データから SHOT 特徴量を抽出してモデルの特徴時系列を予め構築しておく。訓練時には、被訓練者の手技動作を撮影したものを入力とし、いくつかの結び区間候補を検出したのち、候補区間ごとにモデルと同様の SHOT 特徴量の時系列を抽出する。この入力特徴時系列と 6 種類のモデル特徴時系列を比較する。モデル  $M$  の時刻  $\tau$  フレームと入力  $I$  の時刻  $t$  フレームの相違度  $d$  を

$$d(I(t), M(\tau)) = \sum_k |f_k^{I(t)} - f_k^{M(\tau)}| \quad (1)$$

として定義する。ただし  $f_k^{I(t)}$ ,  $f_k^{M(\tau)}$  はそれぞれ入力フレームとモデルフレームの SHOT 特徴量の  $k$  番目の成分である。 $d$  の総フレームに対する平均値  $\bar{d}$  が最小になるように  $\{(t, \tau)\}$  の組み合わせを動的計画法 (DP) を使って探索する。最小化された  $\bar{d}$  が入力とモデルの時系列全体の相違度を表すので、これが最小のモデル  $M$  を入力に対応する結び動作モデルと判定する。ただし  $\bar{d}$  が閾値  $T_c$  より大きいときはその結び候補区間を結び以外の動作とする。

## 5. 不適切動作のフレームおよび手指部位の特定

前節の手法で入力に最も適合する結び動作モデルが選択されるが、同時に  $\{t, \tau\}$  の組み合わせの時系列も得られているので、これを入力/モデル間の対応フレームとみなして、フレームごとの相違度  $d(I(t), M(\tau))$  が閾値  $T_f$  を超え

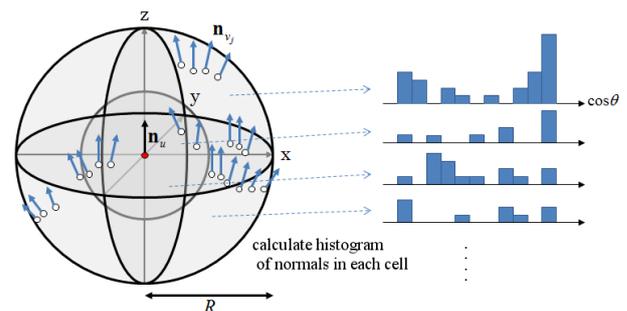


図 2 SHOT 特徴の構造

表 2 熟練医モデルによる結びタイプ識別の混同行列

		結びタイプの識別結果						
		1	2	3	4	5	6	非結び区間
正解	1	1	0	0	0	0	0	0
	2	13	2	1	1	1	3	0
	3	1	2	12	3	0	0	0
	4	5	0	0	25	0	2	0
	5	0	0	1	0	1	1	0
	6	0	0	0	0	0	29	0
	非結び区間	0	0	0	0	0	7	17

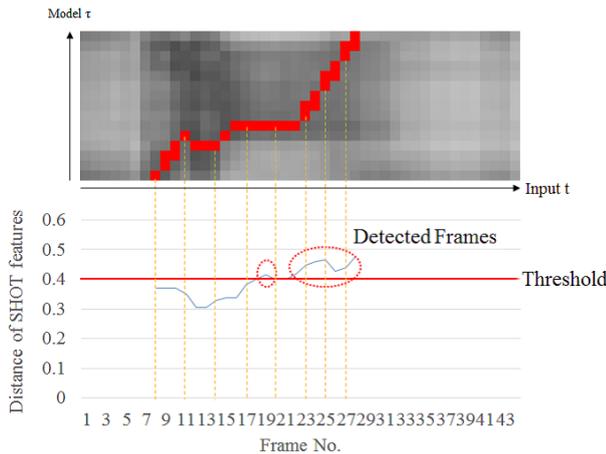


図 3 入力特徴時系列と結び動作モデルの照合結果//上: SHOT 特徴間距離マップと最小コストパス (赤色線), 下: パス上の SHOT 特徴間距離

た入力フレーム  $t$  を不適切動作フレームとして特定する。特定された不適切動作フレームについて, SHOT 特徴の空間ビン  $i$  ごとにそのヒストグラム特徴間の相違度  $d_i$

$$d_i = \sum_{k \in q_i} |f_k^{I(t)} - f_k^{M(\tau)}| \quad (2)$$

を調べ,  $d_i$  が閾値  $T_s$  以上であるビン  $i$  の場所にある手指の三次元点群を不適切部位と特定する。なお  $q_i$  は  $i$  番目の空間ビンに属するヒストグラム特徴成分の集合である。

不適切動作フレームと不適切部位が特定されると, 被訓練者のカラー映像と点群の三次元グラフィックス上に指摘箇所を重ねて表示することができる。

## 6. 実験結果

上述の手法を用いて結紮手技のモデリング, 結び動作タイプの識別, 不適切動作フレームと部位の特定について評価実験を行った。訓練者の前上方約 80cm の位置に深度センサ (ASUS Xtion Pro Live) を設置し, 640x480 画素の深度画像およびカラー画像を約 20fps の速度で撮影した。深度情報の解像度は 1mm で計測精度は手指の位置でおよそ 5mm 以下の誤差であった。

撮影対象として, まず未経験者 2 名について, さらに後日熟練医 1 名を追加して, それぞれに 6 種類の結び動作をランダムに連続して演じてもらった。このうち未経験者 1 名と熟練医との動作から, 6 種類の結び動作ごとに適切な動作区間を 1 つ手動で切り出し, それぞれの結び動作タイプのモデル群 (素人モデルおよび熟練医モデル) を作成した。

### 6.1 結び動作タイプの識別結果

まず素人モデルを用いて, もう一人の未経験者の動作を訓練用入力 (合計 18 回の結び動作が含まれる) と 6 種類の結び動作タイプとの照合実験を行った。その結果, 非結び

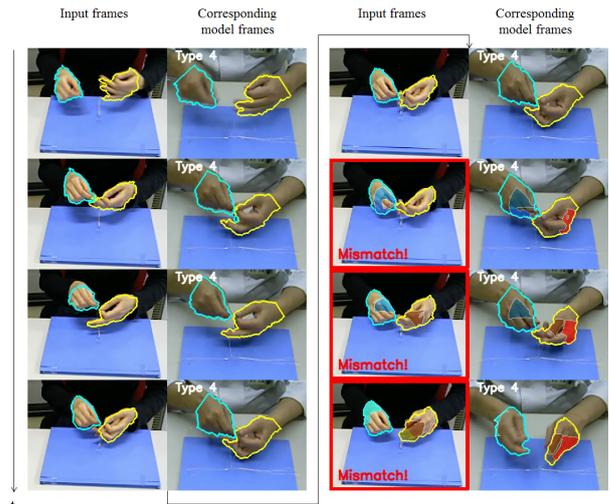


図 4 対応付けられたフレームペア例: 赤枠は不適切動作フレームを示す。色付けられた領域は検出された不適切部位を示す。

動作区間を含む合計 23 箇所の結び区間候補が自動的に検出され, そのうち正しく識別できた区間が 91%(21 区間, 非動作区間として正しく棄却された 5 区間を含む), 結びタイプの誤分類が 9%(2 区間) であり, 誤検出 (結び動作でないところを検出) と検出漏れ (結び動作が検出されない) はなかった。

次に, 熟練医モデルを作成した後, 未経験者両名の動作シーケンスを全て訓練用入力 (合計 104 回の結び動作が含まれる) とし, 同様の設定で検出および識別を行った。その結果, 結び区間候補が合計 128 箇所検出され, そのうち正しく識別できた区間が 68%(87 区間, 非動作区間として正しく棄却された 17 区間を含む), 誤分類が 27%(34 区間), 誤検出が 5%(7 区間) であり, 検出漏れはなかった。混同行列を表 2 に示す。熟練医の手技では, 未経験者に比べて無駄な動きが少なく, 動作タイプ間やフレーム間での特徴が類似しているケースが増加したため, 結びタイプ識別の成績が素人モデルの場合よりもやや劣化した。とくに結びタイプ 1 と 2 の動作が非常に似通っていたため, 結び 2 を結び 1 に誤分類するケースが多かった。

### 6.2 不適切動作フレームと不適切部位の特定結果

図 3 はある入力の結び区間候補のシーケンスと最もよく

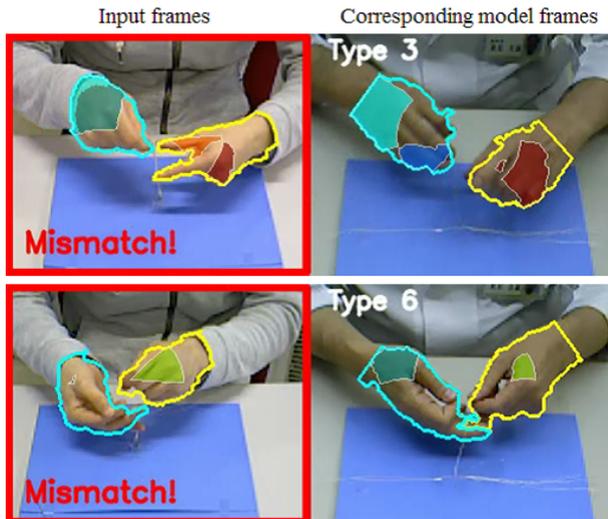


図 5 不適切動作フレームと不適切部位の検出結果: 色付けられた領域は検出された不適切部位を示す。

照合した動作タイプとの照合の様子である。図 3 上図は特徴間の相違度マップであり、縦軸がモデルシーケンスのフレーム番号、横軸が入力シーケンスのフレーム番号、図中に濃淡で示される各点是对应する入力とモデルのフレーム同士の特徴間相違度を表す(黒いほど一致=相違度が小さい)。相違度マップ上に描かれた赤線は DP 照合で求めた最小コストパスであり、パス上の各点が入力とモデルの対応フレームを意味する。図 4 は対応付けられた入力動作フレームとモデルフレームにおける結び動作の様子である。パス上の特徴間相違度を個々の入力フレームごとに評価し相違度が閾値以上のフレームを不適切フレームと判定する(図 3 下図: 図中縦方向の破線は図 4 に示す各入力フレームの時刻)。

訓練時に一通りの結び動作を行うと、画面上にリプレイが表示され、もしモデルとの相違が大きくなると不適切動作フレームが検出された場合は、当該画像フレームを赤枠で囲うことによっていつ不適切な動作が起こったかを被訓練者に指摘する。また検出フレーム内においてモデルとの相違が大きかった訓練者の手指部位を手領域に色付けして重畳表示することで、手指のどの部分がモデル動作と相違したかを指摘する。図 5 は実験において指摘された不適切フレームの例である。図の左側が訓練者の入力動作フレーム、右側が対応した結び動作タイプの熟練医モデルフレームである。両手の相対位置の違いと手指の形状の違いの両方を検出し、空間的な部位を指摘できている。

## 7. 実用的な手技訓練システムを目指して

本稿では、手術手技における結び動作訓練の自動化を目的として、被訓練者の結び動作を深度センサーを使って撮影し、熟練者の手技モデルと特徴照合することによって結び動作タイプを自動分類し、モデル動作との相違が大きくな

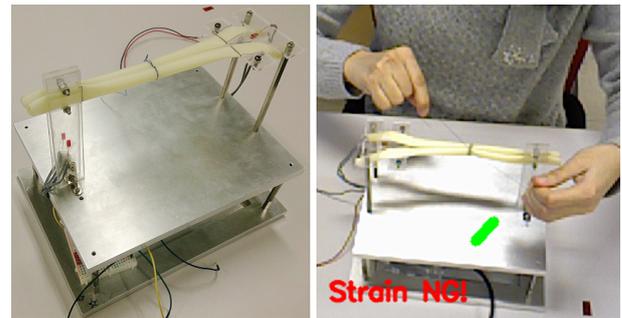


図 6 対象組織にかかる荷重計測のための訓練器: (左) 訓練器の外観。(右) 荷重異常検知例。画像中央下部の緑の線は、手前方向に大きく荷重がかかったことを示している。

部位を時空間的に画面上で指摘して被訓練者の自学自習を促進する手法を紹介した(詳細は [2] 参照)。実用的な訓練システムのためには、より多くのモデル事例を登録し、検出精度をより高めること、ならびに被訓練者にとってどのように助言するとより学習効果上がるかの検討など、多くの課題が残っている。熟練医に本手法を紹介して意見を求めると、結紮手技に関しては、結び目の出来が評価上のポイントであり、手技が身についてくれば必ずしも熟練医師と同じ動きを細部まで再現する必要はなく、むしろ結び目にかかる糸の張力が組織を痛めず確実に結紮できるものになっているのが重要であるとの指摘があった。現在組織にかかる荷重を同時計測するための訓練器の構造についても試作を進めており [3][4] (図 6)、画像計測と力計測の双方を組み合わせることで、より学習効果のある訓練システムの提案ができればと考えている。

## 参考文献

- [1] Tombari, F., Salti, S., and Stefano, L. D.: Unique signatures of histograms for local surface description: in Computer Vision ECCV2010, Springer Berlin Heidelberg, pp. 356–369, 2010.
- [2] Ogawa, Y., Shimada, N., Shirai, Y., Kurumi, Y., Komori, M.: Temporal-Spatial Validation of Knot-Tying Procedures Using RGB-D Sensor for Training of Surgical Operation: Proc. of IAPR Int'l Conf. on Machine Vision Applications (MVA2015), pp. 263–266, 2015.
- [3] 小川陽子, 横田加保子, 松尾直志, 島田伸敬, 白井良明, 来見良誠, 小森優: 結紮訓練時の結紮対象にかかる負荷力計測方法の検討: 第 3 回看護理工学会学術集会プログラム・概要集, P6-02, pp.74, 2015.
- [4] 横田加保子, 小川陽子, 松尾直志, 島田伸敬: 結紮手技訓練システムのための荷重計測方法の提案., 電子情報通信学会 2016 年総合大会, ISS-SP-249, 2016.