

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K11493

研究課題名(和文) 深層学習による手術支援ロボットの外科手術工程のリアルタイム認識に関する基礎的研究

研究課題名(英文) Basic Study on Real-time Recognition of Surgical Procedures by Surgery-assisting Robot Using Deep Learning

研究代表者

宮脇 富士夫 (Miyawaki, Fujio)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：50174222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：外科手術の手順は複数の外科操作の順次切り替りとして表すことができるが、単純なセンサなどで個々の外科操作の切り替りを捉えることができない。そこでこの切り替りを深層学習によってリアルタイムに認識できないか検討した。主な結果のみを記す。執刀医の動作だけから外科操作を識別する試みによって、剥離を76.6%、結紮を88.5%、切離を52.5%、止血を59.9%の割合で識別可能となった(4操作の平均識別率は69.4%)。この試みでは元の動画を1秒刻みに分割して作成した多数の小動画を対象として学習及びテストを行なったので、1秒程度の時間遅れで手術支援ロボットにも外科操作の識別が可能となることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は外科手術を対象としているが、最終的には一般的な出来事にも拡張させることを目標としている。現実の出来事は時々刻々連続的に変化し切れ目が無いが、これを人間は理解・記憶し易いように意図的に区切っている。

例えば、外科手術でも執刀医の同じような連続的動作が繰り返し観察されるため、馴染みのない者は外科手術の工程が理解できない。しかし、連続的動作の何処から何処までは「剥離」という目的で行われた連続的動作と分かれば理解・記憶できるようになる。この人間の意図的な区切りが深層学習によって同定できれば、人間の物事に対する見方をロボットにも学ばせることが可能となる。これが本研究の意義である。

研究成果の概要(英文)：The entire process of surgery can be shown as a sequence of plural surgical procedures such as dissection, hemostasis, ligation, division and others. No simple sensor, however, can detect any transition from one procedure to another. Then, we investigated whether each transition could be identified by deep learning. A main achievement is as follows. By using only operating surgeons' motions as input data, the identification rates were 76.7% for dissection, 88.5% for ligation, 52.5% for division and 59.9% for hemostasis (the class average rate was 69.4%). These results were obtained from many one-second videos which were made by dividing original long videos at an interval of one second, thereby suggesting that a surgery-assisting robot may detect each transition of surgical procedures after a delay of one second.

研究分野：生体医工学

キーワード：外科手術工程リアルタイム認識 深層学習 深層ニューラルネットワーク 執刀医動作特徴 術野内視鏡動画 模擬的腹腔鏡下胆嚢摘出術 器械出し看護師ロボット 手術支援

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

鏡視下外科手術の際に執刀医に手術器具を提供する器械出し看護師ロボット (SNR) システム (図1) の研究開発の一環として、外科手術のモデル化 (外科手術の手順、外科医や看護師の行為、患者の状態などのモデル化で、SNR にとって外科手術の“記憶”に相当) を Uppaal 形式の時間オートマトン (Uppaal TA) でを行い (図2)、さらに Uppaal TA と C++ で記述したアプリケーションプログラムとの信号の遣り取りを可能とするソフトウェア的アダプタも開発した【文献1】。

これによって、手術器具に装着したセンサからの信号によって SNR の頭脳の中にある‘外科医行為モデル’ (図2③) の状態遷移が可能となり、外科医が使い終えた手術器具を体壁に留置した中空管 (トロカール・カニューレ) から抜去するやいなや SNR が次の手術器具をトロカール・カニューレに挿入できるようになり執刀医をより一層支援することが可能となった。

しかし、優秀な人間の器械出し看護師は内視鏡画像から現在の外科操作が何でありどの段階か正確に判断するとともに、次の手術器具も予測している。SNR にもこの機能を獲得させることができれば、さらなる手術支援が期待できる。

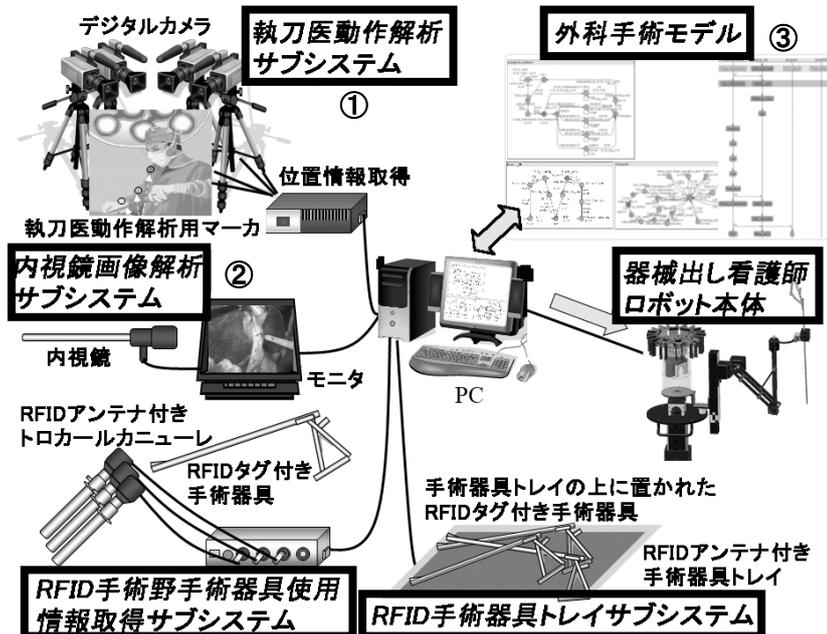


図1 器械出し看護師ロボットシステムの概略図

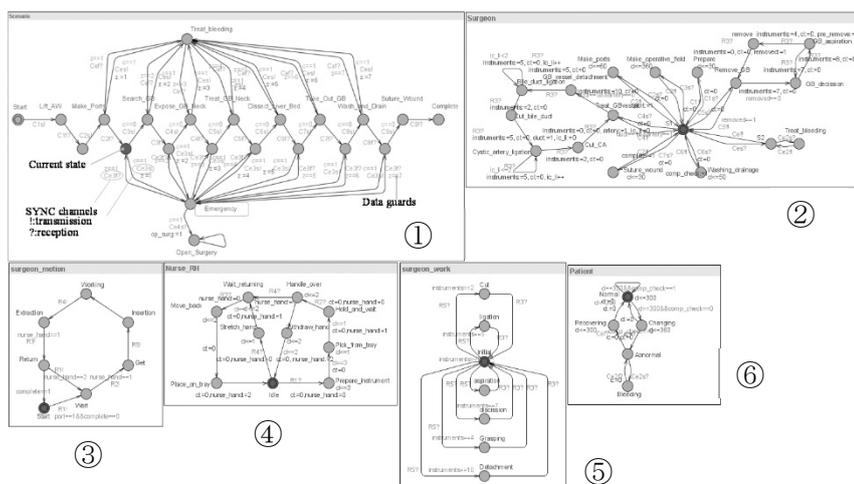


図2 外科手術のモデル化

2. 研究の目的

SNR の頭脳にある外科手術モデルの大きな工程を示す‘手術手順モデル’ (図2①) の状態遷移は‘外科医行為モデル’ (図2③) のような小さなモデルと異なって、状態遷移を促す単純な信号は術野には無い。そこで、内視鏡で取得される外科操作動画、執刀医の動作動画、手術器具情報を入力情報とする深層ニューラルネットワーク (DNN) に代表される深層学習を行うことによって、手術が現在どの段階 (状態) にあるのか識別できるかどうかを本研究目的とする。さらに、これによって構築された状態認識 DNN モデルによって Uppaal TA で記述された外科手術手順モデルの‘自動状態遷移’を実現する。

3. 研究の方法

1) 模擬的腹腔鏡下胆嚢摘出術

内視鏡手術トレーニングキットを用いて研究代表者 (元心臓血管外科指導医) と手術未経験の学生の合計 12 名が腹腔鏡下胆嚢摘出術の模擬を行い、その様子を 3 台のカメラで同期撮影した (図3)。胆嚢と胆嚢管は風船で模擬し、マジックテープで模型肝臓に貼り付けた。このマジックテープには小さく丸めた赤い毛糸を何カ所か貼り付けて出血部位を模擬した。今回の手術手

順は、剥離、止血、結紮、切離の4種類の外科操作のみとし、腹腔鏡に相当するカメラ (Cam1) 映像映出し出されるモニターを見ながら行った。

撮影動画の一コマごとに付すラベルは、前記の4種類の外科操作、2種類の手術状況(出血、止血)、7種類の手術器具情報などとした。

例えば、赤い小さな毛糸が画像に現れている間は‘出血’という手術状況ラベルを付し、先端に墨汁を付けた手術器具(模擬電気メス)によって赤い毛糸が黒く塗りつぶされて以降は‘止血’という手術状況ラベルを付した。

また、模擬電気メスが画像に現れた時点から赤い毛糸が黒く塗りつぶされ、模擬電気メスが抜去されるまでの画像には外科操作ラベルとして‘止血’を付し、手術器具ラベルとしては利き手には‘電気メス’、利き手でない方には‘把持鉗子’を付した。

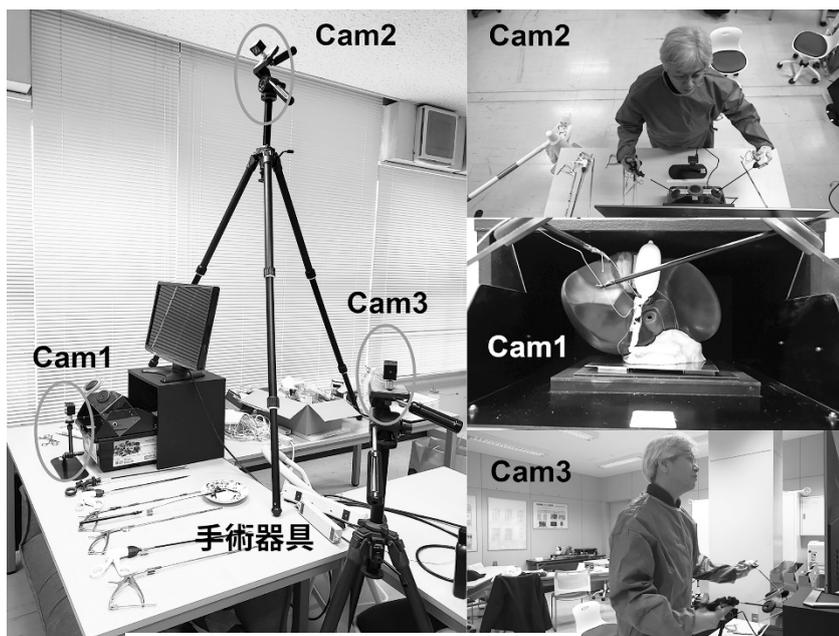


図3 模擬的鏡視下胆嚢摘出術

2) 深層学習

‘手術器具ラベル’を利用すると深層学習がより容易になると考えて、これ以降に示す深層学習では‘手術器具ラベル’を使用しないで行った。

・執刀医動作解析

Cam2 から得られる執刀医の動作情報のみから4種類の外科操作(剥離、止血、結紮、切離)を識別可能か検討した。執刀医の動作情報は OpenPose が検出する人体特徴点座標値を用いた。いくつかの既存の手法で検討したが、Temporal pose feature CNN (TPF CNN) と命名した新規の手法でも深層学習を試みた。これは、人体特徴点座標値を時系列で並べた行列(時系列動作特徴行列)を疑似的な画像データとみなし、CNN の入力データとして用いる既存の手法を少し改変した手法である。

・内視鏡動画解析

一般的に外科手術で執刀医が最も怖れるのは予期せぬ出血である。出血部位が同定できない場合は執刀医の手指による圧迫で一時的な止血を試みる。しかし、鏡視下外科手術の場合は執刀医の手指で出血部位を圧迫できないため、出血のできるだけ早い同定は重要である。そこで、内視鏡動画(Cam1 で撮影した動画)から手術状況(出血、止血)の認識が可能かどうか通常の CNN で評価した。

4. 研究成果

・執刀医動作解析

執刀医の動作を OpenPose で取得し4種類の外科操作を自動認識する深層学習手法 TPF CNN を2019年度提案したが、2020年度はさらに改良発展させた【文献3】。具体的には、10秒間の動画(600 fps)1コマ毎に OpenPose で取得された36次元の姿勢特徴ベクトル情報(身体18箇所各x y座標)を付した時系列姿勢特徴行列(600x36)を TPF CNN への入力データとした。2019年度と同様に LSTM と比較したが、2020年度はそれぞれ10回試行し、さらに Leave-videos-out 評価を行った。剥離操作識別率は TPF が $74.3 \pm 4.3\%$ で、LSTM が $77.2 \pm 5.8\%$ 、結紮は $89.3 \pm 4.2\%$ と $85.4 \pm 5.2\%$ 、切離は $36.7 \pm 7.1\%$ と $28.6 \pm 11.6\%$ 、止血は $58.1 \pm 8.9\%$ と $48.6 \pm 12.5\%$ 、クラス平均は $64.6 \pm 2.4\%$ と $59.9 \pm 4.0\%$ であり、剥離以外は TPF の方が良好であった。

2021年度には TPF CNN をさらに発展させるとともに、リアルタイム評価に繋がる試みも行った【文献4】。2020年度に提案した TPF CNN は10秒間の動画(600コマ)の1コマ毎に OpenPose で取得された36次元の姿勢特徴ベクトル情報を付した時系列姿勢特徴行列(600x36)を入力データとしたが、2021年度は10秒間動画に加えて3秒間動画及び1秒間動画も作成した。これらの小動画時間は短縮不能な認識ラグ時間に相当するので、例えば1秒間動画でも比較的良好な識別率が得られれば、リアルタイム認識により近づくことになる。3段階の認識ラグ時間が外科操作識別精度に及ぼす影響を調べた。

また、学習データ数を増やすために、前記の3段階の長さの小動画においてそれぞれ重複率 50、95%のデータセットを作成し、重複率と認識精度の比較実験も行った。その結果、認識精度が最大であった 95%に重複率を設定した。

以上のような条件設定で、TPF CNN に Residual Network の residual block 層を導入した場合 (Res-TPF CNN) としない場合で Leave-videos-out 評価によって比較検討した。Res-TPF CNN も TPF CNN もともに動画秒数が長くなるにつれて識別率が上昇する傾向が認められたが、全ての秒数で Res-TPF CNN の識別率が高く、residual block 層の導入が識別率向上に貢献することが分かった。さらに、1秒間の動画による Res-TPF CNN のクラス平均識別率は $69.4 \pm 1.01\%$ (平均±標準偏差、N=10) であり、10秒間動画の場合の $71.9 \pm 1.36\%$ より少し低かったが、residual block 層を導入しなかった場合の 10秒間の TPF CNN ($69.5 \pm 1.61\%$) と同等であった。これは同じ識別率を得るためのタイムラグを 10秒から 1秒に改善できたことを意味し、リアルタイム認識に少し近づくことができた結論した。

・内視鏡動画解析

内視鏡動画像から出血点の同定と止血完了の認識が可能かどうか検討した【文献 5】。模擬手術の出血点は小さな赤い糸玉で模した。止血完了は先端を墨に浸した器具で糸玉を完全に黒く塗りつぶすことで模した。通常の CNN の層構造の数、畳み込み層のフィルタの数、フィルタサイズやストライド幅などの最適化を試行錯誤的に行った後に、初期学習率、エポック数の最適化を試行錯誤的に行った。訓練用の出血および止血画像数 (それぞれ時系列は無視) はともに 1000 枚、テスト用の出血および止血画像数ともに 100 枚とし、Leave-videos-out 評価を行った。出血を $98.80 \pm 1.94\%$ 、止血を $42.20 \pm 8.28\%$ (それぞれ N=5) で識別可能であった。

<引用文献>

- 1) Fujio Miyawaki, Miho Suzuki, Aivo Anier, Jüri Vain: Integration of 'Central' and 'Peripheral' Nervous Systems in Scrub Nurse Robot and Comparison Between 'Voluntary' and 'Reflex' Movements. 14th IFAC Symposium on Analysis Design and Evaluation of Human Machine Systems: 229-234, 2019【査読有り】
- 2) 宮脇 富士夫：深層学習による外科手術工程のリアルタイム認識に関する基礎的研究。Medical Science Digest, vol. 46(5): 45-47, 2020【査読無し】
- 3) Shota Kishi, Nozomu Suzuki, Shota Tsuyuki, Takio Kurita, Fujio Miyawaki, Akinori Hidaka: Convolutional Neural Network based on Temporal Pose Features for Surgical Procedure Recognition. Proceedings of the 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications 60-64, 2021【査読有り】
- 4) Nozomu Suzuki, Fujio Miyawaki and Akinori Hidaka. Improving Accuracy and Real-Time Performance of Recognition Methods for Surgical Procedure Recognition. Proceedings of the 28th International Workshop on Frontiers of Computer Vision (IW-FCV2022), pp. 572-586, Feb. 21-22, 2022.【査読有り】
- 5) 石黒達也、日高章理、宮脇富士夫：深層学習による外科手術中の出血点発見に関する基礎的研究。第 30 回ライフサポート学会フロンティア講演会 (2021/03/09) 東京

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nozomu Suzuki, Fujio Miyawaki and Akinori Hidaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Improving Accuracy and Real-Time Performance of Recognition Methods for Surgical Procedure Recognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Workshop on Frontiers of Computer Vision (IW-FCV2022)	6. 最初と最後の頁 572-586
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Shota Kishi, Nozomu Suzuki, Shota Tsuyuki, Takio Kurita, Fujio Miyawaki, Akinori Hidaka	4. 巻 -
2. 論文標題 Convolutional Neural Network based on Temporal Pose Features for Surgical Procedure Recognition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications	6. 最初と最後の頁 60-64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujio Miyawaki, Miho Suzuki, Aivo Anier, Juri Vain	4. 巻 -
2. 論文標題 Integration of 'Central' and 'Peripheral' Nervous Systems in Scrub Nurse Robot and Comparison Between 'Voluntary' and 'Reflex' Movements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 14th IFAC Symposium on Analysis Design and Evaluation of Human Machine Systems	6. 最初と最後の頁 229-234
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 宮脇 富士夫	4. 巻 46(5)
2. 論文標題 深層学習による外科手術工程のリアルタイム認識に関する基礎的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Medical Science Digest	6. 最初と最後の頁 45-47
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Nozomu Suzuki, Fujio Miyawaki and Akinori Hidaka
2. 発表標題 Improving Accuracy and Real-Time Performance of Recognition Methods for Surgical Procedure Recognition
3. 学会等名 The International Workshop on Frontiers of Computer Vision (IW-FCV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石黒達也, 日高章理, 宮脇富士夫
2. 発表標題 深層学習による外科手術中の出血点発見に関する基礎的研究
3. 学会等名 第30回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shota Kishi, Nozomu Suzuki, Shota Tsuyuki, Takio Kurita, Fujio Miyawaki, Akinori Hidaka
2. 発表標題 Convolutional Neural Network based on Temporal Pose Features for Surgical Procedure Recognition
3. 学会等名 The 52nd ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Fujio Miyawaki, Miho Suzuki, Aivo Anier, Juri Vain
2. 発表標題 Integration of 'Central' and 'Peripheral' Nervous Systems in Scrub Nurse Robot and Comparison Between 'Voluntary' and 'Reflex' Movements
3. 学会等名 IFAC HMS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎峻伎, 日高章理, 宮脇富士夫
2. 発表標題 深層学習による外科手術の状況認識に関する基礎的検討
3. 学会等名 第29回ライフサポート学会フロンティア講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榎莉奈, 齋藤啓太, 堀部祐介, 宮脇富士夫, 日高章理
2. 発表標題 深層学習による動作認識手法を用いた手術状況理解技術の開発
3. 学会等名 第51回測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤啓太, 榎莉奈, 堀部祐介, 宮脇富士夫, 日高章理
2. 発表標題 器械出しの自動化のためのCNN を用いた手術状況の識別
3. 学会等名 第51回測自動制御学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	日高 章理	東京電機大学・理工学部・准教授	
	(Hidaka Akinori)		
	(70553519)	(32657)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
エストニア	Tallinn University of Technology			