

自律型手術ロボットの動作記述言語の開発

Programming Language for Autonomous Surgical Robot

2171007



研究代表者

東京医科歯科大学
生体材料工学研究所

助教 菅野 貴 皓

[研究の目的]

内視鏡手術は、従来の開腹手術と比較して、患者の体表面に開ける傷口が小さいため、術後の回復が早く、審美性に優れるなどの利点がある。一方、内視鏡手術では300 mmを超える長さの鉗子を操らなければならず、術者には高度な技術が要求される。

このような課題を解決するために、手術支援ロボットが用いられている。米国 Intuitive Surgical 社が開発した da Vinci はマスタ・スレーブ型の手術ロボットであり、手ブレを補正した精密動作や鉗子先端部にある手首関節によって、器用な内視鏡手術を実現している [1]。

現在の手術ロボットは、手ブレ補正等の機能はあるものの、外科医がサージョンコンソールを用いてリアルタイムで操縦する方式となっている。これに対して、手技の一部を自動化する試みがなされており [2]、臓器の自動切断や自動縫合などの作業に成功している。このような自動手術ロボットは、特定のタスクを実行することはできているが、ロボット自身が自律的に判断を行うことはできず、医師がロボットに逐次指示を行う必要がある。

手術ロボットの完全自律化に向けて、術中に医師の指示を待たずして動作することができるシステムが期待される [3]。医師がロボットに直接指示を出さなくても、術中の医師や助手の

会話、患者の生体情報などから自律的に動作することによって、より効率のよい手術が可能となる。これを実現するための方法として、現在様々な分野で利用が進んでいる深層学習が挙げられる。これは、会話や生体情報と、医師の手の動きとの関連をロボットに学習させておいて、実際の手術においては会話などから自動的にロボットの軌道を生成する、という方法である。

しかしながら、深層学習は一般的にはその処理過程がブラックボックスであると言われており、ロボットが次にどのような動作を行うかをユーザーである医師が予測することが困難である。医療機器のような高い安全性が求められる用途では、ロボットの動作は明示的に記述できる必要があると考えられる。

そこで、本研究では、術前カンファレンスなどにおいて、医師が自ら自律型手術ロボットの動作を事前に記述できるようなプログラミング言語の実現を目指し、今年度は手術ロボットが必要としている命令セットを抽出する。そのために、医師へのヒアリングやテキスト解析を試みた。

[研究の内容, 成果]

1. 医師へのヒアリング

まず、肝胆膵外科を専門とする外科医2名に本研究の目的と手法を説明し、自律型手術口

ロボットへの要望などについてヒアリングを実施した。その結果、自律型手術ロボットおよび、命令セットの抽出について以下のような知見が得られた。

- ・現在の da Vinci 等のロボットは 4 本のアームのうち 2 本のみを操作している。補助アームが操作や音声に反応して動作すると良い。
- ・助手の代替となるロボット（器械出しロボット）などについてはあまり必要とされていない。
- ・手術室は雑音が多いほか、医師同士の会話も命令や指示ではないものが多く含まれるため、自動的に命令セットを抽出することは難しい。
- ・多くの症例を重ねている医師は、「あれ」「それ」などの代名詞で意思疎通できているので、具体的な命令セットを作成するのは極めて難しい。
- ・不測の事態が多いため、予め決められた手順書に従って手術をすることは不可能である。したがって、手術の手順をプログラムで記述することは適切ではない。

2. 開発の方針

前節のヒアリングの考察を踏まえて、本研究で提案するシステムおよび研究方法を以下のとおりとする。

- ・手術全体の手順を記述するのではなく、特定の音声や動作に対して反応し、執刀医の補助を自動的に行うものとする。
- ・命令セットの抽出には、単に術中の会話を録音するのではなく、解説動画などのような文書情報が豊富に含まれている資料を利用する。

3. テキスト解析の手法

本研究では、テキスト解析に共起ネットワークを用いる。本稿において、共起とは複数の単語が同一の文に現れることを指している。この

共起関係を調べることによって、深く関連している 2 つまたはそれ以上の単語を抽出することができる。例えば、ある手術の記録において、「癒着」と「超音波」の共起の頻度が高ければ、その手術は組織の癒着を超音波メスで切除する頻度が高いと推測される。その手術に対しては、癒着を発見したら自動で超音波メスにより切除を行う自律ロボットによって効率を向上させることが可能であると考えられる。

この共起関係をネットワーク図で可視化したものを共起ネットワークと呼んでおり、共起関係を容易に読み取ることができる。

なお、本手法は、自律での判断を伴わなくとも、音声認識を用いて動作するような手術ロボットに対しても応用が可能である。音声認識により作動する装置としては、現在、Amazon Alexa や Google アシスタント等が有名であるが、これらの汎用的な AI アシスタントは多機能であるためユーザが意図しない動作を行う可能性が高く、手術室で用いることはできない。共起関係を用いて頻繁に使われる命令を抽出しておき、これを基に AI が手術に必要な最低限の動作だけを実行するように設定することで、より安全な音声認識型手術ロボットが実現できると考えられる。

本研究では、この共起ネットワークの作成に KH Coder [4] を用いる。KH Coder は統計解析ツール「R」のフロントエンドとして動作するテキスト解析ソフトウェアであり、共起ネットワークの他にクラスタ分析や対応分析の実行が可能である。本研究では、単語間の関連を抽出できる機能のうち、手術動画のようにテキストのサンプル数が少なくてもある程度機能する共起ネットワークを使用することとした。

4. 解説動画からの命令セットの抽出

手術を記録した動画からの単語抽出を試みた。本実験に用いた動画は冠動脈バイパス手術を記録したもの [5] であり、その様子を解説したナレーションが含まれている。ナレーションは英

語の音声である。音声認識によってナレーションをテキストデータに自動変換したものが利用可能であったため、本実験ではこのテキストデータを利用した。動画の長さは42分で、ナレーションは6155語である。

手術記録については、AIや統計解析を行うに十分なデータが提供されていないため、本研究では、共起ネットワークを作成した後、その考察および重要単語の抽出は手動で行う。将来的には、手術ロボットやスマート手術室などの技術を利用して十分なデータを収集できるようになり、単語抽出なども自動で行えるようになると期待される。

解析の結果を表1および図1に示す。表1は、テキスト中で最も多く出現する単語をリストアップしたものである。上位には、be, we, itなどの一般的な単語が並んでいる。また、図1の共起ネットワークについても、同様に抽象的な単語がネットワーク化されており、ここから手術に必要な命令セットを抽出することは難しい。

一方で、テキストから名詞と動詞のみを抽出して解析した結果を表2および図2に示す。表2においては、心臓バイパス手術に特有のheart, vesselといった単語が並んでおり、解析が可能であると思われる。図2の共起ネット

ワークを見ると、単語間の関連性を読み取ることができ。共起頻度が2以上の単語の組については太線で示している。本実験で解析したテキストにおいて、共起頻度が高かったものは、

表1 抽出した単語

抽出語	出現回数	抽出語	出現回数	抽出語	出現回数
be	335	up	14	lot	7
we	165	aorta	13	order	7
it	132	where	13	please	7
go	93	back	12	quite	7
here	83	chest	12	re	7
now	69	clamp	12	time	7
you	60	flow	12	try	7
I	59	mammary	12	usually	7
so	48	ventricle	12	venous	7
do	40	area	11	wire	7
not	40	end	11	actually	6
have	38	lung	11	anastomosis	6
heart	38	open	11	beat	6
okay	38	other	11	bleed	6
vessel	37	right	11	body	6
which	37	suture	11	bypass	6
take	35	what	11	cardiac	6
artery	32	when	11	catheter	6
blood	30	line	10	circumflex	6
then	29	part	10	fluid	6
vein	27	sure	10	incision	6
come	24	way	10	know	6
see	22	well	10	later	6
just	21	atrium	9	leave	6
make	20	bypass	9	let	6
branch	19	call	9	pressure	6
very	19	coronary	9	reduce	6
little	18	descend	9	remove	6
they	18	he	9	size	6
machine	17	heart-lung	9	small	6
nice	17	leg	9	surgery	6
down	16	run	9	thing	6
get	16	start	9	tie	6
look	16	also	8	apply	5
muscle	16	anterior	8	as	5
sternum	16	big	8	bleeding	5
again	15	directly	8	bottom	5
patient	15	divide	8	clip	5
right	15	place	8	completely	5
there	15	secure	8	distal	5
wall	15	that	8	feel	5
want	15	use	8	happen	5
air	14	attach	7	head	5
bit	14	better	7	inject	5
good	14	cannula	7	its	5
left	14	harvest	7	lateral	5
portion	14	how	7	more	5
put	14	large	7	once	5
right	14	ll	7	place	5
side	14	look	7	pretty	5

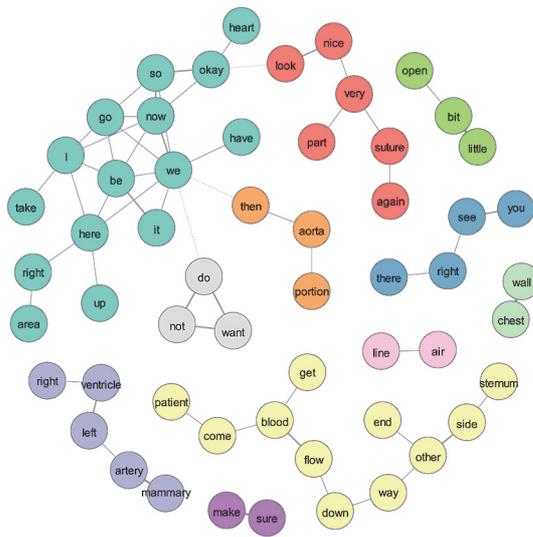


図1 共起ネットワーク

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では, 共起ネットワークを用いて手術を解説した動画を解析し, 手術中に高頻度で出現する動作のセットを抽出する方法を検討した。

今後の課題として, 複数の動画を解析することが挙げられる。複数の動画を解析する場合, 同じ術式の動画を解析することで, より多くの命令セットの抽出が可能である。また, 異なる部位や術式の動画を記録すれば, 対応分析によって, 部位ごとまたは術式ごとに頻繁に用いられる単語をグループ化できるため, 自律型手術ロボットのユーザインタフェースを作成する際に, 術式を選択すると命令の候補を提示するようなシステムが実現可能である。

また, 画像処理を用いた手術器具の位置計測に取り組んでおり, 本研究と組み合わせた自動手術システムを構築する予定である。

[参考文献]

- [1] R. H. Taylor and D. Stoianovici, "Medical robotics in computerintegrated surgery," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 19, no. 5, pp. 765-781, Oct. 2003.
- [2] A. Shademan, R. S. Decker, J. D. Opfermann, S. Leonard, A. Krieger, P. C. W. Kim, "Supervised autonomous robotics tissue surgery," Science Translational Medicine, Vol. 8, pp. 337-364, May 2011.
- [3] P. Kazanzides, Z. Chen, A. Deguet, G. Fischer, R. Taylor, and S. DiMaio, "Medical robotics-Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2014.
- [4] "KH Coder", Khcoder. net, 2018. [Online]. Available: <http://kxcoder.net/>. [Accessed: 04-Jul-2018].
- [5] MedStar Union Memorial. Coronary Bypass Surgery [Video file]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7PpidBmoA4c>