

内視鏡下手術支援に向けた  
ナビゲーションシステムの技術応用による  
手術作業工程解析手法の構築

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科  
人工システム科学専攻メディカルシステムコース

杉野 貴明

(千葉大学審査学位論文)

内視鏡下手術支援に向けた  
ナビゲーションシステムの技術応用による  
手術作業工程解析手法の構築

2017年1月

千葉大学大学院工学研究科  
人工システム科学専攻メディカルシステムコース

杉野 貴明

# 目次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 本研究の背景 .....	2
1.2.1 日本の外科医療を取り巻く現状 .....	2
1.2.2 手術作業工程解析 .....	12
1.2.3 手術ナビゲーションシステムの手術作業工程解析への応用 .....	18
1.3 本研究の目的と方針・位置付け .....	21
1.3.1 本研究の目的 .....	21
1.3.2 本研究の方針と位置付け .....	21
1.4 本論文の構成 .....	25
第 2 章 ナビゲーション情報に基づく手術作業特徴の定量表現手法 .....	26
2.1 はじめに .....	26
2.2 手術作業特徴の時系列的表現法 .....	28
2.3 手術作業特徴の横断的表現法 .....	33
第 3 章 手術プロセスモデルによる手技課題特定法 .....	38
3.1 はじめに .....	38
3.2 手術プロセスモデル .....	39
3.2.1 時系列データの分析指標による手術プロセスモデルの定義 .....	41
3.2.2 解剖部位に対する術具位置情報による手術プロセスモデルの定義 .....	42
3.3 手術作業工程比較手法 .....	44
第 4 章 総合的手術技量の定量化手法 .....	50
4.1 はじめに .....	50
4.2 重回帰分析による総合的手術技量値の算出法 .....	50
4.2.1 目的変数の定義及び生成法 .....	51
4.2.2 回帰モデルの構築法 .....	55

第 5 章 検証評価 .....	57
5.1 はじめに .....	57
5.2 検証用データセット .....	57
5.2.1 腹腔鏡下胆嚢摘出術 .....	58
5.2.2 内視鏡下副鼻腔手術 .....	67
5.3 手術作業特徴の定量表現手法の検証 .....	75
5.3.1 評価項目 .....	75
5.3.2 結果 .....	75
5.3.3 考察 .....	81
5.4 手術プロセスモデルによる手技課題特定法の検証 .....	86
5.4.1 評価項目 .....	86
5.4.2 結果 .....	89
5.4.3 考察 .....	91
5.5 総合的手術技量の定量化手法の検証 .....	94
5.5.1 評価項目 .....	94
5.5.2 結果 .....	94
5.5.3 考察 .....	96
第 6 章 結論 .....	98
引用文献 .....	101
本論文に関する研究業績 .....	108
謝辞 .....	112

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

医療支援技術の発展と共に、患者の生活の質(Quality of Life; QOL)に関心が向けられ、患者に優しい医療が常に求められるようになった現代において、外科手術は「低侵襲」を一つのキーワードとして大きな変革を遂げてきた。従来、外科手術は大きな切開創を伴い、患者に多大な負担を強いるものであったが、この約 30 年間のうちに患者の負担軽減・早期回復・QOL 向上を目指した新たな手術方法・手術支援機器が次々と開発され、切開創を極限まで減らした低侵襲手術が幅広く適用されるようになった。その最たる例が内視鏡下手術である。1987年にフランスの Phillippe Mouret [1]が内視鏡により術野をモニタに映し出しながら行う現在のスタイルの礎となる腹腔鏡下胆嚢摘出術を実施したことをきっかけに、内視鏡下手術は急速に普及・適応拡大した。現在では手術機器の更なる細径化・多機能化が進み、さらに切開創を減らした Reduced port surgery や 1 つの切開創のみから行う Single port surgery, あるいは da Vinci® (Intuitive Surgical Inc.)に代表される手術支援ロボットを用いた内視鏡下手術も普及してきている。しかし、低侵襲手術の発展に伴い、患者の負担は小さくなっていく一方で、外科医に求められる技術はより複雑で難易度の高いものになり、外科医が習得及び更新しなければならない知識・技術も増えることから、外科医の負担は大きくなっていく。手術支援技術が目覚ましい進歩を遂げている現在もなお、治療の質・成績は外科医の技量に依るところが大きいため、外科医に負担が集中しているこの状況は、手術の安全性や信頼性を揺るがしかねない状況にあるといえる。したがって、手術手技の最適化や外科医の効果的な手術手技習熟支援、あるいは手術状況に応じた最適な情報提示など、外科医が手術を安全に遂行するための支援を行うシステムが求められている。

本研究では、内視鏡下手術を対象に、外科医の安全な手術実施を助ける支援システム

の要素技術となる技量定量評価手法及び工程解析手法の構築を行った。手術作業の特徴を定量的に表現し、手術作業工程を詳細に分析・評価することにより、手術作業中に問題がある場合にはどこでどのような問題が生じているのか、あるいは術者の技量レベルはどの程度であるかを明確化する手法について論じる。

## 1.2 本研究の背景

### 1.2.1 日本の外科医療を取り巻く現状

国民の平均寿命が男女共に 80 歳を超えるようになった長寿大国の日本においては特に、低侵襲治療の発展は重要課題の一つとして挙げられ、外科医療に求められる要求は高度化の一途を辿っている。内視鏡下手術に関して言えば、本邦でも 1990 年に初めて内視鏡下での胆嚢摘出術が行われて以降、内視鏡外科領域は爆発的な発展を見せ、内視鏡下手術件数は現在もなお、増加し続けている(図 1.1)。

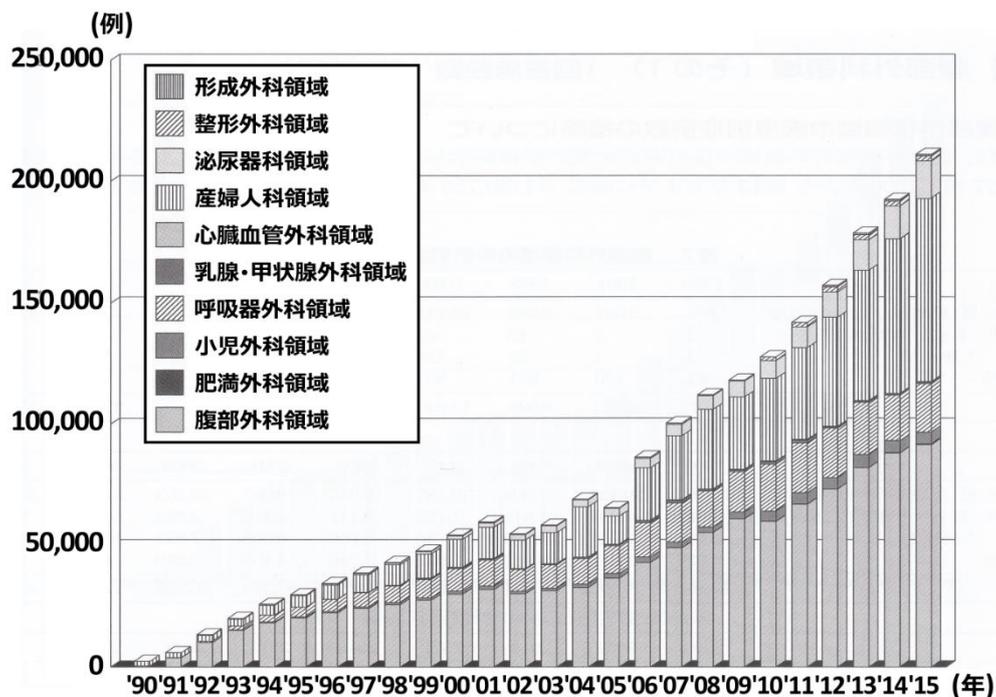


図 1.1 内視鏡下手術件数の年次推移 [2]

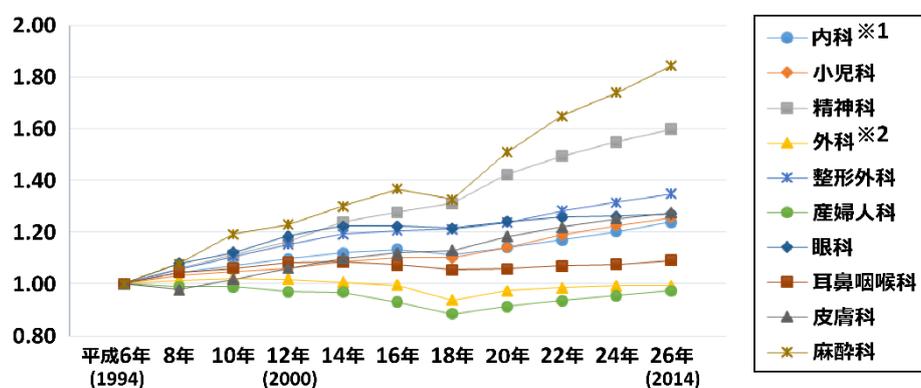
内視鏡下手術は内視鏡と手術器具を小さな切開創あるいは自然孔から体内に挿入し、体内の様子をモニターで確認しながら行う手技である。そのため、患者の QOL と整容性が大きく向上する反面、術野へのアクセス・作業スペース・視野の制限があり、高難度の手術として知られている [3]。外科医への負担集中が懸念される昨今、日本においても外科医の内視鏡下手術や先端医療機器に対する知識・技術の不足に起因する医療事故が度々発生するなど、低侵襲手術の発展と共に付随する不安要素が表面化しつつある。ここでは、4 つの側面から日本の外科医療の現状と課題について論じる。

#### (1) 外科医師数

日本の医療現場において医師不足が叫ばれるようになってから久しく、医師不足の問題は医療崩壊の大きな要因の一つとしてマスメディアに取り上げられる機会も多い。医師の充足・不足を判断する明確な基準は存在しないが、経済開発協力機構(Organisation for Economic Co-operation and Development; OECD)のヘルスケア事情に関する 2015 年の調査報告 [4]によれば、人口 1,000 人当たりの医師数は OECD 加盟国平均が 3.3 人であるのに対し、日本はそれを大きく下回る 2.3 人である。したがって、OECD 諸国と比較すると日本は医師不足であると言わざるを得ない状況にあるが、こうした絶対的医師数不足の議論の高まりから、日本では医学部定員を増やすなど、医師数拡充の試みは継続してなされている。厚生労働省により隔年で行われている医師・歯科医師・薬剤師調査 [5]によると、1994 年には 230,519 人であった医師総数は 2014 年には 311,205 人となっており、20 年間で医師総数及び人口当たりの医師数は着実に増加し続けている。このように医師数が増加し続けているにも関わらず、医師不足が問題視され続けているのは、絶対的医師数よりも相対的医師数の不足が関係しているということが指摘されている [6]。この相対的医師不足の例の一つとして挙げられるのが医師の診療科偏在である。

図 1.2 は厚生労働省の医師・歯科医師・薬剤師調査 [5]による主たる診療科別の医師数の年次推移を示したものである。平成 20 年度の診療科名の定義変更に伴い、平成 18 年

以前と平成20年以降で診療科の定義・内容が変更しているため、年次推移の単純な比較は難しいが、それでも多くの診療科の医師数が増加傾向にある中、産婦人科や外科等の医師数は横ばいの状態が続いており、医師の診療科偏在が顕著に現れていることがわかる。また、同調査による年齢階級別の外科医師数の年次推移(図1.3)を見ると、外科医の総数に大きな変動はないものの、29歳以下及び30～39歳の医師数が大きく減少していることがわかる。このように外科領域においては若手医師の志望者数の減少が顕在化しており、このことが外科医の負担集中・過重労働の一因になっていると考えられる。



※1 (平成8～18年) 内科, 呼吸器科, 循環器科, 消化器(胃腸)科, 神経内科, アレルギー科, リウマチ科, 心療内科,  
(平成20～26年) 内科, 呼吸器・循環器・消化器(胃腸)・感染症・腎臓・糖尿病・血液内科, 神経内科,  
アレルギー科, リウマチ科, 心療内科

※2 (平成6～18年) 外科・呼吸器外科・心臓血管外科・気管食道科・肛門科・小児外科,  
(平成20～26年) は外科, 呼吸器・心臓血管・乳腺・気管食道・消化器(胃腸)・肛門・小児外科

図 1.2 主たる診療科別医師数の年次推移(平成6年を1.0とした場合の割合)

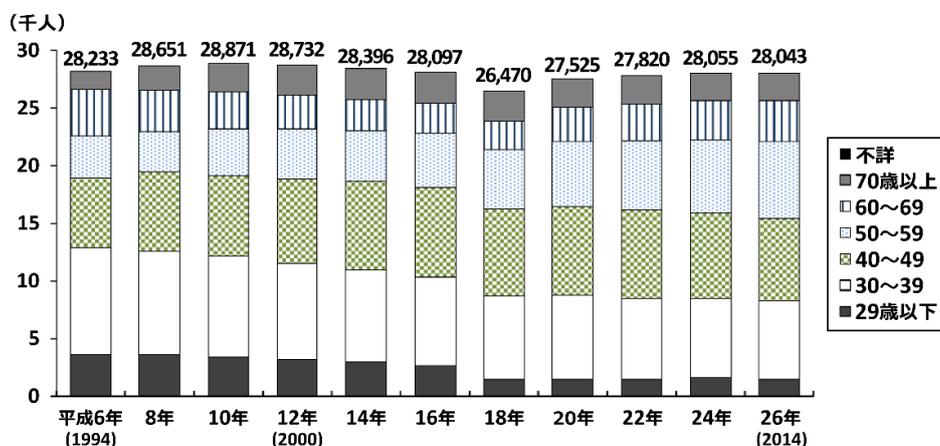


図 1.3 年齢階級別外科医師数の年次推移

## (2) 医療過誤・医療訴訟

日本外科学会は外科志望者数減少をはじめとする外科医療の諸問題を重く受け止め、外科医が置かれている現状を把握するために、日本外科学会の会員を対象に外科医の労働環境に関するアンケート調査を平成 19 年と 23 年の 2 度に渡って実施している [7]。表 1.1 は当アンケート調査において外科志望者数減少の原因として考えられることを複数回答方式で質問した際の回答結果を示している。なお、表 1.1 には回答者の過半数が外科志望者数減少の原因として挙げた項目のみを示している。「労働時間が長い」、「時間外労働が多い」など、過重労働や身体的負担に関連する項目の他、「訴訟のリスクが高い」、「医療事故のリスクが高い」、「治療上の責任が重い」などの精神的負担に関連する項目も多数挙げられている。

日本医療機能評価機構の医療事故集計結果報告 [8]によれば、2015 年の医療事故報告件数は 3,480 件であったが、その内 457 件が手術室で発生しており、発生場所別で見ると病室に次いで 2 番目に多い結果である。また、手術室での医療事故 457 件の内 353 件は治療・処置中に発生しており、さらに事故の程度に着目すると、全件数の約 40%に当たる 198 件が障害残存の可能性のある(高い/低い両方含む)あるいは死亡に至った医療事故であったことから、実際、医療事故のリスクは高いといえる。

表 1.1 外科志望者数減少の原因

原因として考えられる項目	割合 [%]	
	平成 19 年調査結果	平成 23 年調査結果
労働時間が長い	73.0	70.5
時間外労働が多い	72.8	72.8
緊急の呼び出しが多い	67.4	69.4
賃金が少ない	67.7	62.7
訴訟のリスクが高い	67.7	67.7
医療事故のリスクが高い	69.1	63.2
治療上の責任が重い	59.6	55.8
一人前になるのに時間がかかる	62.6	61.7

また、医師の懸命な処置もむなしく、不幸な結果となった場合、患者側から訴訟を起こされる事態に発展するケースも増えている。図 1.4 に最高裁判所による統計データ [9]に基づく医事関係訴訟件数の年次推移と診療科別の割合を示す。図 1.4 (a)は、青色が新受件数(新たに受け付けた訴訟の件数)、橙色が既済件数(審理の処理が済んだ訴訟の件数)を示しており、図 1.4 (b)は平成 27 年における診療科別の既済件数の割合を示している。図 1.4 (a)を見ると、医事関係訴訟の新受件数は平成 7 年から平成 16 年にかけて急激に上昇していることがわかる。これは医療への社会的な関心・期待の高まりによるものであると考えられるが、このことを受けてインフォームド・コンセント等の患者への説明義務の定着など、今度は医療従事者の医療安全に対する意識が高まったことから、平成 16 年に訴訟件数のピーク(1,110 件)を迎えて以降は減少に転じ、平成 20 年から現在にかけては年間 800 件前後の訴訟件数が続いている。審理期間の短縮化も図られるようになり、平成 7 年には約 39 か月であった医事関係訴訟における平均審理期間は現在では約 23 か月まで短縮されている。ただし、それでも訴訟件数に関して言えば、平成 7 年の 484 件から比べると 2 倍近い件数の医事関係訴訟が毎年起こされており、審理期間に関しても一般の事件の平均審理期間が約 7 か月であることに比べると 3 倍以上長いことになる [10]。

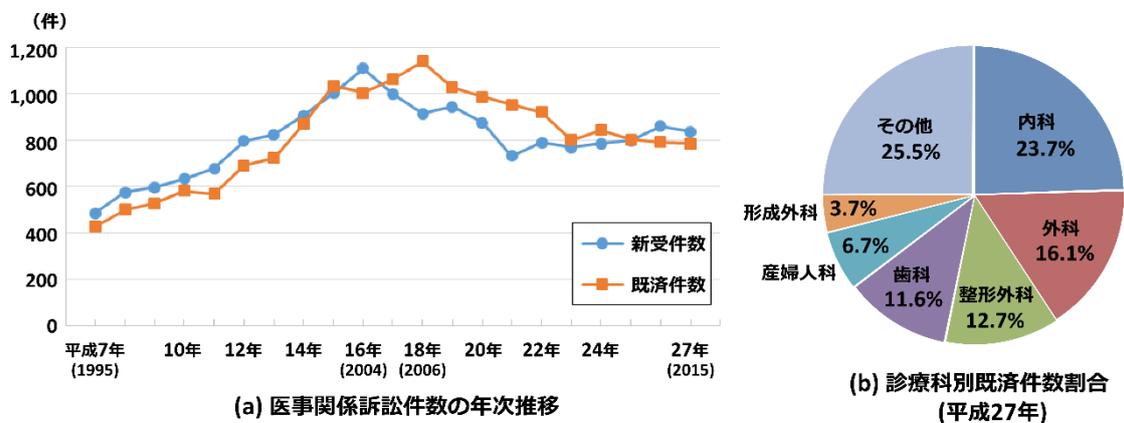


図 1.4 医事関係訴訟事件の処理状況

診療科別の訴訟件数(図 1.4 (b))を見ると、外科は内科に次いで訴訟件数が多く、医師 1 人あたりの訴訟発生リスクは内科よりも高い。原告側(患者側)の請求が認められる割合(一部認容を含む)を表す認容率に関して言えば、医事関係訴訟の認容率は約 20% であり、認容率が 80% を超える一般の民事訴訟事件と比べると低い数値ではあるが、医療の傍らで裁判にも対処しなければならないということになれば医師への負担は計り知れないものがある。特に侵襲性の高い医療を提供することの多い外科医にとっては、こうした状況は少なからず治療を行う際の精神的負荷となっているといえる。

### (3) 手術訓練・手術教育

一般に、一人前の外科医になるためには 10 年かかるということが言われている [11]。表 1.1 のアンケート結果において「一人前になるのに時間がかかる」という点が外科志望者数減少の原因の一つとして考えられているように、十分な手術の知識・技術・判断力等を習得するのは容易なことではない。しかし、マンパワーが不足している現在の外科医療現場においては、いち早く独り立ちできる医師を増やしていくことが重要であるといえる。

現在行われている手術訓練・手術教育は大きく On the Job Training(OJT)と Off the Job Training(Off-JT)に分けられる。内視鏡下手術における主な手術訓練・手術教育の方法について表 1.2 に示す。従来、手術研修は臨床現場での OJT を中心に行われてきた。具体的には、熟練医によるマンツーマン指導下で、助手としての手術参加・執刀を通じて経験を積み、独り立ちしていくというプロセスを経る [12]。そのため、OJT は最も実践的な経験を積むことができる方法であるが、指導医の負担や腕が未熟な術者が患者に接することによる潜在的な危険性が懸念される。そこで、実際の患者に接することのない Off-JT による手技研修が注目されるようになり、様々な方法が検討・実施されている。手術見学やビデオ教材等での座学によるものを除くと、主に実験動物、献体、Box トレーナ、Virtual Reality(VR)シミュレータを利用した 4 種類の Off-JT が行われている。

表 1.2 内視鏡下手術の主な訓練・教育方法

	方法	内容
On the Job Training	実地研修	熟練医の指導下での手術参加・執刀を通じた研修方法
	実験動物	ブタなどの生きた動物を用いた手技研修方法
Off the Job Training	献体(Cadaver)	ホルマリン固定された献体を用いた手技研修方法
	Box トレーニング	Box トレーナ内に設置された模擬臓器や動物臓器を用いた手技研修方法
	VR シミュレータ	Virtual Reality(VR)技術のシミュレーションによる手技研修方法

実験動物や献体によるトレーニングは OJT に非常に近い研修効果が期待できる方法である。ただし、日本においてはどちらも実施場所が限られており、まだ十分な実施数を確保できる環境にない状態にある。また、実験動物の場合は対象とする手術領域によっては人間と同等の解剖構造を持つ適当な動物が存在しないことが多いことや動物愛護の観点から実施が難しいこと、一方献体の場合は軟部組織の形状・質感が生体と大きく異なることや感染症のリスクがあることなどがそれぞれ課題として挙げられている [12]。そのため、現在活発に開発・利用されているのが、図 1.5 に示すような Box トレーナや VR シミュレータを用いた手技研修方法である。Box トレーナを用いたトレーニングは Box 内に設置された臓器モデルや動物臓器と実際の手術鉗子を用いて行う研修方法であり、他の Off-JT よりも安価に実施できることから日常的な訓練に最も利用されている方法であるといえる。近年ではコンピュータ断層撮影(Computed Tomography; CT)、核磁気共鳴画像(Magnetic Resonance Imaging; MRI)などによる画像診断技術と医用画像処理技術、そして 3 次元プリンティング技術の発展により臓器内部の解剖構造の精密な再現が可能になったことから、生体の質感を再現した臓器モデルも開発されており、より実践に近い感覚でトレーニングができるようにもなりつつある [13]。ただし、こうしたトレーニングは、基本的に剥離・縫合等の基礎技術を訓練するトレーニングである

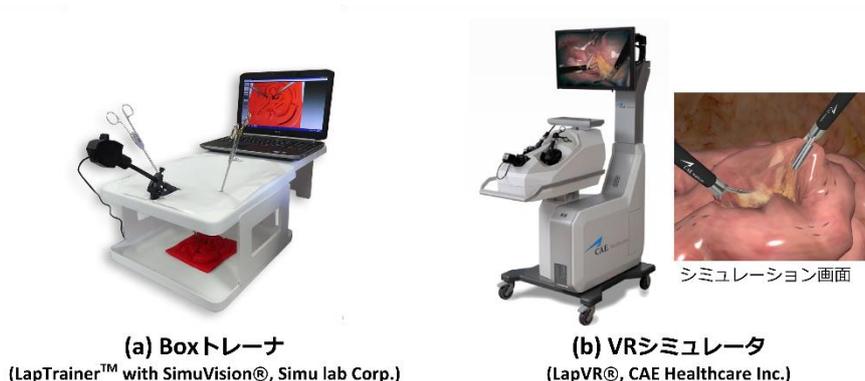


図 1.5 内視鏡下手術用トレーニング機器の例

ため、手術全体を通じた手技訓練は難しい方法である。一方、VR シミュレータによるトレーニングの場合、基礎的な手技から手術の一連の流れを通じた手術シナリオに至るまでシミュレーションにより幅広く訓練することができる。しかし、近年ではかなり改善されてきているものの実際の手術感覚と異なる点と非常に高価な点が課題として挙げられる。したがって、現状としてはどの Off-JT においても課題は存在し、未だ発展途上にあるといえる。

内視鏡下手術のように複雑かつ特殊な手技が要求される手術であれば特に、実地での手術実施の前に Off-JT が必須であることは言うまでもない。しかしながら、Off-JT のみで実際の手術に必要な技術・感覚を完全に養うことは難しいことから、熟練医指導下で安全性を確保した上での OJT が少なからず必要になってくる。したがって、OJT 中の患者に対する潜在的な危険性を考慮すると、OJT による技術習得効率を向上させる枠組みが必要であるといえる。

#### (4) 病院経営

外科医療は患者から大きな期待のかかる診療科であるが、それ以外にも現行の診療報酬制度を考慮すると病院経営を支える柱の一つとして期待される診療科でもある。

日本では医療情報の標準化と透明化を目的として 2003 年 4 月から診断群分類別包括支払い制度(Diagnosis Procedure Combination/Per-Diem Payment System; DPC/PDPS)、通称

DPC 制度と呼ばれる診療報酬制度が導入されている。当初 DPC 制度は 82 の特定機能病院からスタートしたが、それ以降順次拡大して 2016 年の推計では 1,667 病院、約 49 万床(全一般病床の約 55%)で取り入れられており、急性期入院医療に対する診療報酬制度として中心的な枠組みとなっている(表 1.3)[14]。図 1.6 に DPC 制度の概要を示す。

DPC とは診断(Diagnosis)と医療行為(Procedure)の組み合わせ(Combination)から成るコードによって患者の診断群分類を決定する仕組みを指す(図 1.6 (a))。入院医療費は従来の出来高計算方式では診療行為ごとに定められた点数を基に計算されていたが、DPC 計

表 1.3 DPC 対象病院数の変遷(文献[18]より抜粋改訂)

年度 及び データの時期	病院数	一般病床数
平成 15 年度対象病院 (H15 年 4 月)	82	66,497
平成 16 年度対象病院 (H16 年 4 月)	144	89,330
平成 18 年度対象病院 (H18 年 4 月)	359	176,395
平成 20 年度対象病院 (H20 年 4 月)	713	286,088
平成 22 年度対象病院 (H22 年 4 月)	1,388	455,148
平成 24 年度対象病院 (H24 年 4 月)	1,505	479,539
平成 26 年度対象病院 (H26 年 4 月)	1,585	492,006
平成 28 年度対象病院 (H28 年 4 月) (見込み)	1,667	495,227
(参考)全一般病院* (平成 26 年医療施設調査)	7,462	894,216

\* 一般病院とは、精神病床のみを有する病院、結核病床のみを有する病院以外の病院を指す

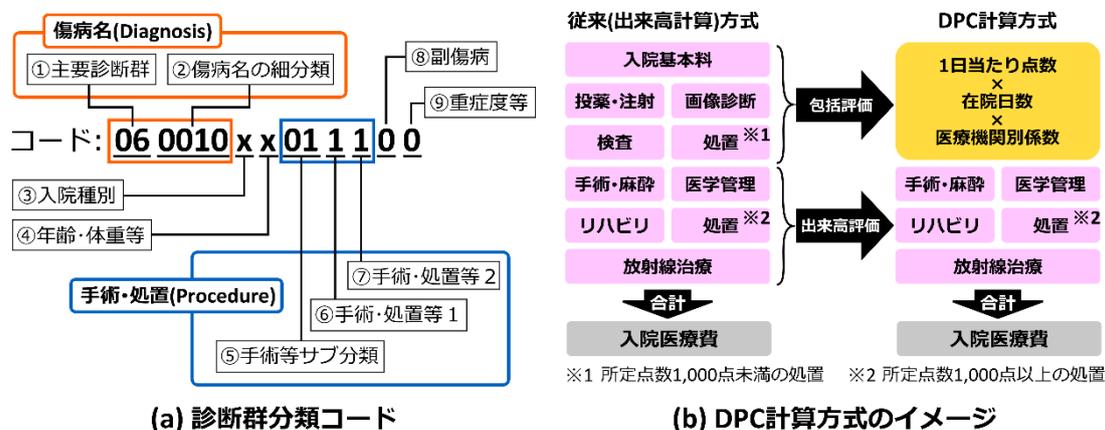


図 1.6 DPC 制度の概要

算方式では診断群分類に応じて定められた 1 日当たりの定額点数から成る包括評価部分と従来同様の出来高評価部分を組み合わせて計算される(図 1.6 (b)). 病院の利益を上げるには当然, 支出を抑えることと収入を増やすことが重要であり, DPC 制度下では包括部分の費用削減や出来高部分の増収などがこれに当たる. 前者の代表的な例としてはジェネリック医薬品の使用・医療材料の変更・画像検査の外来移行などによる費用削減が挙げられるが, こうした診療内容のスリム化は粗末診療や医療の質の低下につながるものが懸念される. 一方, 後者では, 従来 of 出来高計算が適用される手術・麻酔等の関連項目における増収, すなわち手術件数を増やすことが病院の収益増に有効な手段の一つとして考えられる [15]. また, DPC 制度では, 在院日数に応じて 3 段階の定額報酬が設定されており, 入院が必要以上に長引くと 1 日に得られる診療報酬が少なくなる仕組みになっていることを考慮すると, 在院日数の短縮, 病床回転率の向上も有効である [16,17]. したがって, 手術室の効率的運用及び手術の治療成績・質を向上させることは病院の収益にも直結する重要項目であるといえる.

以上の 4 つの側面から日本の外科医療の現状についてまとめると, まず外科領域は深刻な医師不足の問題を抱えており, 外科医は慢性的な過重労働の状態にある. こうした過重労働に加え, 医療過誤や医療訴訟等のリスクの高さ, 外科医としての技術習得の難しさなどの点により外科を志望する若手医師の数が減っていることから, 益々外科医の負担が上昇し, またそれが外科志望者数の減少につながるといった負の連鎖に陥りつつあるといえる. さらに病院経営に目を向けると, 手術関連項目の収益の向上, すなわち手術件数の増加や病床回転率の上昇といった外科手術の効率性・質に大きく関わる要素の改善が重要であるとされており, 経営的側面からの期待もかけられている状態にある. したがって, このように外科医に負担が一極集中している状況を打破するためには, 外科医がいち早く熟達した技能を身に付けるための効果的な習熟支援, 常に安全な手術と効率的な手術運用を実施するための手術作業の評価・管理・最適化支援を目指したシス

テム開発が求められている。例えば、手術作業の適切な分析・評価を通じて、手術手技上の課題を明らかにすることで術者の技能向上へと繋げる、手術工程中の非効率的箇所の特定により手術の最適化を図る、あるいは現在の手術状況を把握した上で次の最善手を教授する、などの外科手術支援が考えられる。

そこで近年、こうした外科手術支援システムの確立を目的とした、手術作業工程解析 (Surgical Workflow Analysis; SWA)に関する研究が注目されてきている。

### 1.2.2 手術作業工程解析

手術作業工程解析に関する研究は主に欧米を中心に活発に行われてきている [18]。当該分野の関連研究における論文出版数の推移について図 1.7 に示す。年々、本研究分野の研究報告件数が増加していることがわかる。これは前述のように複雑かつ難易度の高い手術の普及に伴い技能向上や作業評価の必要性が高まっていることに加え、情報通信技術(Information and Communication Technology; ICT)を活用した医療機器・システムの普及・発展により、手術中の作業情報をデジタル化して取得できる手段が増えたことに起因する。デジタル情報として得られた手術作業情報を基に、手術作業を比較できる形で

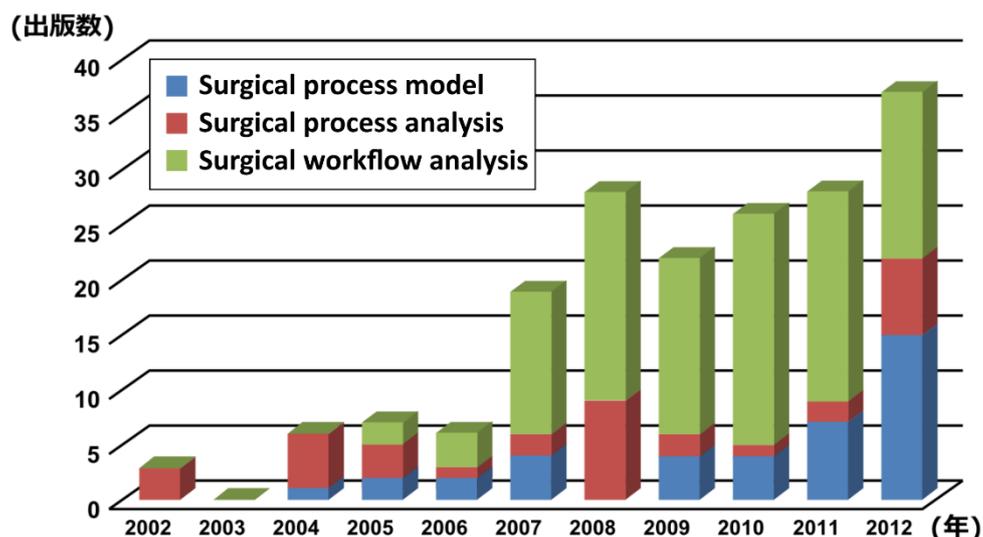


図 1.7 手術作業工程解析の関連研究における論文出版数の推移(文献 [18]より抜粋改変)

定量的に表現することで、より客観的かつ自動的に手術作業を管理・分析・評価する手法の検討がなされている。手術作業工程解析の関連研究分野において取り組まれている主な検討内容と目的について図 1.8 に示す。現在、当該関連研究分野では、主に外科手術の術後支援と術中支援に関わる 2 つの目的に則した手術作業工程解析手法を検討しているものが散見される。前者はこれまでに行われてきた主観的な技量評価に取って代わる客観的な評価方法や潜在的な手術手技上の問題点の把握方法の確立などを目指したものであり、主に手術後に手術中の課題点を把握・明瞭化することで次の手術の改善を効果的に支援するものである。一方、後者は手術状況に応じた最適な情報提示を行うコンテキストウェアシステム(Context-aware system)のための手術状況認識技術の確立などを目指したものであり、術中の効率的な手術運用を支援するものである。以下にそれぞれの研究動向について述べる。

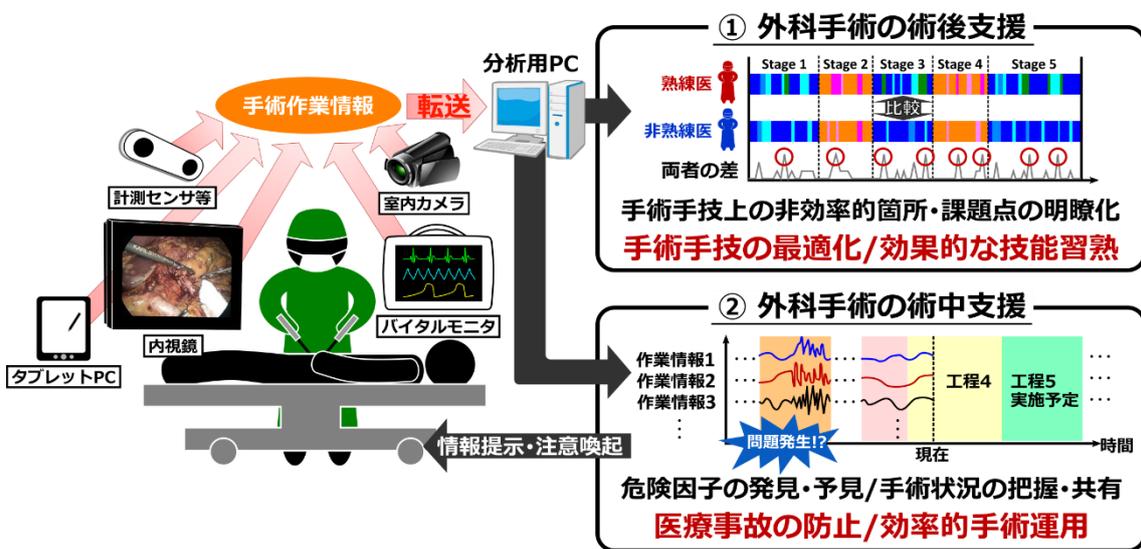


図 1.8 手術作業工程解析の概要及び目的

## (1) 外科手術の術後支援

現在、手術教育の一環として各施設で過去の手術映像の観察による座学が取り入れられているように、術後に手術を顧みて手術中の非効率な作業箇所や改善すべき問題点を把握・明瞭化することは手術の質を向上させていく上で極めて有用であると考えられる。従来、こうした手術作業の良し悪しの判断・評価、そして腕が未熟な術者への技術指南は熟練医等の人の手によって行われてきた。しかし、この場合、熟練医の主観的な判断に大きく依存することから、熟練医の裁量によって判断が異なる可能性があり、また技術指南の際も感覚的な表現に頼らざるを得ないため、技術指南側の教え方に応じてその技術習得の効率が変わってきてしまう恐れがある。そこで、手術作業評価を定量化・標準化するために様々な評価手法が検討されている。最も有名な手法としては、主要な作業評価項目を5段階評価でスコア化する技術評価用紙を用いた手法[19]が挙げられ、これまでに OSATS(Objective Structured Assessment of Technical Skill)[20]、GOALS(Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills)[21]などの評価ツールが開発・利用されている。現在、日本内視鏡外科学会による技術認定制度でも同様、熟練医による評価者2名が手術を記録した内視鏡映像を観察し、学会によって定められた評価項目に従って技量をスコア化することによって行われている。ただし、これらの方法では、結局のところ評価者の主観的な判断が入ることによるスコアのバラつきと評価者への大きな負担が懸念される。そこで、手術作業工程解析の関連研究分野では、手術作業情報の取得・分析を通じて主観的な判断を排除した、より客観的な技量定量評価手法の開発が進められている[22]。先行関連研究では計測環境を自由に設定・調整できる Off-JT での検討を行っている研究が圧倒的に多いが、臨床の手術を対象としている研究としては、手術の際に行われた処置内容、処置された解剖部位、使用術具の推移[23-25]、術具操作の特徴・一貫性[26,27]に着目した術者間での類似性比較により定量的な手術作業評価を試みたものなどが挙げられる。

## (2) 外科手術の術中支援

一般に、外科手術に限らず、作業中のアクシデントを未然に防ぎつつ効率的に作業を遂行するためには、まず作業中の状況を正確に把握した上で、その状況に応じた最善手を作業中に選択することが重要となる。特に外科手術のように、複数人で構成されるチームで作業に取り組み、かつ非常にリスクの高い作業が強いられる環境下では、現在の作業状況をチームスタッフ全員で正確に把握・共有することは、各自が次にすべき作業の理解・予測・準備を助け、円滑な作業の遂行や重大な事故の抑止にもつながると考えられる。例えば、実際に入院医療の現場ではクリティカルパス(またはクリニカルパス)と呼ばれる管理手法 [28]を取り入れ、疾患別・処置別に入院中のスケジュールや治療計画を標準化・図式化して医療スタッフで共有することで治療の円滑化や医療の質の向上を図り、一つの成功を収めている。複雑な手技・作業工程を有する手術の普及が進む外科領域分野においてもこうした工程の管理・標準化を応用し、自動的な手術状況の把握及び手術スタッフ全体での情報共有を目指した研究が積極的に行われるようになってきている。また近年では、ICT の発展により手術室内で治療に関わる多くの情報の獲得が可能となった反面、その膨大な情報量が時として手術のパフォーマンス低下につながる危険性を孕んでいることが指摘されるようになったことから [29]、手術の状況に応じた最適な情報のみをフィルタリングして提示するためのシステム開発も検討されつつある [30]。現段階では、こうした術中支援を目指した先行関連研究の大部分が、まず手術作業工程を形式化し、手術作業工程を正確に自動認識するための手法の検討を行っている。手術作業工程と関連性の高い作業要素(行われた処置内容/処置された解剖部位/使用術具)[31,32]や術具操作特徴量 [33]などの情報を基に手術作業工程を形式化し、隠れマルコフモデル(Hidden Markov Model; HMM)などの機械学習手法を用いて手術作業工程を自動的に識別する試みがなされている。

以上のように、手術作業工程解析の研究分野では、主に外科手術の術後支援と術中支援という2つの支援につながる取り組みが行われているが、どちらの取り組みにおいても外科手術の治療の質の向上に向け、手術がどのようにして行われるべきであるのかを明らかにすることを目指したものであり、これらの取り組みは相互に大きく関連している。また、どちらも手術中の作業情報に基づいて分析手法を構築しているため、共通していることは、まず手術作業情報を何らかの形で取得しているという点である。これまでに先行研究において検討されている手術作業情報の取得方法は、観察者ベースの手動取得アプローチとセンサベースの自動取得アプローチの2種類に大きく分けられる [18]。表 1.4 に先行関連研究の各アプローチにおける手術作業情報の取得方法と内容について示す。

観察者ベースアプローチは、手術映像記録での間接的な観察あるいは手術室での直接的な観察により観察者が手術中の作業情報を記録する手法である。情報取得の際には、主に作業情報記録用ソフトウェアが用いられており、特に Neumuth らによって手術作業工程解析のために開発された Surgical Workflow Editor [54] と呼ばれるソフトウェアは

表 1.4 手術作業工程解析の先行関連研究における情報取得方法

	情報取得方法/利用機器	取得情報
観察者ベース アプローチ (手動取得)	1. 手術映像記録の観察 [34-36]	行われた処置・処置された解剖部位・術具種類情報 etc.
	2. 手術室内での観察 [23-25,32,37-40]	
	3. 映像機器 [26,41-44]	術具種類・操作情報(2次元)
	4. 患者モニタリングシステム [45]	バイタルサイン情報
センサベース アプローチ (自動取得)	5. RFID 機器 [31,46]	術具種類情報
	6. 音声記録システム [47]	会話情報
	7. トラッキングシステム [27,33,48-50]	術具種類・操作情報(3次元), 術者視線情報 etc.
	8. 手術支援ロボット [51-53]	術具種類・操作情報(3次元)

タブレット PC に搭載して手術室に持ち込み、手術中に行われた作業内容に関する情報をその場で入力できるため、多くの研究で用いられている(図 1.9)。ただし、観察者ベースアプローチの場合、観察者による手動での情報取得のため、症例や術式の変動にも柔軟に対応した情報記録が可能であるが、情報の誤入力等のヒューマンエラーが生じる可能性があることや観察者の多大な労力を要することを考慮すると、現実的に利用可能な方法ではないといえる。



図 1.9 Surgical Workflow Editor による情報取得の様子 [23]

一方、センサベースアプローチは、元々の手術室内で使用されているデバイスを計測機器として利用するか、もしくは手術室内に新たに設置した計測機器を利用することで人の手を介さずに作業情報を自動取得する方法である。前者の例としては、内視鏡等の映像機器や患者モニタリングシステム、後者の例としては RFID(Radio Frequency Identifier)機器、視線検出器や3次元位置計測装置等のトラッキングシステムが挙げられる。また現在では da Vinci®などの手術支援ロボットも術具操作のデジタル記録媒体として利用されてきている。ただし、センサベースアプローチの場合にはヒューマンエラーのない自動記録が可能ではある反面、新たにセンサを設置する場合には手術環境の阻害が懸念され、また計測能力の制限や煩雑な設定・調整を伴うことが多く、症例・術式の変動に対応した計測・分析が難しいとされている。

したがって、多様な症例・術式が混在する臨床症例を対象に、手術作業情報を取得・分析することを考慮した場合、

- (a) 手術室内で手術環境・作業を阻害せずに詳細な作業情報を自動的に取得すること
- (b) 人的に判断・評価されてきた手術手技の良し悪しを具体的かつ定量的に示すこと
- (c) 症例/術式間の計測・分析条件の変動に対応すること

が重要な課題となるが、これらの課題を同時に解決する手法は未だ考案されていないのが現状である。

そこで、本研究では手術ナビゲーションシステムを手術作業情報の記録媒体として応用することで、上記(a)(b)(c)の課題を同時に解決する要素技術の開発について考える。

### 1.2.3 手術ナビゲーションシステムの手術作業工程解析への応用

手術ナビゲーションシステムとは、術前・術中に撮像された患者の医用画像上に、3次元位置計測装置によって計測される術具の位置姿勢を表示することで、術中の正確な作業位置や視認が困難な解剖位置の把握を補助し、より安全で正確な手術の遂行を支援する装置である(図 1.10 (a))。広義では、術者が扱う術具の現在位置を提示することなく高度な患者解剖情報の地図を術中に提示する技術(図 1.10 (b))についても、画像誘導ナビゲーションと扱うこともあるが、本研究ではこちらのナビゲーションについては考慮しない。以下、本論文中記載の「ナビゲーションシステム」は図 1.10 (a)に示すような術具位置のトラッキング・提示を伴う画像誘導支援システムを指す。

現在市販されているナビゲーションシステムでは詳細な解剖構造情報を取得できるCTやMRI等の術前・術中医用画像が主に利用されており、これら医用画像空間と実空間の位置合わせ(レジストレーション)を行うことで実空間上での術具動作を医用画像上で表示する画像誘導を実現しているため、対象とする手術部位・患部が術中でも移動・変形せずに位置・形状が安定している必要がある。そのため、現在、ナビゲーションシ

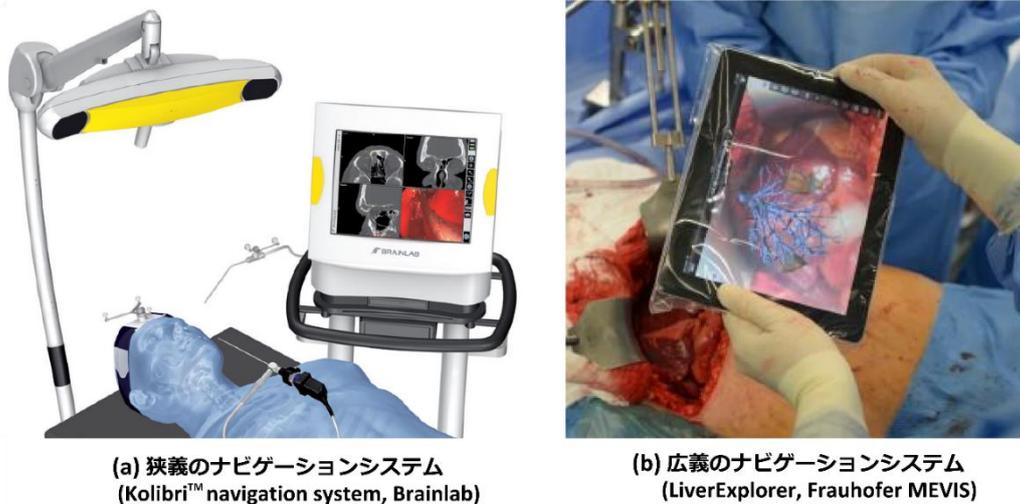


図 1.10 手術ナビゲーションシステム

システムは移動・変形の少ない部位を手術対象とする脳神経外科，耳鼻咽喉科，整形外科等の診療科領域を中心に臨床で実用化されており，2008年には「画像等手術支援加算(ナビゲーション)」の名称で保険収載もされている．また，内視鏡下手術の普及と共に腹腔鏡下手術等における画像誘導支援の需要が高まったことから，腹部外科領域を対象としたナビゲーションシステムの研究開発も盛んに行われている．腹部外科領域の場合，呼吸や体動により移動・変形を伴う腹部臓器が誘導対象となるため，術前画像に基づく誘導では誤差が生じてしまうことから，Open MRI装置 [55]や超音波診断装置 [56,57]などの術中画像を利用したナビゲーションシステムの開発が行われている．

以上のようにナビゲーションシステムは安全な手術の遂行を助ける画像誘導支援システムとして内視鏡外科分野でも発展してきているが，ナビゲーションシステムは画像誘導中，常に術具の位置姿勢情報を取得していることからフライトレコーダのような自動情報記録装置としての側面も合わせ持っている(図 1.11)．具体的には，術具の先端位置情報，姿勢情報，時間情報，術具種類情報を含む術具操作情報とナビゲーションに利用される医用画像情報を画像誘導と同時に副次的に取得することができる．したがって，特にナビゲーション誘導下手術を対象とすれば，元々の臨床環境のセッティングを変え

ずに、また煩雑な設定・調整等を要することなく、手術作業工程解析において重要となる詳細な術具操作情報(以下ログデータ)を自動的に取得できる。前述の通り、内視鏡外科領域でのナビゲーションの導入は高いモチベーションを維持して積極的に検討されてきており、今後ナビゲーション誘導下での内視鏡下手術の普及・適応拡大が予想されるため、ナビゲーションシステムは内視鏡下手術における手術作業工程解析の情報記録媒体として十分に期待できるものである。そこで、本研究ではナビゲーションシステムより得られる情報(ログデータと医用画像情報)を利用した手術作業工程解析手法の構築を行う。

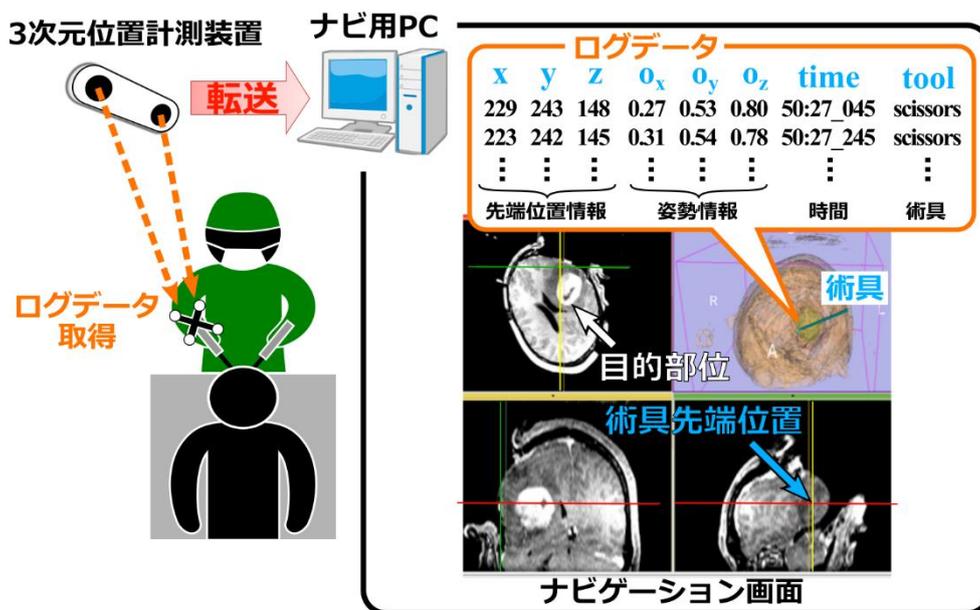


図 1.11 手術ナビゲーションシステムによる情報取得

### 1.3 本研究の目的と方針・位置付け

#### 1.3.1 本研究の目的

本研究では本来誘導支援のために利用されてきたナビゲーション技術を手術作業情報の記録媒体として応用することで、工学的見地から手術作業工程を定量的に分析・評価する手法の研究開発を行う。特にナビゲーションシステムから得られる患者の解剖構造と術具操作位置の相対的位置関係情報を活用することで、術者の技量定量評価及び手術作業工程の自動分類に関する新たな手法の構築を目指す。またナビゲーションシステムによる情報のみを利用した技術開発を行うことで、現実的に臨床環境への導入が可能な分析・評価手法、すなわちナビゲーション誘導下手術であれば新たに計測機器の設置・煩雑な設定・調整を必要とすることなく、多様な症例・術式に適応できる手法の構築を目指す。これにより、これまで人の手で主観的に判断せざるを得なかった手術作業工程の評価において科学的根拠を付与することを最終目標とする。

#### 1.3.2 本研究の方針と位置付け

内視鏡下手術は幅広い診療科で多様な術式が施行されるようになり、手術作業工程が確立された術式も多く存在するが、良好な手術結果を残すにはどのように手技を行うべきなのか、あるいは卓越した技術を持つ熟練医と非熟練医の手術手技上の相違点は何であるのかという手術の質に大きく関わる点は未だ明確になっていないといえる。そこで、先述の通り、現在手術作業工程解析の分野では、主に外科手術の術後支援と術中支援の2種類の支援に関する検討が行われているが、本研究では前者に主眼を置くこととする。すなわち、手術終了後、手術ナビゲーションシステムより得られた情報を基に手術作業工程に関してより詳細に分析・評価することで、手術手技がどのようにして行われているのか、そしてどのようにして行われるべきであるのかを明らかにすることを目指す。

先行関連研究 [27,53]でもトラッキングシステムあるいは手術支援ロボットより得られる術具操作情報を基に同様の検討はなされているが、各手術作業工程中の詳細な過程も含めて分析・評価しているものは少ない。また術具操作の動作・軌道のみに着目しているものが大半を占め、その術具操作が患者体内のどこで行われていたのかという重要な点が考慮されていない。当然患者の体内は一様な空間ではなく多様な解剖部位で構成されているため、解剖部位・作業箇所に応じて求められる術具操作も異なることが予想される。そこで、本研究では患者の解剖に対する相対的な術具位置及び操作情報が取得できる手術ナビゲーションシステムの特性を活用し、先行関連研究で考慮されてこなかった解剖学的作業位置と術具操作の関係性を含めたより詳細な手術作業工程解析手法について検討する。

また、筆者は修士までにナビゲーションシステムによる情報を利用した腹腔鏡下胆嚢摘出術における工程解析手法の検討を行ってきた [58]。当研究を進めた結果、臨床環境への適用可能性を考慮した際に必要であると考えられた2つの要素、(i) 汎用性の向上、(ii) ロバスト性の向上を着想とし、本研究ではこれらの要求を満たす要素技術を持った手術作業工程解析手法の構築を目指す。具体的な研究方針について以下に述べる。

#### (i) 汎用性の向上

ここでいう汎用性の向上とは、多様な術式への対応を目指した分析手法の一般化のことを指す。これまでの研究では、腹腔鏡下胆嚢摘出術を開発プラットフォームとした手法構築であり、特に手術作業の特徴を定量化するための分析指標などに関しては胆嚢摘出術に特化した設計がなされていた。診療科が細分化し、術式も多様化しつつある外科医療分野の現状を考慮すると、様々な術式に応じて選択的に利用可能な、汎用性の高い手術作業の定量表現、すなわち分析指標の設計が必要となる。

また、これまで筆者は剥離・切離等の侵襲性の高い処置に関与する術者の右手での術具操作に着目した手術作業工程解析を行ってきた。ただし、内視鏡下手術は一般的に両

手での操作を基本とするものが多い。腹腔鏡下胆嚢摘出術に関して言えば、対象臓器の把持操作、臓器に適当な緊張をかけて剥離・切離を容易にするための牽引操作など、術者が左手で操作する術具は臓器の位置調整や術野展開、右手の作業補助に関わる重要な役割を担っている。そこで、当研究室では左手の術具操作に着目した手術作業工程解析手法の提案も行ってきた [59]。内視鏡下手術において右手と左手の術具操作がそれぞれ重要であることは言うまでもないが、さらに両手の協調操作(Bimanual coordination)、すなわち両手の術具をいかに連動的に協調させながら操作しているかという点も内視鏡下手術を行う上で極めて重要な要素となる。熟練医は非熟練医と比較してこの両手の術具操作の連動性・協調性が優れているという報告 [49,60] もあり、片手側ずつの分析と共に両手の協調操作に関する分析も加味することで、より内視鏡下手術に必要な術具操作の特徴が明瞭化されると考えられる。また、この両手の協調操作の重要性は、術式に応じて扱う術具に違いがあったとしても、両手操作を基本とする内視鏡下手術においては共通して当てはまる事項である。そこで、本研究では多様な術式への適用性の向上に加え、両手の協調性に関する評価要素も組み込んだ独自の手術作業定量表現手法の構築を目指す。

## (ii) ロバスト性の向上

ここでのロバスト性の向上とは、患者の個体差、すなわち個々の症例間の違い・変動に対応した分析・比較のことを想定している。手術は高い変動性を有するものであり、たとえ同一の術式であっても、対象臓器・患部の位置・大きさや疾患重症度、あるいは患者の年齢・身体的特徴・既往歴などによって手術の進め方は変わってくる。これまでの研究では基礎分析手法の構築のためにこれらの点は無視し、術者の技量のみに着目した術者間比較を行うことで技量評価をしてきた。しかし、臨床症例の場合にはこうした個体差は手技に大きな変化・影響を与える可能性があり、これらの変動要素を考慮した上での比較評価が必要になるといえる。患者の既往歴や疾患重症度、あるいは肥満等の身体

的特徴などの要素により明らかに手術難度や手術の進め方に違いがある場合には分類を分けて比較せざるを得ないと考えるが、類似症例に対する同一術式間でこうした明らかな違いが見られない場合であっても対象臓器・患部の位置や大きさが一致することはまずない。そのため、本研究では、特に個々の症例間における対象臓器・患部の位置・大きさの変動を補正した上で手術作業工程をモデル化及び比較することで、術者の技量や手術中の改善すべき箇所を特定する手技定量評価手法の構築を目指す。

また、本研究では、ナビゲーション誘導下手術症例への適用を想定し、ナビゲーションシステムより得られる情報のみを利用して上記の 2 要素を取り入れた手術作業工程解析手法の構築する。そのため、本手法は、術式及び症例に応じて手術環境・設定が変動したとしてもナビゲーションによる誘導が実施される限りは詳細な手術作業情報の計測・分析を可能とする、ということコンセプトとしており、先行関連研究において実現が困難であった次の 3 点の同時解決を達成することを目指す。

1. 手術環境への新たな計測機器の導入/煩雑な設定を要さない作業情報の自動取得
2. 手術の進捗・手術手技上の問題点・術者の技能レベル等の定量分析及び可視化
3. 症例/術式による計測・分析条件の変動に対応した作業評価

以上により、内視鏡下手術の安全な実施と効果的な技能習熟を支援する手術作業工程解析システムの要素技術の開発研究を行う。

## 1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。本論文は全6章で構成され、まず本章にて序論として外科治療分野、特に日本の外科医療を取り巻く現状と課題、そしてそれを解決するための本研究の目的及び方針について述べた。続く第2章から第4章にかけては、本研究における分析・評価手法の方法論について述べる。具体的には、第2章ではナビゲーションシステムより得られる情報に基づき、多様な術式への適応を考慮した上で手術中の作業特徴を定量的に表現する分析指標の算出・選定法、第3章ではその分析指標を基に個々の症例間の変動に対応した手術作業工程の比較評価手法、第4章ではさらに手術の良し悪しを包括的な技量値として定量化する手法に関する分析手法の方法論について記述する。第5章では実験環境による基礎データ及び臨床環境におけるデータに基づく各手法の評価検証結果・考察について記述し、第6章にて本研究成果を総括し、また本研究の将来性等について述べる。

## 第2章 ナビゲーション情報に基づく手術作業特徴の定量表現手法

### 2.1 はじめに

本研究は手術作業工程の自動的かつ定量的な分析・評価を目指すものであるが、このように人間の目によって定性的に判断・評価されてきたものをコンピュータの世界に落とし込み、同様の判断・認識能力を付与しようとする場合、「特徴量」の表現が非常に重要となる。例えば、画像から特定の物体を自動認識・抽出することを目指した画像認識の課題では、画像の輝度勾配の強度や方向ベクトルなどの画像の特徴量を抽出して利用することで一定の成果が得られている。このように情報の中に埋もれた特徴量に着目し、抽出・利用することは定量的な判断・評価を生み出すための第一歩であり、本研究が取り組む課題においても当てはまることであると考えられる。ただし、こうした画像認識の課題とは異なり、本研究が取り組む課題、特に手術手技評価に関して言えば、手術手技の良し悪しの認識自体が目的ではなく、その良し悪しの判断の決め手、すなわちなぜその手技が良いもしくは悪いと判断されたのかを明瞭化することが重要となる。言い換えれば、手術手技上の熟練医との違いや改善すべき部分が何であるのかを術者に伝えることが重要であることから、術者が理解できる形で手術作業の特徴量を表現する必要がある。そこで、本章ではナビゲーションシステムより得られる作業情報を基に、明瞭な手術作業特徴表現を意図した分析指標の構築を行う。

一般に、データ表現としては図 2.1 に示すようにある時点や区間内における複数情報を横断的に表したクロス・セクションデータ、一つの情報を時間に沿って表した時系列データがある。Box トレーニングなどの Off-JT における手技評価を目的とした研究では、トレーニングタスク中に得られた作業情報を平均化したクロス・セクションデータが分析指標としてよく用いられている。同じ作業要素を持つタスク中の包括的な作業の

特徴や傾向を表現したい場合、クロス・セクションデータは非常に有用な表現方法であると考えられるが、クロス・セクションデータのみ依存するとタスク中の手術作業の過程を詳細に表現して評価することは難しくなる。したがって、多様なタスクが複合的に実施され、またその実施時間の変動性も高い臨床の手術の場合、手術中の詳細な問題箇所の特定期間や作業工程の認識を行うためには、時系列データによる表現も不可欠である。そのため、先行関連研究では複数の作業特徴に関する時系列データにより、手術作業工程を時系列的に表現する手法の検討も活発に行われている [18]。そこで、本研究では各手術作業工程において、時系列的に手術作業特徴の過程・推移を表現する分析指標と横断的に手術作業特徴を表現する分析指標の2種類の指標について提案する。また、第1章の中で述べたように筆者は修士までに同様の検討を行ってきたが、その際は腹腔鏡下胆嚢摘出術に特化し、かつ右手のみの術具操作に着目した特徴量設計であった。そこで、ここでは他の術式への適用と内視鏡下手術において重要な両手の協調操作も考慮した上で、どの術式においても順応し、かつ最適な組み合わせを選択できる分析指標の構築、すなわち手術作業特徴を表現する手法の一般化について検討する。

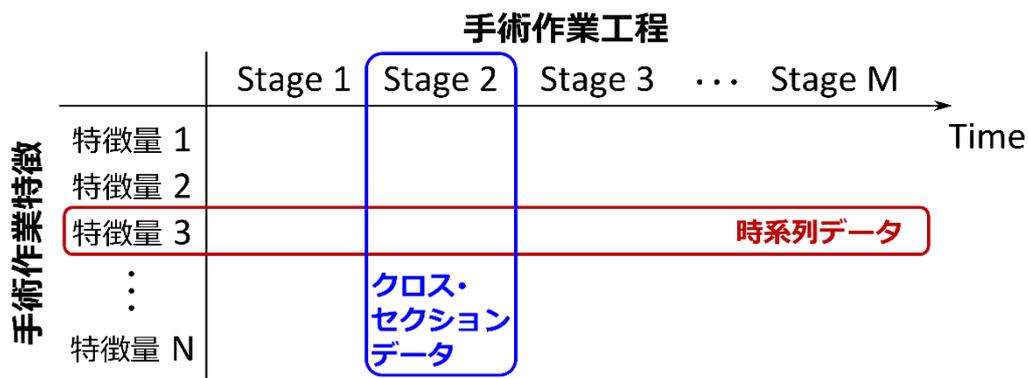


図 2.1 データ表現方法

## 2.2 手術作業特徴の時系列的表現法

ここではまず、手術作業工程内の過程・推移を詳細に表現するための時系列データとしての分析指標について定義する。前述の通り、手術作業の特徴を時系列データとして表現することができれば、手術作業工程の形式化及び標準化、あるいは手術作業工程の比較・評価を行うことが可能となる。そのため、臨床の手術作業情報を時系列データとしてどのように表現し、また手術作業工程をどのように形式化・モデル化するかという課題は、当該分野における関連研究の中でも多く取り組まれている重要な検討課題の一つである。最も有名な手術作業工程の定量表現方法としては、観察者ベースのアプローチにより得られる、手術作業工程への関連性が高い 3 つの情報(行われた処置、処置がなされた解剖部位、使用術具)を利用したもの [23–25]が挙げられるが、近年ではさらにセンサベースのアプローチにより手術室内の機器を通じて、手術作業工程に関連する情報を自動的に取得した上で手術作業工程を定量表現する手法も検討され始めている [46]。本研究で着目したナビゲーションシステムによる情報もまた、手術作業に大きく関連する情報を内包することから、本研究ではこの情報を基に、手術作業工程の形式化に有用な手術作業特徴を時系列データとして表現することを考える。

まず手術作業の特徴量を算出するための取得情報の詳細について図 2.2 に示す。本研究では、手術ナビゲーションシステムにより取得される、患者の解剖部位に関する情報とその解剖部位に対する術具操作情報を利用する。具体的には、医用画像上の解剖部位の抽出領域情報  $V$ 、術具先端の 3 次元位置座標  $L_i = (x_i, y_i, z_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、術具姿勢情報(方向ベクトル)  $\vec{O}_i = (ox_i, oy_i, oz_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、時間情報  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )、術具種類情報  $I_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) である。 $i$  と  $n$  は取得データのフレーム番号とサンプル数をそれぞれ意味する。抽出領域情報とは、医用画像処理ソフトであれば標準的に搭載されている領域抽出(セグメンテーション)機能により、ナビゲーションのために医用画像から抽出及び作成される解剖部位の 3 次元ボリュームデータのことである。また、ここでの

術具姿勢情報とは、図 2.2 に示すように、計測術具のロッド部分(計測術具が内視鏡の場合は鏡筒部分)の向きを表す方向ベクトルのことを指す。手術ナビゲーションシステムでは、実空間と医用画像空間の位置合わせを通じて実空間上での術具の位置姿勢が医用画像空間上で表示されるが、この実空間と医用画像空間の位置合わせとは、実空間の座標系(位置計測装置が持つ座標系)を医用画像空間の座標系に変換することを意味する。したがって、ナビゲーションシステムからの術具の位置情報  $L_i$  及び姿勢情報  $\vec{O}_i$  は医用画像空間の座標系に従う値として取得される。

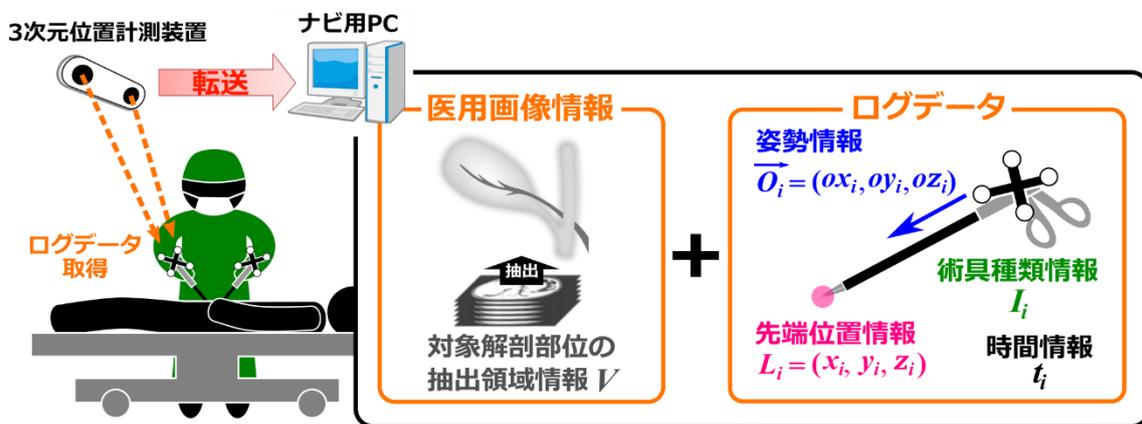


図 2.2 手術作業特徴の定量化に利用するナビゲーション情報

次に、表 2.1 に本研究で定義した分析指標について示す。特に、本研究で独自に定義した分析指標については、背景色をつけて示している。手術手技評価において利用されることの多い術具の速度・加速度・躍度、回転量などの特徴量に加え、患部に対してどのように処置を進めたのかを表す作業進捗度を分析指標として定義する [61]。速度  $v_i$ ・加速度  $a_i$ ・躍度  $j_i$  は、作業中の術具のブレや急峻な動きの有無などの術具操作の特徴量として用いられ、術具先端位置情報  $L_i$  と時間情報  $t_i$  を基に算出される単位時間当たりの術具先端の移動距離、速度、加速度の変化率をそれぞれ表す。術具の回転量もまた、術具操作の特徴を表す指標としてよく利用されるが、図 2.3 に示すように、ここでの回転とは術具のロッド部分の向きの変化とし、術具姿勢情報  $\vec{O}_i$  と時間情報  $t_i$  を基に算出さ

れる単位時間当たりの回転量の変化率を回転量  $r_i$  と定義している。

作業進捗度の分析指標の算出方法については、図 2.4 にその概要を示す。ナビゲーションシステムによる画像誘導では、処置対象の解剖部位あるいはその周辺の解剖部位を 3次元ボリュームデータとして医用画像から抽出し、術具と解剖部位の位置関係を可視化することが行われている(図 2.4 (a))。そのため、こうした解剖情報が利用できるナビ

表 2.1 時系列データによる分析指標

分析指標	定義	計算式
右手/左手の術具操作		
$v$ : 速度 [ $mm/s$ ]	単位時間当たりの術具先端の移動距離の変化率	$v_i = \left  \frac{dL_i}{dt} \right $
$a$ : 加速度 [ $mm/s^2$ ]	単位時間当たりの術具先端の速度の変化率	$a_i = \left  \frac{dv_i}{dt} \right $
$j$ : 躍度 [ $mm/s^3$ ]	単位時間当たりの術具先端の加速度の変化率	$j_i = \left  \frac{da_i}{dt} \right $
$r$ : 回転量 [ $deg/s$ ]	単位時間当たりの術具回転量の変化率	$r_i = \left  \frac{dR_i}{dt} \right  \left( R_i = \cos^{-1} \left( \frac{\overline{O_i \cdot O_{i-1}}}{ O_i   O_{i-1} } \right) \right)$
$p$ : 作業進捗度 [%]	作業対象領域との干渉率	$p_i = \frac{V_B}{V_A} \times 100^*$
両手の協調操作		
$rv$ : 相対速度 [ $mm/s$ ]	両手術具の速度差分	$rv_i = v_{Ri} - v_{Li}^{**}$
$ra$ : 相対加速度 [ $mm/s^2$ ]	両手術具の加速度差分	$ra_i = a_{Ri} - a_{Li}$
$rj$ : 相対躍度 [ $mm/s^3$ ]	両手術具の躍度差分	$rj_i = j_{Ri} - j_{Li}$
$br$ : 術具間角度 [ $deg$ ]	両手術具の方向ベクトルがなす角度	$br_i = \cos^{-1} \left( \frac{\overline{O_{Ri} \cdot O_{Li}}}{ O_{Ri}   O_{Li} } \right)$
$bd$ : 術具間距離 [ $mm$ ]	両手術具の先端同士を結んだ距離	$bd_i =  L_{Ri} - L_{Li} $
$h$ : 画面中心-術具間距離 [ $mm$ ]	内視鏡鏡筒方向の直線と術具先端との距離	$h_i = \frac{ (L_{Ri} - L_{Li}) \times O_{Li} }{ O_{Li} }$

\*  $V_A$ : 作業対象領域のボリュームデータ,  $V_B$ : 作業終了領域のボリュームデータ

\*\*  $R/L$ : 右手/左手のパラメータ

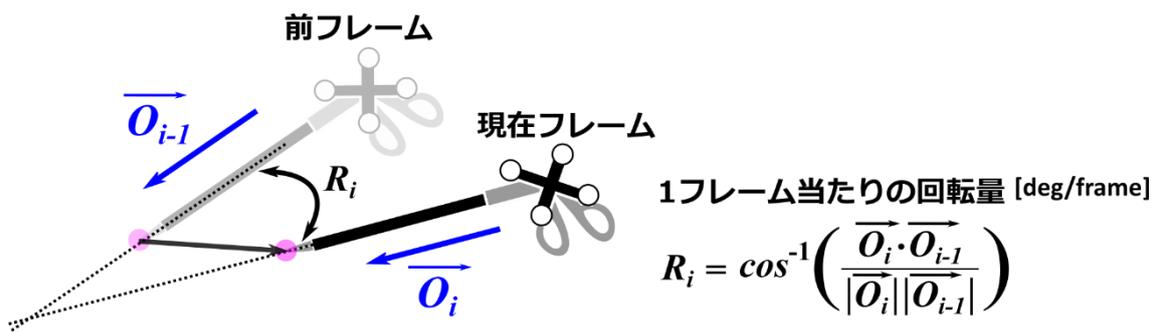


図 2.3 術具の回転の定義

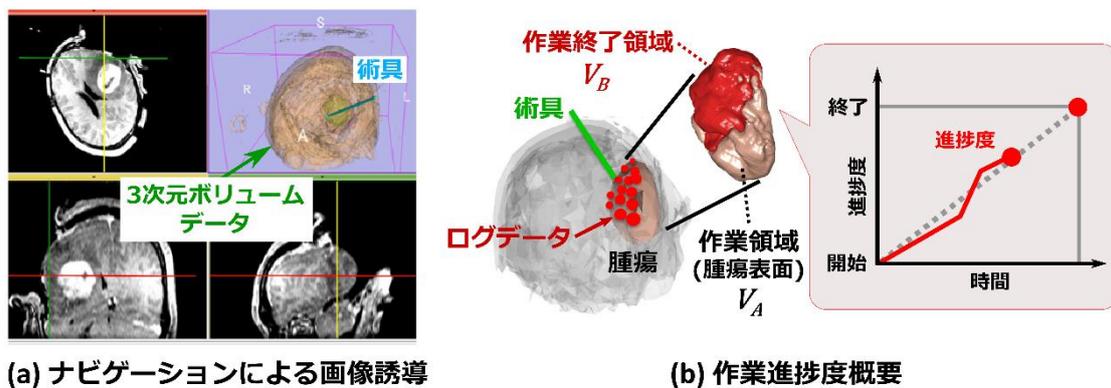


図 2.4 作業進捗度算出方法

ゲーションの場合は、画像空間上で術具を対象部位に対してどのようにアプローチしたかを求めることができる。特に手技の中でも登場頻度の高い「剥離」などの作業では、接触(干渉)領域＝作業終了領域とみなせることから、患部の作業対象領域( $V_A$ )に対する作業終了領域( $V_B$ )の割合として作業進捗度を分析指標の一つとして定義した(図 2.4 (b))。

また、両手の協調操作を表す指標としては、両手術具間の相対速度・相対加速度・相対躍度、両手術具間の角度及び距離、そして画面中心-術具間距離の指標を定義した。両手術具間の速度・加速度・躍度の差分による相対的な値は、両手術具を協調的に操作しているかどうかを調べるための指標としてよく用いられる特徴量である。ここでは、右手術具の値から左手術具の値を引くことにより得られる左手術具に対する右手術具の速度・加速度・躍度を相対速度・相対加速度・相対躍度の指標として定義している。また、手術を行う上では両手術具間の位置関係も同様に重要な作業要素であることから、両手

術具間のポジショニングに関連する特徴量として、右手術具と左手術具の姿勢情報  $\vec{O}_{Ri}, \vec{O}_{Li}$  から得られる術具間角度、先端位置情報  $L_{Ri}, L_{Li}$  の差分から得られる術具間距離の指標を用いる。術具間角度に関しては、回転量の定義と同様に術具のロッド部分の方向ベクトルに着目し、各フレーム時の右手術具の方向ベクトル  $\vec{O}_{Ri}$  と左手術具の方向ベクトル  $\vec{O}_{Li}$  がなす角度を求めることで得る。さらに、本研究では多様な術式への適用の観点から、術者が左手で内視鏡、右手で術具を持って行う内視鏡下手術を想定した作業特徴量として、画面中心-術具間距離の指標を定義する(図 2.5)。腹部外科領域における内視鏡下手術では、内視鏡の操作は助手(スコピスト)に任せ、術者は両手に鉗子等の術具を持って手術を進めることを基本としているが、耳鼻咽喉科あるいは整形外科領域では術者がスコピストとしての役割を兼任しながら進める内視鏡下手術が行われている。こうした手術の場合、術者の内視鏡操作による視野確保の技術も手術の良し悪しを大きく左右する。内視鏡下手術では術野の観察・視認は内視鏡の視野に大きく依存することから、内視鏡の視野外で作業を進めることは非常に危険であり、基本的には作業箇所とその周辺をしっかりと観察できるように内視鏡画面の中央付近に術具を映しながら手術を進めるのが良いとされる [62]。そこで、本研究では術具の位置姿勢情報を活用し、内視鏡の鏡筒の方向ベクトルに対する術具先端の距離を内視鏡の画面中心-術具間距離として分析指標の一つに加えた。内視鏡先端から術具先端へのベクトル  $\vec{L}_{Ri} - \vec{L}_{Li}$  と内視

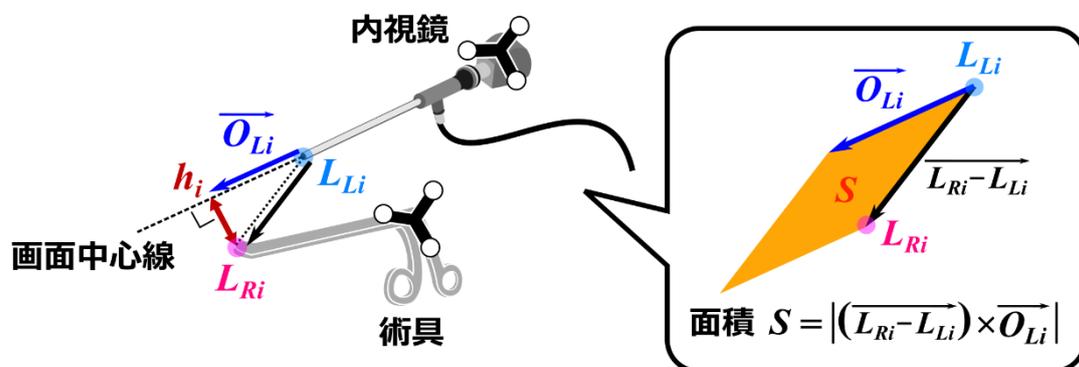


図 2.5 内視鏡画面中心-術具間距離の定義

鏡筒の方向ベクトル  $\vec{O_{Li}}$  の外積の大きさが、 $|\vec{O_{Li}}|$  を底辺、 $h_i$  を高さとする平行四辺形の面積と等しくなることから、内視鏡の画面中心-術具間距離  $h_i$  は外積の大きさ  $|(\vec{L_{Ri}} - \vec{L_{Li}}) \times \vec{O_{Li}}|$  を  $|\vec{O_{Li}}|$  で除算することで得られる。

手術作業工程は常に流動的であることから、手術作業工程中の作業特徴の変化をより詳細に捉えるため、本研究では経時的な定量化が可能な上記の分析指標の利用により、手術作業工程を時系列的に表現することを試みる。

### 2.3 手術作業特徴の横断的表現法

手術作業工程の形式化及びモデル化などの時系列的な表現方法を通じ、異なる術者間あるいは同一術者による異なる症例間での手術作業工程の詳細な比較・評価へ繋げることは非常に重要であるが、例えば、現在の熟達度や技能レベルのような術者が直感的に理解しやすい形でのスコア化を図ることも重要であると考えられる。実際、こうしたスコア化は術者の技能習得のモチベーションの維持・向上にも繋がることから、手術トレーニングの現場では重要視されており、VR シミュレータなどの一部のトレーニング機器にはスコアリング機能が搭載されている。例えば、手術作業工程中のどこに問題があったのかといった問題箇所の特定制が要求される場面では時系列的な指標を用いた分析が有効であるが、手技に関して現在の自分の立ち位置や得手不得手を知るといった目的であれば一つの値として得られるような理解しやすい指標を用いることが有効であるといえる。したがって、術者の要求に応じて用いるべき指標も変わってくると考えられることから、本研究では時系列的な表現に加え、工程ごとの大まかな作業特徴や傾向をクロス・セクションデータとして横断的に表現する方法についても検討する。

表 2.2 に本研究で定義したクロスセクションデータによる分析指標について示す。表 2.1 と同様、本研究で独自に定義した分析指標については背景色をつけて示している。

表 2.2 クロスセクションデータによる分析指標

分析指標	定義	計算式
右手/左手の術具操作		
$V$ : 平均速度 [mm/s]	作業工程中の平均速度	$V = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^n v_i$
$A$ : 平均加速度 [mm/s <sup>2</sup> ]	作業工程中の平均加速度	$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i$
$J$ : 平均躍度 [mm/s <sup>3</sup> ]	作業工程中の平均躍度	$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n j_i$
$R$ : 平均回転量 [deg/s]	作業工程中の平均回転量	$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$
$D$ : 分布密度	最近隣距離法による 3次元空間の点群分布密度	$D = \frac{W}{E(W)}$ **
$EV$ : 楕円体体積	作業領域 $V_C$ に対する点群分布 の近似楕円体の体積の割合	$EV = \frac{4\pi abc}{3V_C}$ ( $a, b, c$ : 楕円体半径)
両手の協調操作		
$RV$ : 平均相対速度 [mm/s]	作業工程中の平均相対 速度	$RV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  rv_i $
$RA$ : 平均相対加速度 [mm/s <sup>2</sup> ]	作業工程中の平均相対 加速度	$RA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  ra_i $
$RJ$ : 平均相対躍度 [mm/s <sup>3</sup> ]	作業工程中の平均相対 躍度	$RJ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  rj_i $
$BR$ : 平均術具間角度 [deg]	作業工程中の術具間の 平均角度	$BR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n br_i$
$BD$ : 平均術具間距離 [mm]	作業工程中の術具間の 平均距離	$BD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n bd_i$
$H$ : 画面中心-術具間 平均距離 [mm]	作業工程中の画面中心 -術具間の平均距離	$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$
$RD$ : 相互分布密度	最近隣距離法による 点群間の相互分布密度	$RD = \frac{W_B}{E(W_B)}$ ***

\*  $n$ : 計測したログデータの点の数

\*\*  $W$ : 平均最近隣距離,  $E(W)$ : ランダム分布に従う時の平均最近隣距離の期待値

\*\*\*  $W_B$ : 平均相互最近隣距離,  $E(W_B)$ : ランダム分布に従う時の平均相互最近隣距離の期待値

時系列データとしても得られる術具速度・加速度・躍度, 回転量などの術具操作に関わる指標の平均値に加え, 本研究では術具先端位置のログデータの点分布から作業密度及び範囲を近似的に算出する指標を定義した. 分布密度の指標に関しては空間的な点分布解析の手法の一つとして用いられている最近隣距離法 [63]に基づいて得られるものである. 表中に示されている平均最近隣距離  $W$  は, 各点から最も近い点までの距離を平均化したもので, 一方,  $E(W)$  は点分布の点群がランダムに分布する(一様ポアソン分布に従う)場合の  $W$  の期待値を表しており, それぞれ次式によって求められる [64].

$$W = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad E(W) = \frac{\left\{ \Gamma\left(\frac{3}{2} + 1\right) \right\}^{1/3} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{3} + 1\right)}{\rho^{1/3} \cdot \pi^{1/2}} \quad \left( \rho = \frac{n}{V_c} \right) \quad (2.1)$$

$d_i$  はログデータの各点から最近隣点までの距離,  $\rho$  は点密度(任意の点分布領域(作業領域)の体積  $V_c$  における点の数  $n$ )を表している. ただし, こうした作業範囲に関連する指標は術者の技量だけでなく, 患者の個体差, 例えば患部のサイズの違いなどに応じて変動することが予想される. したがって, この作業分布密度の指標を求める際に必要となる作業領域の体積  $V_c$  は症例に応じて設定することが望ましい. そこでここでは, 設定の統一を図るため, あらかじめ作業領域を決定するためのランドマークとなる患者の解剖学的特徴点を決めておき, 症例ごとに患部のサイズに応じて  $V_c$  を設定することとする. 最終的な分布密度  $D$  は期待値  $E(W)$  に対する  $W$  の値の大きさにより求められ,  $D$  の値はログデータの点分布がランダムに分布する場合は 1 に近づき, 集中的に分布する場合は 0 に近づく.

ただし, 最近隣距離法では, 図 2.6 に示すように点分布が一極に集中するパターンと複数点が集まって点在するパターンの判別ができないなど, 点分布のパターンによっては分布の状態を正しく反映させることが難しい場合が存在する. そのため, 本研究ではさらに分布の状態を別の観点から表す指標として近似楕円体の体積を定義した. ここでは, ログデータ分布の期待値  $\mu$  と共分散行列  $C$  から成る 3 次元正規分布をログデータの

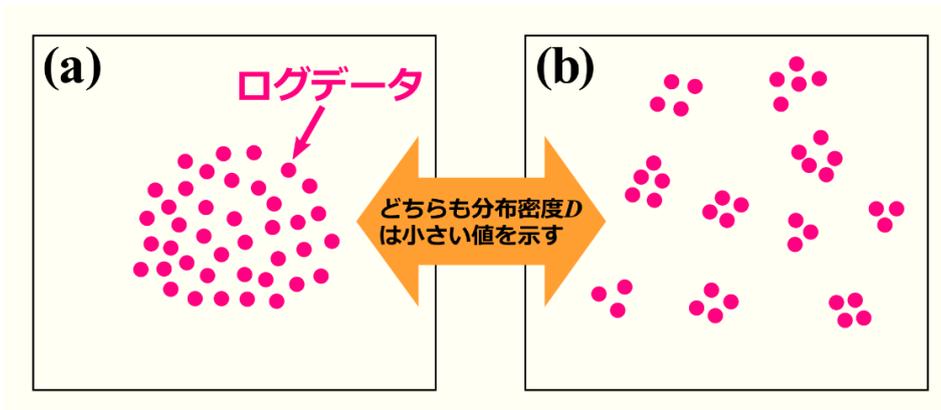


図 2.6 最近隣距離法で分布状態の判別が困難な点分布例

近似楕円体として求める [65]. すなわち次式により, 3次元の単位球面  $X$  を 3次元正規分布  $N(\mu, C)$  に従うように変換することで近似楕円体  $Y$  を算出する.

$$Y = AX + \mu \quad (2.2)$$

$A$  は共分散行列  $C$  のコレスキー分解  $C = AA^T$  により求められる下三角行列を意味する. ただし, この楕円体も患者の個体差の影響を受けることから, 分布密度と同様, 患部のサイズに応じて設定される作業領域の体積  $V_c$  に対する近似楕円体  $Y$  の体積の割合を楕円体体積  $EV$  として定義する.

両手の協調操作の分析指標に関しても同様に, 時系列データとしても得られる両手術具間の相対速度・相対加速度・相対躍度, 術具間角度・距離, 画面中心-術具間距離の指標の平均値に加え, 両手術具のログデータの分布状態を表す指標として相互分布密度を定義した. この相互分布密度は, 最近隣距離法に基づいて 2 群の点分布の相互密度を算出できるように拡張したものであり, このとき計算に利用される平均相互最近隣距離  $W_B$  とその期待値  $E(W_B)$  は次式により求められる [66].

$$W_B = \frac{1}{n_R + n_L} \left( \sum_{i=1}^{n_R} d_{Rj} + \sum_{j=1}^{n_L} d_{Lj} \right), \quad (2.3)$$

$$E(W_B) = \frac{1}{n_R + n_L} (n_R \cdot E_L(W) + n_L \cdot E_R(W))$$

$R$  と  $L$  はそれぞれ右手術具と左手術具のログデータの点群を意味しており,  $n_R$  と  $n_L$  は  $R$

群と  $L$  群の点の数,  $d_{Rj}$  と  $d_{Lj}$  は  $R$  群の各点から  $L$  群の最近隣点までの距離と  $L$  群の各点から  $R$  群の最近隣点までの距離を表す. また,  $E_R(W)$  と  $E_L(W)$  は  $R$  群と  $L$  群の点群がそれぞれランダムに分布する場合の平均最近隣距離の期待値を表す. この相互分布密度は 2 群の点分布が類似した分布であるかどうかを表しており, 右手と左手で扱う術具のログデータ分布が類似していればいるほど 0 に近づく.

先行関連研究ではクロス・セクションデータの指標として作業時間等の時間的要素が最もよく用いられているが, 手術手技に関する分析・評価結果を術者にフィードバックすることを想定した場合に手術作業時間に依存する指標は有用でないと判断し, 本研究では除外した. 一般に熟練医の方が手術時間は短くなることが予想され, 実際に多くの研究でそうした結果が得られている. しかしながら, 例えば熟練医に対して非熟練医の方が有意に長い作業時間であった作業工程を特定したところで, 作業時間のような要素は術具操作の技能向上に伴い, 自ずと向上されていく要素であると考えられることから, 非熟練医がその工程の作業時間を短縮することは難しいといえる. また, 場合によってはゆっくり慎重にやることが良い結果を生む可能性があることから, 本研究ではあくまで術具・内視鏡操作あるいは両手術具操作の協調性等に関する要素のみを考慮する.

また, 両手操作を要するタスクを対象に操作能力の定量評価を試みている類似研究 [67] では, 作業中に得られる力センサや加速度センサ等の周波数領域の情報に着目し, 両手操作の協調性を推し量る指標としてコヒーレンスなどを利用しているものも見受けられる. こうした分析指標も作業者の動作を定量的に表現する上では有用であると考えられるが, 元の信号情報を周波数成分として表現し直すなどの変換が必要となる. 最終的に作業者である術者にどこに課題があり, どのように操作すべきであったのかという点を提示することを考慮すると, 可能な限り, 術者が直感的に理解しやすい表現が望ましいといえる. そこで, ここでは直感的な理解のしやすさと汎用性の 2 つの観点を重視した上で上記の分析指標を設定・定義した.

## 第3章 手術プロセスモデルによる手技課題特定法

### 3.1 はじめに

ここでは前章で定義・構築した分析指標を具体的にどのように利用して手術作業工程の定量評価に結び付けるのかについて述べていく。医療に限らず、特殊な技術・技能の習得及び伝承が求められる世界では、「技を盗む」という言葉がよく用いられるように熟達者の・技術を模倣することは技能向上への近道とされている。医療現場においても、指導医が培ってきた知識や技術を研修医に伝え、研修医がそれを実践して身に付けていくというプロセスで OJT が行われているように、熟練医の考え方ややり方を模倣することは技能を向上させていく上で極めて重要なことであるといえる。手術トレーニングの分野では、こうした技術の伝達・模倣を通じた技術習得プロセスの加速化を図るために、手術手技の遠隔教授システムも開発されている [68]。したがって、手術作業工程中、熟練医がどのようにして手技を行っているのか、熟練医との違いはどこにあるのかを明瞭化することが技能向上支援につながると考えられる。そこで、本章ではまず、術者が手術中どの箇所をどのような術具操作で行っていたのかを表現するために、ナビゲーション情報から算出される時系列データの分析指標を基に、手術作業工程を手術プロセスモデル(Surgical Process Model; SPM)として形式化・モデル化することを考える。続いてその SPM を比較することで手術手技上の課題を特定する手法について提案する。ただし、臨床への適用を考慮すると、患者の個体差などにより SPM を単純に比較することが難しい場面が起り得る。そこで、ここではこのような計測・分析条件の変動に対応可能なロバストな SPM 比較手法の構築について検討する。

分析・評価結果を技能向上へと結びつけるためには、評価対象者である術者へのフィードバック、すなわち何をどう改善すべきかを明確に術者に知らせる方法も重要となる。本研究はこうしたフィードバックについても意識した手法構築を目指すものであるが、

先述の通り，熟練医と非熟練医の間にどのような違いがあるのかが未だ明確化されていない現状を考慮し，本研究では熟練医と非熟練医との差がどこにあり，また上手いと判断される手技とはどのようなものかを解明することに主眼を置く．

なお，本論文ではこれまでに対象術式としてきた腹腔鏡下胆嚢摘出術以外の手術への拡大適応が可能な手法構築を目指したものであるが，ここでは説明を簡便にするため，手法の説明図は全て LC を想定したものとして記述する．

### 3.2 手術プロセスモデル

手術作業工程及び手術プロセスを定義し，形式化・モデル化することは，手術作業工程の識別や比較を可能にすることから，手術作業工程解析の分野では多くの研究で検討されている項目の一つである．手術は階層的に異なるレベルでの様々な構成要素によって表現することが可能であることから，様々な表現により手術プロセスのモデル化が試みられている．腹腔鏡下胆嚢摘出術を例として，手術を SPM として定義・モデル化する上で，当該分野で用いられている構成要素の簡略図と SPM の定義例を図 3.1 と図 3.2 に示す．手術作業工程の自動認識による術中支援を目指した先行関連研究では，工程

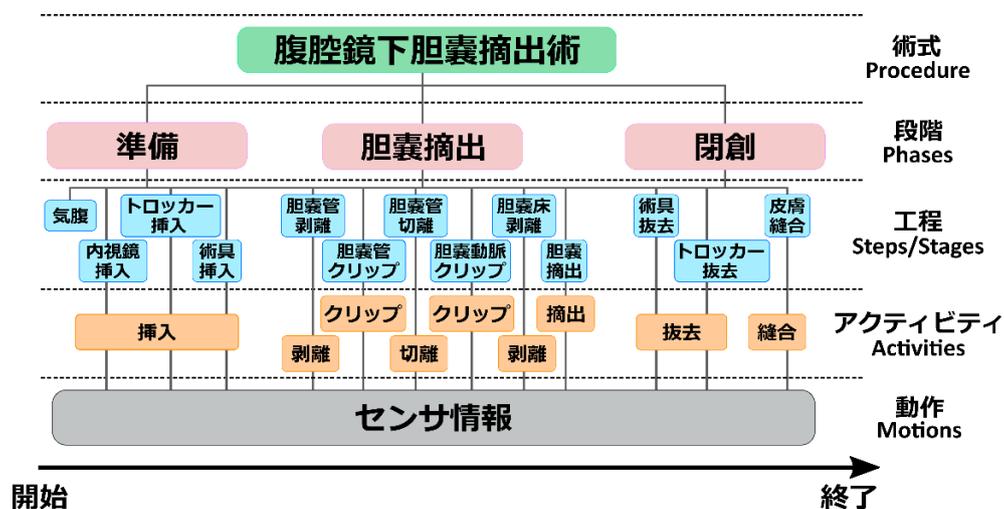


図 3.1 手術プロセスモデルの構成要素例

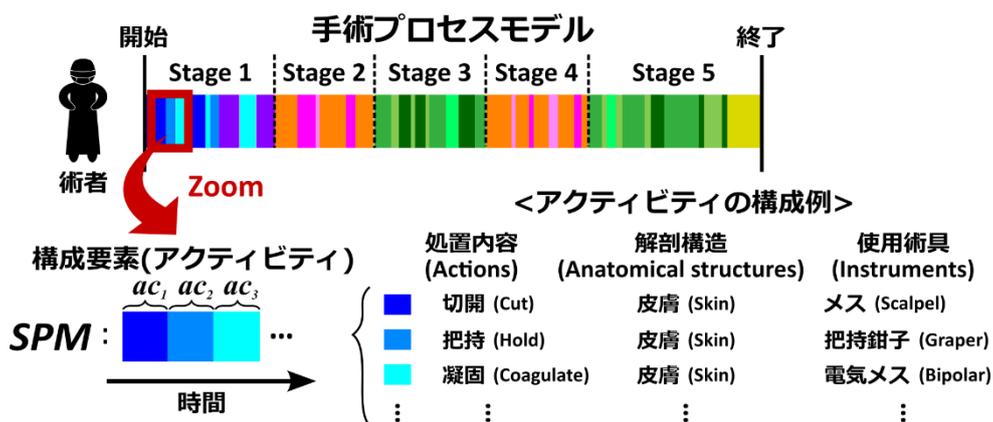


図 3.2 手術プロセスモデルの定義例

(Steps/Stages)あるいはアクティビティ(Activities)のレベルでSPMを構成して利用しているものも多く見られるが、本研究のように手術手技がどのように行われていたのかをより詳細に表現し分析することを目的とした場合、より細かいレベルでの構成要素及びセンサ情報を利用してSPMを生成する必要がある。また、手術手技に関する詳細な作業情報を含むSPMを手術ごとに生成することができれば、次はSPM同士の比較評価が可能になると考えられるが、先に述べたように、手術作業工程中の術具操作は、患者の解剖部位との関連性が非常に高いことが予想される。例えば、損傷リスクの高い解剖部位を処置するには慎重な術具操作になるなど、解剖部位に応じて適切な術具操作は変動すると考えられる。したがって、生成したSPM同士を比較して手術手技上の課題を明確化することを考えた場合、同様の解剖部位を処置している際の術具操作情報を比較することが望ましい。そこで、本研究では詳細な術具操作情報と患者の解剖部位に対する術具位置情報の両方を含むナビゲーション情報の特性を活かし、手術作業工程中の詳細な手術手技を表現する $SPM_t$ と手術作業工程中に術具先端が患者の解剖部位に対してどこに位置していたのかを表現する $SPM_l$ の2種類のSPMをそれぞれ異なる情報処理により生成することを考える(図 3.3)。これにより、前者の $SPM_t$ 同士を比較する際に後者の $SPM_l$ を利用することで、 $SPM_t$ 間で共通の解剖位置を処置していた箇所の探索・対応付けを図り、同様の解剖位置を処置している際の術具操作情報の比較を実現する。

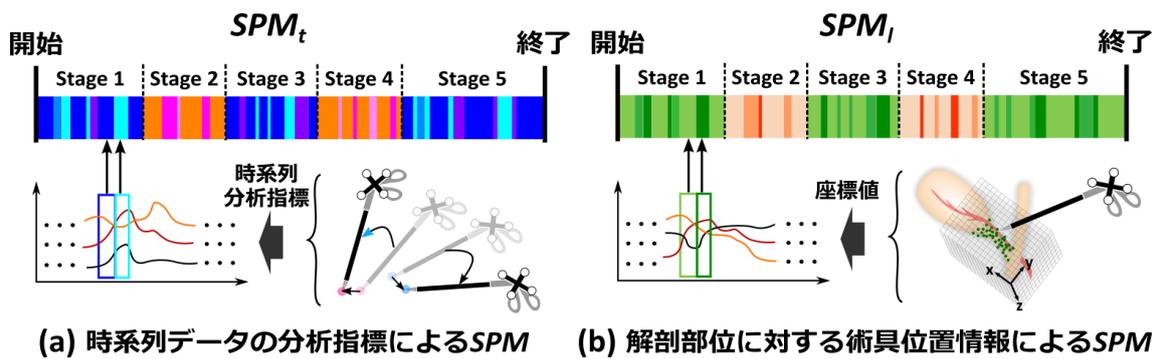


図 3.3 2 種類の手術プロセスモデルの構築イメージ図

### 3.2.1 時系列データの分析指標による手術プロセスモデルの定義

ここではまず表 2.1 で定義した時系列データによる分析指標を利用することで、手術作業工程を術具操作情報のレベルで定義・生成することを考える。時系列データによる分析指標から成る構成要素  $ac_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を用いて表される手術プロセスモデル  $SPM_t$  は、次式のように表すことができる [69].

$$SPM_t = \langle ac_1, ac_2, \dots, ac_i, \dots, ac_n \rangle \quad (3.1)$$

$$ac_i = \left\{ \begin{array}{cccccc} v_{Ri}, & a_{Ri}, & j_{Ri}, & r_{Ri}, & p_{Ri}, & \\ v_{Li}, & a_{Li}, & j_{Li}, & r_{Li}, & p_{Li}, & \\ rv_i, & ra_i, & rj_i, & br_i, & bd_i, & h_i \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

$R, L$  はそれぞれ右手術具と左手術具の分析指標を表しており、 $v_i, a_i, j_i, r_i, p_i$  はそれぞれ速度、加速度、躍度、回転量、作業進捗度の指標である。 $rv_i, ra_i, rj_i, br_i, bd_i, h_i$  は両手の協調操作に関する分析指標であり、それぞれ相対速度、相対加速度、相対躍度、術具間角度、術具間距離、画面中心-術具間距離の指標を表す。したがって、表 2.1 で定義した時系列データを全て利用できる場合には、計 16 個の分析指標の項を持つ構成要素  $ac_i$  によって  $SPM_t$  が生成される。この  $SPM_t$  の生成により、手術中に行われた術具操作の特徴を時系列的に内包するモデルを構築することができるが、このモデルには「術具操作が患者体内のどこで行われたのか」を表す作業位置に関する情報は含まれていない。そのため、SPM 間の比較評価を図る場合には、共通の作業箇所、すなわち同じ解剖位置

を処置している箇所での術具操作情報(構成要素  $ac_i$ )を比較することが望ましいが、作業位置の情報を持たない  $SPM_t$  のみではその SPM 間の共通箇所を対応付けることが難しい。そこで次に、患者の解剖部位に対する相対的な術具位置情報を基に、SPM 間の共通作業箇所の探索・対応付けを行うための  $SPM_t$  の生成について考える。

### 3.2.2 解剖部位に対する術具位置情報による手術プロセスモデルの定義

ナビゲーションシステムでは、実空間の座標系を医用画像空間の座標系に合わせることで画像誘導を行っていることから、ログデータは医用画像空間座標系の値として得られる。しかしながら、この座標系は医用画像を撮像した際の状態によって変動するため、座標系の原点は毎回異なることになる。また、臨床の場合には当然患者の解剖位置や大きさも一定ではないことから、同じ解剖位置を処置している場合であっても症例が異なればログデータが示す座標値は異なるものになる(図 3.4)。

そこで、ここではまず図 3.5 に示すように、症例ごとに設定が変わらないように解剖学的な特徴点を座標原点として作業領域の設定を統一する。次に作業対象となる解剖部位のサイズ及び位置に合わせてスケーリングした新たな座標系を設定し、ログデータをラベリングし直すことで座標の統一を図る。この作業に必要な新たな座標原点の設定や

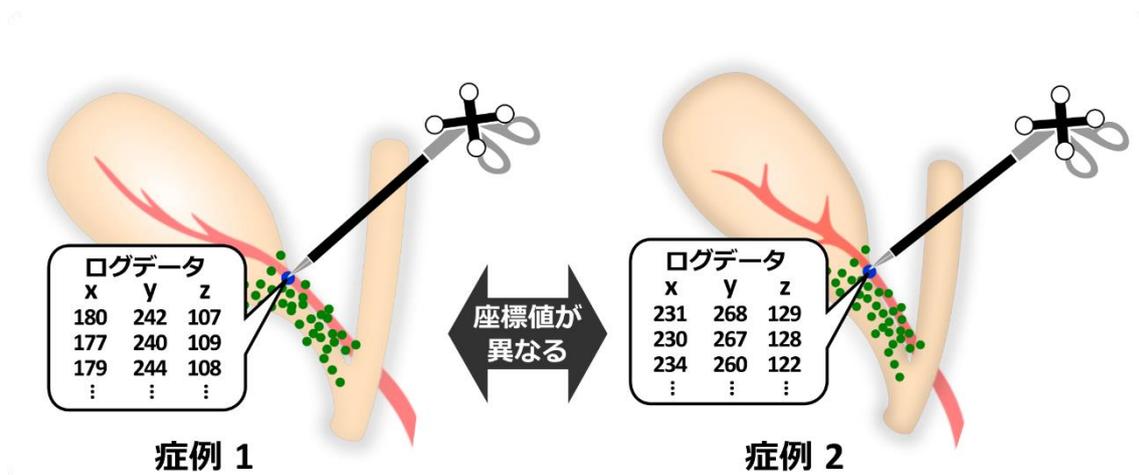


図 3.4 ログデータが示す座標値の違い

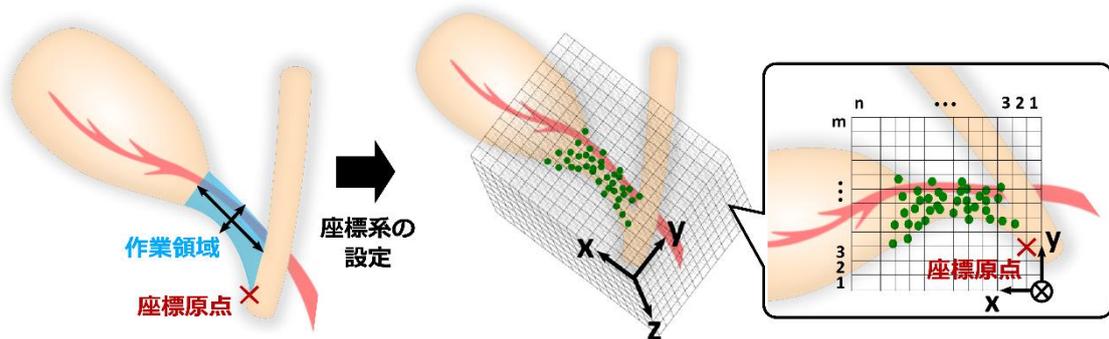


図 3.5 新規座標系の設定

作業領域の情報の取得については、ナビゲーションシステムに保有される医用画像情報を利用することで容易に行うことができるものである。これにより、症例ごとに医用画像の撮像環境や患者の個体差による計測条件の変動があったとしても、座標系が統一されたログデータ、すなわち患者の解剖部位に対する相対的な術具先端位置情報を取得することが可能となる。

次に、この新たにラベリングし直したログデータの座標値を基に手術プロセスモデル  $SPM_l$  を生成する。新規座標系で設定し直した右手術具及び左手術具の先端位置の座標値をそれぞれ  $L_{Li} = (x_{Li}, y_{Li}, z_{Li})$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $L_{Ri} = (x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri})$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) とすると、各術具の解剖学的相対位置情報から成る構成要素  $ac_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) を用いて手術プロセスモデル  $SPM_l$  は次式によって表される。

$$SPM_l = \langle ac_1, ac_2, \dots, ac_i, \dots, ac_n \rangle \quad (3.3)$$

$$ac_i = \{x_{Li}, y_{Li}, z_{Li}, x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}\} \quad (3.4)$$

以上の方法により生成される 2 種類の SPM は同じログデータから派生して生成されるため、 $SPM_t$  と  $SPM_l$  の中に含まれる構成要素のフレーム番号及びフレーム数は完全に一致する。したがって、例えば、症例 1 と 2 の手術によって生成された手術プロセスモデル  $SPM_t^{(1)}$  と  $SPM_t^{(2)}$  間の比較を想定した場合、まず  $SPM_l^{(1)}$  と  $SPM_l^{(2)}$  を利用して共通作業箇所の探索・対応付けさえできれば、 $SPM_l^{(1)}, SPM_l^{(2)}$  とそれぞれ同じフレーム番

号から成る  $SPM_t^{(1)}$ ,  $SPM_t^{(2)}$  間の対応付けも可能となり、同様の解剖部位を処置している際の術具操作情報の比較が達成される。そこで、次に異なる症例間での SPM を比較する際の SPM 構成要素の共通・類似箇所の探索及び対応付けの方法について述べる。

### 3.3 手術作業工程比較手法

SPM の比較を考えた場合に大きな課題として挙げられるのが、各 SPM の内容、すなわちそれらが持つ構成要素の数・並びの不一致である。一般に、手術時間が長くなればなるほど、SPM に含まれる構成要素も多くなっていくことから、SPM の内容は手術時間に応じて大きく変動する。したがって、同じ作業工程中の SPM であっても、手術ごとに SPM の内容は異なることから単純な比較は困難となる。そこで、本研究では SPM 間の比較を可能とするための手法について検討する。

また、手術作業工程を比較・評価する上では、まず比較するための基準、すなわち教師データをどう設定するかが重要となる。この教師データは見本となり得る技術を有する熟練医や指導医の手術手技を基に設定されることが多いが、卓越した技術を持つ熟練医同士であっても手術手技にバラつきは少なからず存在する。そのため、理想的にはより多くの熟練医の手術手技のデータの中から、さらに共通して見られることの多い手術手技を基に教師データを構築することが望ましいといえる。そこで、ここではさらに、熟練医による SPM データ群の中から共通箇所あるいは類似箇所を探索し、その共通・類似箇所に基づいて比較の基準となり得る教師データを作成することを考える。

まず SPM 間の共通箇所の探索及び対応付けを行う必要があるが、このように長さの異なる配列間の相互比較のために配列間で最もよく適合する形に配列を揃えることを考えた場合、動的時間伸縮法(Dynamic Time Warping; DTW)[70]あるいは配列アラインメント(Needleman-Wunsch; NW)[71]などのアルゴリズムが利用できる(図 3.6)。前者の

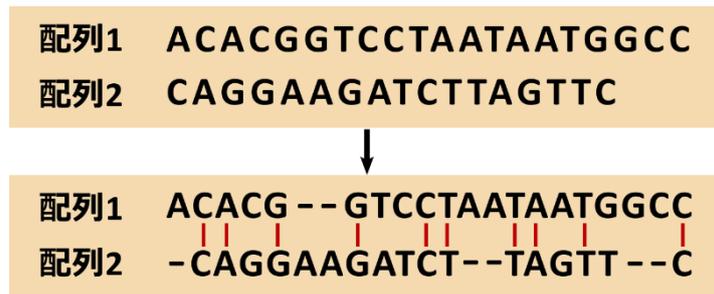


図 3.6 動的時間伸縮/配列アラインメントのイメージ

DTW は音声認識の分野において 2 つの音声信号間の類似箇所の照合のために発展した技術であり，一方後者の NW はバイオインフォマティクスの分野において複数のアミノ酸配列や DNA 配列間の相同性の検証のために利用される技術である．これら 2 つの技術は当該分野における先行関連研究の中でも応用されており，SPM の構成要素を最適に揃える目的にも利用可能であることが示唆されている [43,69].

DTW と NW はどちらも配列間の構成要素を比較し，配列間の類似度が最も高くなる組み合わせの並びになるように揃えるアルゴリズムである．ただし，この 2 つのアルゴリズムでは配列間の比較の際に生じる空白箇所の扱い方が異なる．例えば，要素数が異なる  $A = \langle a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n \rangle$  と  $B = \langle b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n \rangle$  の 2 つの配列間で各要素を比較する場合，一致：  $a_i = b_j$ ，不一致：  $a_i \neq b_j$ ，空白(ギャップ)：  $a_i = "-"$ ，  $b_i = "-"$ ，の 3 つのパターンが存在する．DTW と NW のアルゴリズムでは，各パターンにおけるスコアを定義することで，全列を比較した際の合計スコア(類似度)が最も高くなるような並びの探索が行われる．ただし，このときのスコア定義の仕方は，NW では 3 パターン全てにおけるスコア(例：一致 +2，不一致 -1，空白 -2)を定義するのに対し，DTW では空白以外の 2 つのパターンにおけるスコア(例：一致 +1，不一致 0)のみを定義して探索を行う．すなわち，DTW は空白を無視し，NW は空白にペナルティを設けるアルゴリズムである．SPM 間の比較を考えた場合，比較の際に生じる空白は手術時間の長さの違いに起因するものであるため，空白にペナルティを与える NW は手術時間の差を考慮したアルゴリズムであるといえる．本研究では手術時間の要素は考慮せずに術具

操作及び手術作業内容に関する比較評価を行いたいため、ここでは DTW を採用した。

前述の通り、DTW は長さの異なる 2 つの配列を最もよく適合するように揃える技術 (以下この技術をアラインメントと記述する) であるが、SPM における適合とは手術作業内容及び作業箇所の合致のことを指す。そこで、ここでは先に定義した患者の解剖部位に対する相対的な術具先端位置情報から成る手術プロセスモデル  $SPM_l$  に DTW を適用することで SPM 間のアラインメントを行う。長さ(構成要素数)の異なる 2 つの  $SPM_l$ ,  $SPM_l^{(1)} = \langle ac_1^{(1)}, ac_2^{(1)}, \dots, ac_i^{(1)}, \dots, ac_n^{(1)} \rangle$ ,  $SPM_l^{(2)} = \langle ac_1^{(2)}, ac_2^{(2)}, \dots, ac_j^{(2)}, \dots, ac_m^{(2)} \rangle$  間での DTW による配列アラインメントの概要を図 3.7 に示す。まず 2 つの SPM を行列に当てはめ、行列の左上から右下に向かってスコアを入力していく。DTW においては行列内の  $i$  行  $j$  列のスコア  $D_{i,j}$  は次式により決定される。

$$D_{i,j} = d(ac_i^{(1)}, ac_j^{(2)}) + \min \begin{cases} D_{i-1,j-1} \\ D_{i,j-1} \\ D_{i-1,j} \end{cases} \quad (3.1)$$

ここでの  $d(ac_i^{(1)}, ac_j^{(2)})$  は  $SPM_l^{(1)}$  と  $SPM_l^{(2)}$  の構成要素  $ac_i^{(1)}, ac_j^{(2)}$  間の距離(スコア)を表している。アミノ酸配列の記号のアラインメントのような問題では一致、不一致の際のスコアを定義すればよかったが、ここで比較する構成要素の情報は左手と右手の 2 つの術具の座標値  $((x_L, y_L, z_L), (x_R, y_R, z_R))$  であるため、構成要素間の距離  $d(ac_i^{(1)}, ac_j^{(2)})$  はユークリッド距離として次のように定義した。

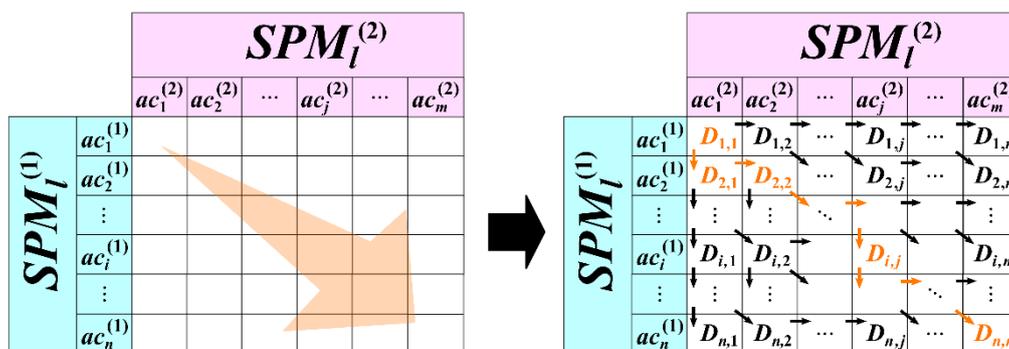


図 3.7 DTW による SPM のアラインメント概要

$$d(ac_i^{(1)}, ac_j^{(2)}) = \sqrt{(x_{Li}^{(1)} - x_{Lj}^{(2)})^2 + (y_{Li}^{(1)} - y_{Lj}^{(2)})^2 + (z_{Li}^{(1)} - z_{Lj}^{(2)})^2} \\ + \sqrt{(x_{Ri}^{(1)} - x_{Rj}^{(2)})^2 + (y_{Ri}^{(1)} - y_{Rj}^{(2)})^2 + (z_{Ri}^{(1)} - z_{Rj}^{(2)})^2} \quad (3.2)$$

このスコア入力を行列の右下角のセルまで行ったときに得られるスコアが 2 つの SPM 間のアラインメントにおける最小スコアとなる．ここまで終了したら次はトレースバックと呼ばれる処理により，左上から右下のセルまでスコアを入力した際の経路(最小コストパス)を遡り復元することで，長さが揃えられた SPM を得る．

これにより，例えば，熟練医等の見本となる特定の術者の SPM との 1 対 1 の対応付け及び比較は可能となるが，一般に，手術手技において同じく上手いと評される技術を持った熟練医同士においても少なからず手技の特徴に違いがあることが予想される．また，熟練医が常に最良のパフォーマンスを発揮するとも限らないため，より適切な形で SPM の比較を行うためには，熟練医の SPM データ群の中から標準化された SPM と比較することが好ましいといえる．ただし，DTW のアルゴリズムは基本的に 2 つの配列間のアラインメントしか行うことができない．そこで，本研究では，DTW のアルゴリズムをベースとして 3 つ以上の配列間のアラインメントに対応し，かつその配列群から平均化した配列の算出を行えるように拡張した DTW barycenter averaging (DBA) [72] と呼ばれるアルゴリズムを利用する．DBA のアルゴリズムの概要について図 3.8 に図示する．DBA による SPM データセットのアラインメント及び平均化は以下の 4 つのステップから成る．

Step 1: 任意の  $spm_r = \langle ac_1, \dots, ac_k, \dots, ac_l \rangle$  を初期参照 SPM として設定

Step 2: DTW を用いたデータセット内の各 SPM と参照 SPM とのアラインメントにより最小コストパスをそれぞれ算出

Step 3: 次式に基づき，参照 SPM に対してアラインメントにより長さを揃えられた SPM のデータセットを用いて各アクティビティの重心  $b_k$  を算出

$$b_k = \frac{(ac_k^{(1)} + ac_k^{(2)} + \dots + ac_k^{(N)})}{N} \quad (3.3)$$

※ $N$ はデータセット内に含まれる SPM の数

Step 4: 最小コストパスが収束するまで, Step 3 で求めた各アクティビティの重心から成る SPM の配列  $spm_b = (b_1, \dots, b_k, \dots, b_l)$  を参照 SPM  $spm_r$  に設定し直し, Step 2 と 3 を繰り返し実施

各 SPM は Step 2 で参照 SPM とのアラインメントを行い, 参照 SPM のアクティビティと一致するアクティビティを配列することにより求められるため, 参照 SPM と完全に同じ長さで統一される. そのため, 初期参照 SPM のアクティビティ数が少ないと, Step 2 でのアラインメントの際に, 各 SPM 内のアクティビティが失われ, 重要な作業情報がそぎ落とされてしまう可能性があるため, ここでは SPM のデータセットの中で最もアクティビティ数の多かった SPM を初期参照 SPM として設定することとした.

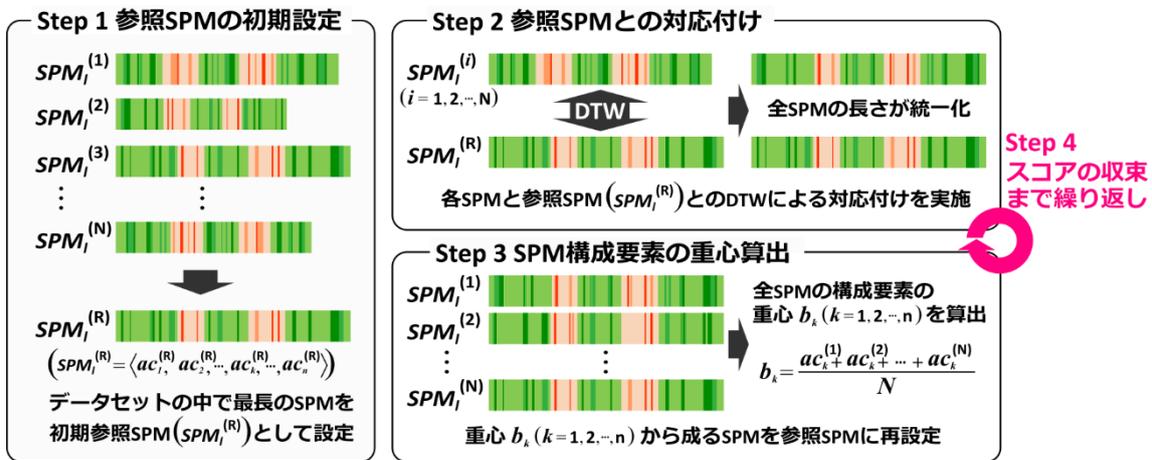


図 3.8 DBA アルゴリズムの概要

以上の手順をまずは解剖学的相対術具位置情報から成る  $SPM_t$  のデータセットに適用してアラインメントを実施し, そのアラインメントの配置を時系列分析指標から成る  $SPM_t$  にも適用する. こうして得られる, 構成要素数が統一された  $SPM_t$  のデータセットの中から熟練医群の  $SPM_t$  データセットのみを用いて, 上記 Step 3 の処理により, 各

構成要素の重心から成る SPM の配列  $SPM_t^{(Expert)} = \langle b_1, \dots, b_k, \dots, b_l \rangle$  を求める. このとき得られる SPM の配列  $SPM_t^{(Expert)}$  は利用可能な熟練医群のデータ全てを加味した上で生成される SPM であることから, この  $SPM_t^{(Expert)}$  を手術作業工程の比較評価を行う上での教師データとなる SPM として採用する. そして,  $SPM_t^{(Expert)}$  の時系列データの分析指標との比較を実施し, 定量的にその差分が大きい箇所を示すことで手術作業工程中における課題を特定する.

## 第4章 総合的手術技量の定量化手法

### 4.1 はじめに

前章では術者が手術をどのようにして行っているのかを術具操作情報レベルで形式化・モデル化することで詳細に表現・比較する手法について提案したが、ここではさらに2.3節で定義したクロス・セクションデータとして表される分析指標を組み合わせて用いることで総合的手術技量を定量的に示す手法について検討する。

手術技量の定量化及びスコアリングは、術者が現在の自分の技術到達度や立ち位置を把握することを可能にし、術者の効果的な技能向上を図る上で重要な技術習得のモチベーションの維持・向上につながるとされ、活発に検討されている項目の一つである。近年では機械学習手法の発展に伴い、術者の技能レベルの推定・分類・評価などへの機械学習手法の応用も積極的に検討されてきているが、ブラックボックス化、つまり技量値の推定あるいは技量レベルの分類に何の要素が大きく影響したのかなどの分析の過程及び結果の根拠に当たる部分が不明瞭化されてしまう点が指摘されている [30]。

そこで、本章では総合的な手術技量の定量化を図ると共に、手術の良し悪しを決定づける要素は何かという明確な科学的根拠をもたらすための技術構築を目指す。

### 4.2 重回帰分析による総合的手術技量値の算出法

術者の技量を数値化し、また術者の技量を推し量る上で有効な分析指標は何であるかをブラックボックス化させることなく明確に示すという目的を考えた場合に、有効な手法として挙げられるのが重回帰分析である。重回帰分析とはある変数(目的変数)の変化が他の複数の変数(説明変数)の変化から影響を受けている場合に、その説明変数と目的変数の関係性を分析及び評価する統計手法である [73]。したがって、説明変数をクロス・

セクションデータとして得られる分析指標、目的変数を術者の技量として定義することができれば、重回帰分析を利用することにより、①各手術作業工程に応じた術者の技量を算出する回帰モデルの生成、②各手術作業工程において術者の技量に対する各分析指標の重要度(影響度)の定量化、の2点を達成することが可能となる。ただし、重回帰分析では、既知のデータ群から成るトレーニングデータを基に、いわゆる教師あり学習を経て回帰モデルを構築することから、術者の技量を定量的に表す目的変数をどのように定義し算出するかが大きな課題となる。ここで定義すべき術者の技量を表す目的変数は、説明変数であるクロス・セクションデータの分析指標と関連性のある変数であると同時に、これらの分析指標とは別のプロセスで得られる独立した変数であることが好ましいと考えられる。そこで、本研究ではさらに、患者の解剖部位と術具操作の関係性に着目し、クロス・セクションデータとは異なる方法で目的変数を生成・利用することを考える。以下に具体的な目的変数の定義及び作成法と重回帰分析手順について述べる。

#### 4.2.1 目的変数の定義及び生成法

内視鏡下手術のような特殊な技術を習得する場合、熟練者のやり方を模倣することが極めて有効であるということを考慮すると、技量値に当たる目的変数は見本となる医師との類似度を表すような尺度であることが望ましいと考えられる。そこで、ここでは患者の解剖空間内に設定した座標系を利用し、各解剖位置でどのように術具を操作すべきかを表す「教師データマップ」を作成・利用することで熟練医との類似度となる尺度を獲得する手法について提案する(図 4.1)。

先述のように、熟練医と呼ばれる医師間でも手術手技にはバラつきがあること、そして臨床環境下では手術作業工程の変動が大きいことがこうした尺度を作成する際の大きな障壁となっている。例えば、手術作業推移の類似性を尺度として利用しようとした場合、臨床環境下では術者のその場の状況判断に応じて、作業の進め方は度々変動する

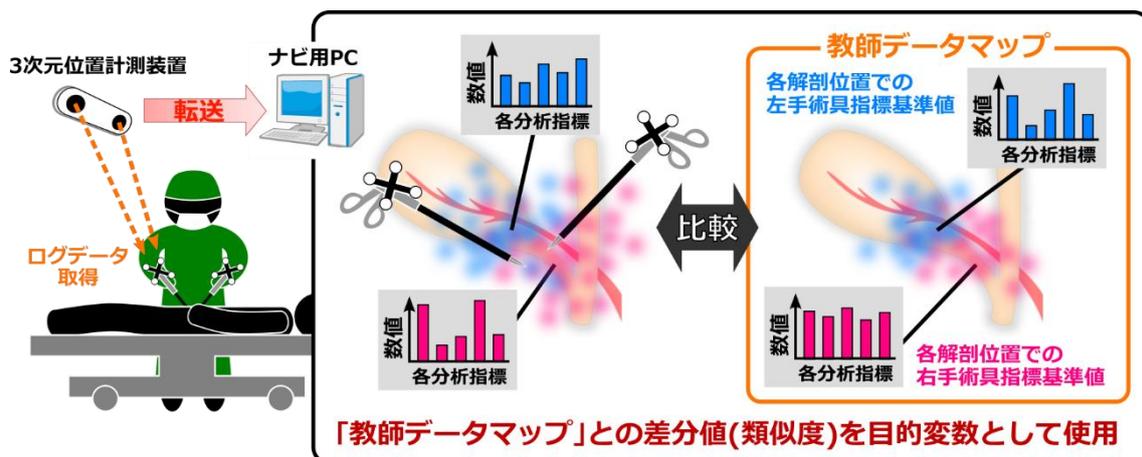


図 4.1 目的変数生成法のコンセプト図

ことが予想される。また、同じ解剖部位に対して同じ処置を行う場合であっても、その部位に対し上から作業を進める場合もあれば、下から作業を進める場合もあり得ることから、作業推移のように順番や順序に依存する情報を比較することで技量値を表現するための類似度尺度を得ることは極めて難しいといえる。

そのため、こうした順番や順序の影響が少ない要素から類似度尺度を求めることが望ましいと考えられる。そこで、ここでは患者の解剖部位と作業の関係性に着目し、類似度尺度を求める方法を考える。先に述べたように、同じ作業工程であっても解剖部位に対する作業の進め方及び作業の開始点と終了点にはバラつきがあると考えられるが、解剖部位に対する術具操作に関しては大きなバラつきはないことが予想される。すなわち、術具操作の特徴はその作業を行う際の解剖部位に大きく依存すると考えられることから、同じ作業工程中であれば、解剖部位に対してどの方向からアプローチしたとしても、その解剖部位に対する処置の仕方や術具の扱い方が大きく変動することはないと考えられる。そこで、ここでは手術中の作業手順や推移は考慮せず、単純に各解剖位置で計測及び定量化された熟練医の時系列データによる分析指標値を集約し、各解剖位置において基準となる分析指標値、すなわち教師データをマップ化することを考える。この各解剖位置における分析指標の基準値のマップをここでは「教師データマップ」と呼ぶこ

ととする．図 4.2 に教師データマップの作成概要図を示す．3.2 節で定義した 2 種類の手術プロセスモデル  $SPM_l$  と  $SPM_t$  を利用することで，手術作業工程中に術具先端が通過した各解剖位置とその際に行われた術具操作の時系列分析指標を得ることができることから，熟練医の各解剖位置での分析指標値を蓄積する．そして，各解剖位置のブロックごとに各指標の外れ値除去(平均値 $\pm 1.96$ ×標準偏差の範囲外を除外)と平均化を行うことで指標基準値を算出し，教師データマップを作成する．これにより，SPM 内の構成要素の順序に関係なく，術具先端が通過した解剖位置ごとに指標基準値と比較し，熟練医との術具操作の差を定量化することが可能になることから，より臨床環境下に適したロバストな評価が可能になると考えられる．

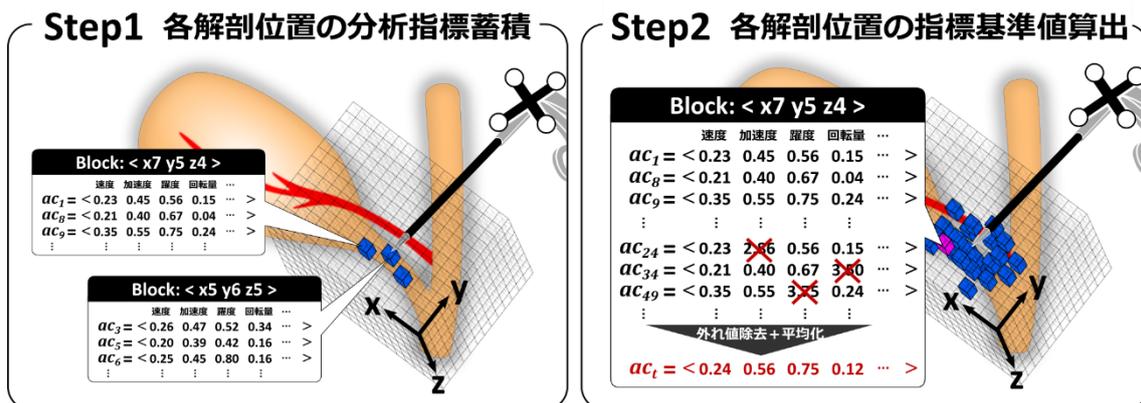


図 4.2 教師データマップの作成概要図

ここでは，教師データマップの指標基準値と評価対象者の  $SPM_t$  の各分析指標を比較した際に得られる値，すなわち教師データとの類似性といえる数値を目的変数として定義・生成する．まず，教師データマップ内及び  $SPM_t$  内の構成要素が持つ時系列データの分析指標はそれぞれ単位が大きく異なるため，単位の違いによる影響を取り除くために，各分析指標  $(v_i, a_i, \dots, h_i)$  を次式により平均 0，標準偏差 1 となるように正規化する．

$$z_{vi} = \frac{v_i - \bar{v}_l}{S_{vi}}, z_{ai} = \frac{a_i - \bar{a}_l}{S_{ai}}, \dots, z_{hi} = \frac{h_i - \bar{h}_l}{S_{hi}} \quad (4.1)$$

$\bar{v}_i, \bar{a}_i, \dots, \bar{h}_i$  は各指標の平均値,  $s_{vi}, s_{ai}, \dots, s_{hi}$  は各指標の標準偏差,  $z_{vi}, z_{ai}, \dots, z_{hi}$  は正規化された各指標を表す. 本研究では, 熟練医群のデータセットから正規化された分析指標を基に生成した教師データマップの各解剖位置の指標基準値と評価対象者の  $SPM_t$  の分析指標の差分の平均値を合計したスコアを目的変数として用いる(図 4.3). したがって, 教師データマップの各指標基準値を  $ac^{(T)} = \langle z_v^{(T)}, z_a^{(T)}, \dots, z_h^{(T)} \rangle$  とすると, 各解剖位置において評価対象者と比較した際の類似度スコア  $d_j(ac_i, ac^{(T)})$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), 及びこの各解剖位置の類似度スコアを集計して平均化することで得られる最終的な技量値(目的変数)  $S$  は次式によって表される.

$$d_j(ac_i, ac^{(T)}) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{vi} - z_v^{(T)}| + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{ai} - z_a^{(T)}| + \dots + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |z_{hi} - z_h^{(T)}| \quad (4.2)$$

$$S = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N d_j \quad (4.3)$$

$N$  は各解剖位置で指標基準値と比較することで得られた類似度スコアの数を表す. なお, ここで目的変数として定義した値は, 教師データマップの基準値と  $SPM_t$  の分析指標間の類似度が高ければ高いほど低い値となるため, 目的変数の値が小さいほど熟練医群の術具操作と類似していることを意味する.

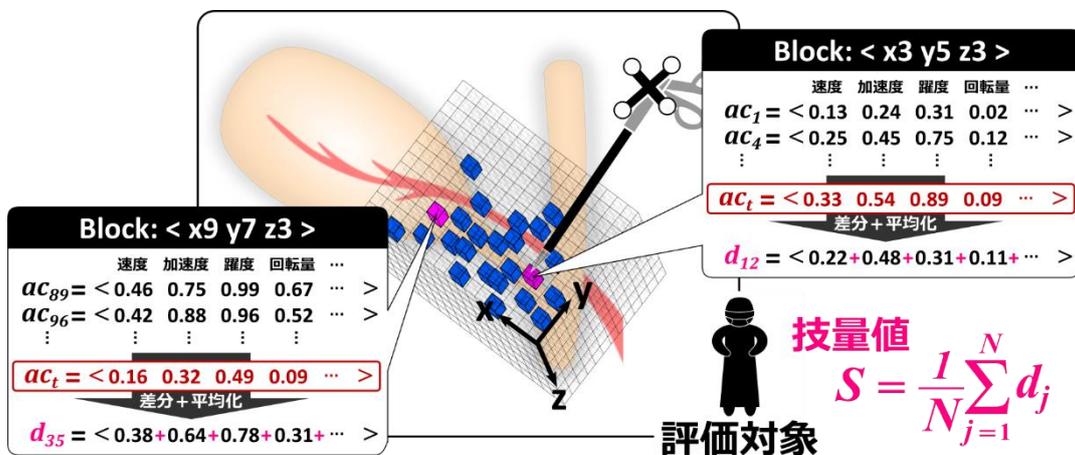


図 4.3 技量値(目的変数)算出の概要

#### 4.2.2 回帰モデルの構築法

上述の  $S$  を目的変数  $y$ , 表 2.2 で定義したクロス・セクションデータのうち対象術式において算出可能な分析指標を説明変数  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) として回帰モデルを構築する. 重回帰分析においては回帰モデルとして非線形モデルを用いることで目的変数の算出精度がより高いモデルを構築できる可能性が考えられる. ただし, ここでの目的は術者の技量を算出することと, 何の手技要素が技量に大きく関わっているのかを表す各分析指標の重要度についてより明確に理解しやすい形で定量化することであるため, 本研究では次式により表されるシンプルな線形回帰モデルを利用する.

$$y = B_0 + B_1x_1 + B_2x_2 + \dots + B_px_p \quad (4.4)$$

線形回帰モデルではこの(4.4)式で表される線形方程式をベースとして, トレーニングデータセットの教授データに適合するように, 定数項  $B_0$  と偏回帰係数と呼ばれる係数  $B_1, B_2, \dots, B_p$  を求めることで得られる [74]. 得られた回帰モデルにおける各説明変数の係数は目的変数への影響の大きさを反映することから, この係数を参照することで, 各分析指標が技量に与える影響度を定量的に判断することができると考えられる. ただし, 目的変数  $y$  に対する各説明変数の寄与量は  $B_ix_i$  によって決まり, 偏回帰係数の大きさは説明変数の単位に依存する. そのため, (4.1)式で時系列データの分析指標に施した際と同様, 平均値 0, 標準偏差 1 となるように各説明変数を正規化した後に重回帰分析を行うことで得られる標準偏回帰係数  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  を技量に与える影響度として参照する.

最後に回帰モデルに潜在する多重共線性を除外し, 説明変数を選択し直すことで回帰モデルの再構築を行う. 多重共線性とは, 説明変数間で強い相関関係を持った変数が含まれる場合などに回帰モデルの各係数の推定値が不安定になる状態のことを指す. そのため, 多重共線性が生じると回帰モデルの信頼性は低下するため, 多重共線性の検出・除外が必要となる. この多重共線性を示す絶対的な基準は存在しないが, 本研究では多重共線性を検出する基準の統一を図るために, 次の 3 つの判断基準を採用した.

- I. 説明変数  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) の中に相関関係がかなり強いと考えられる絶対値 0.7 以上の相関を持つ説明変数ペアが存在する
- II. 目的変数  $y$  と説明変数  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) の単相関係数の符号と偏回帰係数  $B_i$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ) の係数の符号が一致しない
- III. 多重共線性の有無を調べる尺度として利用可能な分散拡大要因(Variance inflation factor; VIF)と呼ばれる指標が 10 より大きい値を示している [75]

多重共線性が検出された際の処置としては、多重共線関係にある変数の一部を回帰から除去する、あるいは多重共線関係にある変数の平均化や主成分分析によりデータの集約を図る、という大きく分けて2つの処置が考えられるが、後者の場合には元々の分析指標が表す作業要素の意味が変わるもしくは失われる可能性がある。本研究では、技量に影響を及ぼす分析指標とその影響度合いを明確に示すことを目的としているため、ここでは前者の多重共線関係にある変数の一部を回帰から除去するという処置を行う。以上の点を踏まえ、上記のI~IIIの基準を同時に満たす説明変数が複数存在する場合には、目的変数に対する相関が低い方の説明変数を除外した上で重回帰分析を実施し、回帰モデルを再構築する。

以上の手順により得られた回帰モデルを利用することによって各手術作業工程において技量への影響力の大きい作業特徴を定量的に示すと同時に術者の技量についても定量的に算出する。

## 第5章 検証評価

### 5.1 はじめに

ここまで筆者が修士までに検討した研究を通じて得られた新たな検討課題として、(i) 汎用性の向上、(ii) ロバスト性の向上という2つの要素に着想を得て、より発展した手術作業工程の分析・評価手法について検討・提案してきた。第2章では汎用性の向上を考慮した分析指標の設計、第3章では臨床の手術環境・患者の個体差による計測・分析の変動に対応した手術作業工程の比較評価手法、第4章では術者の包括的な技量値の算出手法についてそれぞれ述べてきた。本章ではこれらの手法の検証として2種類の内視鏡下手術の術式を設定し、模擬手術実験環境下と臨床環境下において手術作業工程解析実験を実施した。実験を通じてナビゲーションシステムにより得られた手術中の術具操作情報と医用画像情報から成るデータセットを基に、各分析手法の目的に応じた要素技術の構築が可能であるかどうかについて検証を行った。

### 5.2 検証用データセット

多様な内視鏡下手術の術式への適用性の向上を目指す本手法の検証として、本研究ではこれまで筆者が対象術式としてきた腹腔鏡下胆嚢摘出術に加え、新たに内視鏡下副鼻腔手術を対象術式として選定し、構築した手法の評価を行った。まず本節では、それぞれの対象術式において、対象術式として選定に至った理由、対象とする手術作業工程の定義、計測環境及び検証に使用したデータセットについて述べていく。

### 5.2.1 腹腔鏡下胆嚢摘出術

#### ◆ 選定理由

胆嚢摘出術は機能低下によって胆石症や胆嚢炎等を発症した胆嚢を摘出する術式であり、前述の通り、腹腔鏡下胆嚢摘出術(Laparoscopic Cholecystectomy; LC)は初めて実施された内視鏡下手術とされ、最も一般的な内視鏡下手術として認識されている。日本内視鏡外科学会の調査 [2]によると、1990年代後半以降、LCは毎年約20,000例またはそれ以上の症例数実施されている。2013年の統計では、腹部外科領域の腹腔鏡下手術症例数81,724例のうち約35%に当たる27,809例がLCであり、手術の適応領域が拡大・多様化している現在もなお、腹部外科領域で実施された内視鏡下手術の中で多い割合を占めている(図5.1(a))。また、胆嚢摘出術は同じく1990年代後半以降、全症例の約80%が腹腔鏡下で実施されていることから、LCは標準的に確立された術式であるといえる(図5.1(b))。ただし、同調査によれば、術中・術後に開腹止血を要した例、胆管損傷・胆管狭窄や消化管・血管等の多臓器損傷が発生した例が毎年一定数報告されており、確立された術式であるとはいえ、手術作業工程解析を行う意義は大きいと考えられる。

腹腔鏡下胆嚢摘出術は症例及び術者による手術作業工程の変動が少ないため、先行関

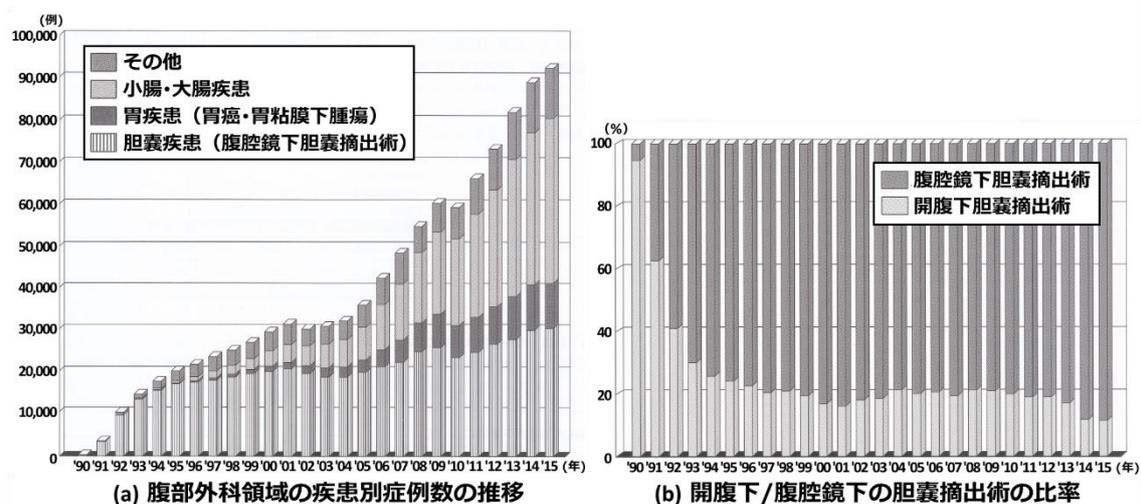


図 5.1 胆嚢摘出術の施行状況 [2]

連研究の中でも解析対象として選択される頻度は高く，作業工程解析が適用できる可能性を持った術式であるということが報告されている．そこで，本研究では LC を提案手法の基礎検証のための対象術式の一つとして選択した．

◆ 手術作業工程の分類・定義

LC の主な手術作業工程 [76] と胆嚢の解剖図を図 5.2 に示す．LC の手術作業は一般的にはトロカー挿入から閉腹・閉創までの一連の流れを含むが，日本内視鏡外科学会の調査 [2] によれば，術中・術後に開腹止血を要した例の大部分が胆嚢動脈や胆嚢床(胆嚢と肝臓の接着部)における出血であったことを考慮すると，図中の赤枠で囲った II. 腹腔鏡下操作の作業が手術の質を大きく左右すると考えられる．そこで，本研究では II の部分における手術作業を検証の対象とする．

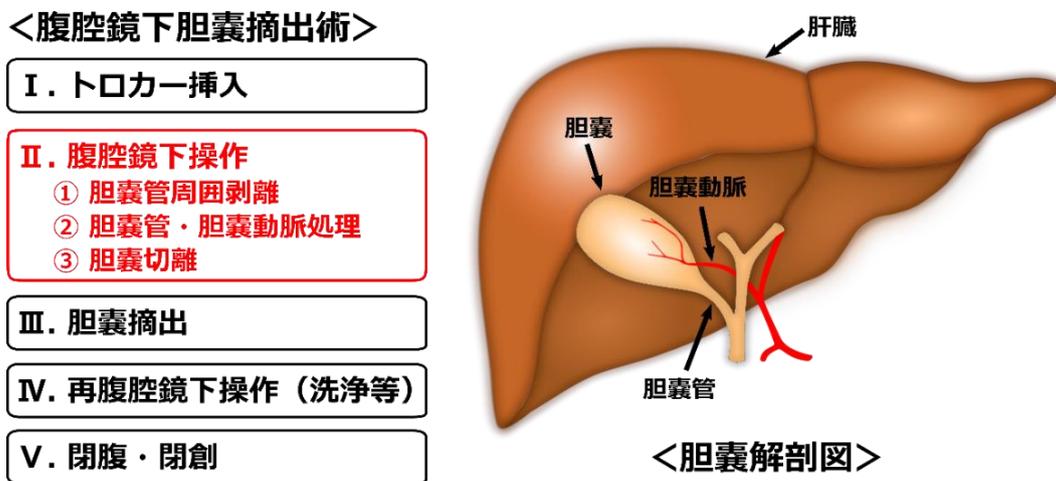


図 5.2 腹腔鏡下胆嚢摘出術の一般的な手術作業工程の流れと胆嚢解剖

また，より詳細な分析を図るため，II の手術作業の中で作業内容に応じて手術作業工程を分類し，工程ごとに分析・評価を行う．LC では手術作業内容と使用術具に強い相関があるとされているため [36]，本研究では術具が切り替わるポイントに着目して手術作業工程を分類・定義した．表 5.1 と図 5.3 に本研究における工程分類の定義と手術の流れについて図示したものをそれぞれ示す．胆嚢摘出術では，まず胆嚢管あるいは胆嚢動

脈周囲の組織の剥離が行われ、それぞれ露出されたところでクリッピングと切離が行われる。図 5.3 では、Stage 1 にて胆嚢管が先に剥離・露出されているが、胆嚢管と胆嚢動脈の処理の順番は胆嚢動脈の走行状況等に応じて変動する可能性がある。ただし、基本的に胆嚢管と胆嚢動脈の処理はどちらを先に行っても作業工程上問題はないことから、ここでは処理の順番を固定せず、Stage 1, 2 を胆嚢管または胆嚢動脈の剥離・クリッピング、Stage 3, 4 をもう一方の残りの管の剥離・クリッピングと定義した。Stage 5 に関しては胆嚢と肝臓の接着面(胆嚢床)を完全に切り離すまでとし、切り離した胆嚢を腹壁外に摘出する部分は考慮しないものとした。

また、計測術具に関しては、右手が剥離鉗子、鉗鉗子、クリップアプライヤー、左手が把持鉗子となっている(表 5.1)。実際の手術では剥離作業の際、これらの術具に加え、電気メス等のエネルギーデバイスが利用されているが、後述の実験環境においてはエネルギーデバイスを使用することができない。そのため、実際の手術環境とは異なるが、本実験では剥離鉗子あるいは鉗鉗子を用いて剥離作業を実施することとした。

表 5.1 腹腔鏡下胆嚢摘出術の工程分類の定義

工程	内容	計測術具	
		右手	左手
Stage 1	胆嚢管または胆嚢動脈の剥離	剥離鉗子, 鉗鉗子	
Stage 2	前工程で剥離した管のクリッピング	クリップアプライヤー	
Stage 3	前工程でクリップした管の切離, 残りの管の剥離	剥離鉗子, 鉗鉗子	把持鉗子
Stage 4	前工程で剥離した管のクリッピング	クリップアプライヤー	
Stage 5	前工程でクリップした管の切離, 胆嚢床の剥離	剥離鉗子, 鉗鉗子	

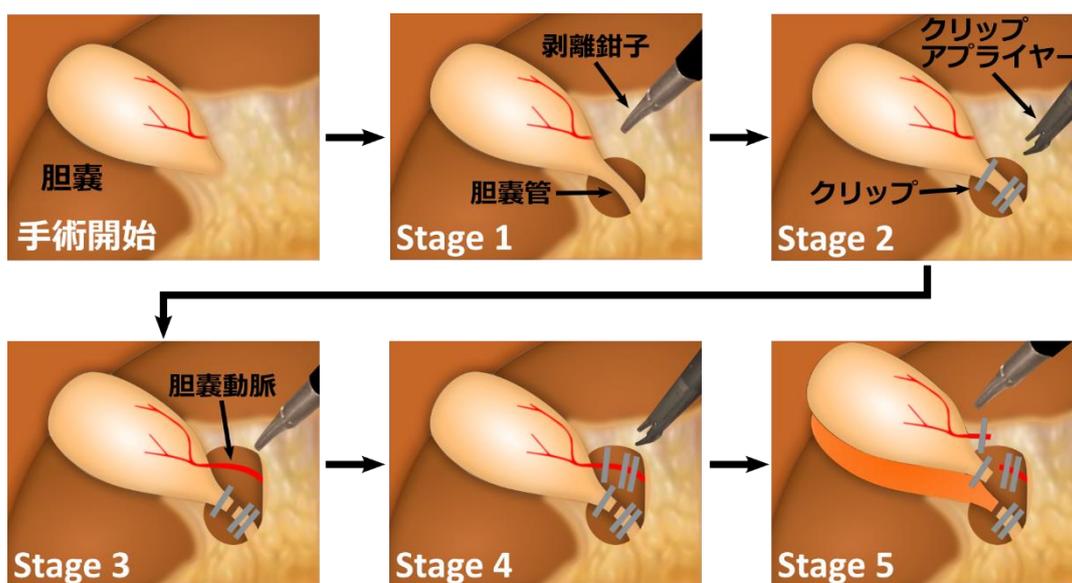


図 5.3 本研究で定義した腹腔鏡下胆嚢摘出術の作業工程の流れ

#### ◆ 計測環境

本研究は臨床症例を対象とした手術作業工程解析を目的としているが、現状ではまだ腹部外科領域でのナビゲーションシステムは発展途上にあるため、ここでは基礎検証評価として、胆嚢の実体モデルを用いた模擬手術実験環境下での LC による手術作業工程解析実験を実施した。図 5.4 と図 5.5 に実験環境と実験に使用した胆嚢モデルを示す。本研究では、LC における一連の胆嚢摘出工程の訓練用に市販されている胆嚢の実体モデル(Gallbladder with normal anatomy, Limbs & Things Ltd.)と Box トレーナ(MATT trainer, Limbs & Things Ltd.)が使用された。ただし、この胆嚢モデルではエネルギーデバイスが使用できないため、先述のようにエネルギーデバイスを除く 4 種類の術具にマーカを装着して計測を行った。実際の手術環境ではスコピストの技術が術者の手技に影響することが考えられるが、本研究では内視鏡を固定することでこうした外的要因による影響を排除して実験を実施した。現在市販されているナビゲーションシステムでは、主に光学式と磁気式の 3 次元位置計測装置が使用されているが、本研究ではより実際の手術現場での使用頻度が高い光学式の計測装置を使用した。ただし、光学式の計測装置の場合、マーカの遮蔽や術具の回転によりデータの欠落が生じる可能性がある。そこで、本研究

では基礎検証として、なるべくデータの損失を抑えた上で提案手法を評価するため、光学式の3次元位置計測装置(Polaris Vicra, Northern Digital Inc.)及びそれに接続するナビゲーション用PCを2台ずつ使用し、マーカの認識範囲を拡張させて計測を行った。なお、本研究ではX線CT(Aquilion16, 東芝メディカルシステムズ)による術前医用画像ベースのナビゲーションシステムを使用した。このシステムでは手術中の体腔内臓器の移動・変形に対応することは難しいため、本実験は胆嚢モデルを固定した上で実施された。また、本研究はナビゲーションシステムによる画像誘導には主眼を置いていないため、実験中、ナビゲーション画面による術者への情報提示は行わなかった。

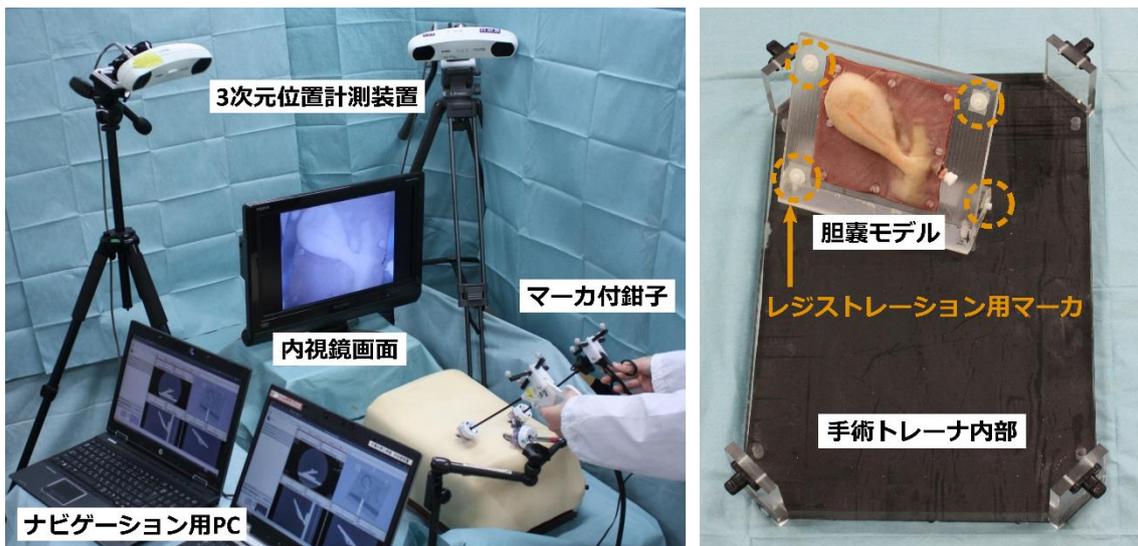


図 5.4 腹腔鏡下胆嚢摘出術における手術作業工程解析実験の環境

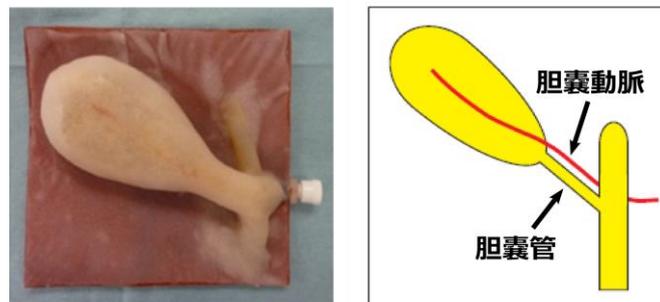


図 5.5 胆嚢モデル

図 5.6 に本研究で使用したナビゲーションシステムにおける計測システムの構成及び実空間と医用画像空間の位置合わせのための座標変換の流れを示す。具体的には以下のようにして実験前に座標変換を実施した。なお、ここでは A の座標系を B の座標系へ変換する変換行列を  ${}^A_B T$  と表記している。

まず 3 次元位置計測装置は計測範囲内にある術具マーカの座標系( $\Sigma_{Tool}$ )から計測装置の座標系( $\Sigma_P$ )への変換行列  ${}^{Tool}_P T$  を取得する。このとき、事前にキャリブレーション(術具マーカ座標系に対する術具先端位置の登録( ${}^{Tip}_{Tool} T$ ))をしておけば、計測装置により  ${}^{Tip}_P T (= {}^{Tip}_{Tool} T \cdot {}^{Tool}_P T)$  を取得することが可能となるため、本研究では図 5.7 に示すようなキャリブレーションツールを用いることで、各計測術具の先端位置登録( ${}^{Tip}_{Tool} T$ )を実験前に実施した。ここでは計測装置を 2 台用いているため、各計測装置はそれぞれの座標系( $\Sigma_{P1}, \Sigma_{P2}$ )に基づき、 ${}^{Tip}_{P1} T, {}^{Tip}_{P2} T$  を取得することになる。そこで、この 2 台の計測装置の座標系を統一するため、計測装置 1, 2 の計測範囲内に共通のリファレンスマーカを設置し、各計測装置の座標系( $\Sigma_{P1}, \Sigma_{P2}$ )をリファレンスマーカ座標系( $\Sigma_R$ )に変換し、 ${}^{Tip}_R T (= {}^{P1}_R T \cdot {}^{Tip}_{P1} T = {}^{P2}_R T \cdot {}^{Tip}_{P2} T)$  を求めることで座標系の統合を図っている。最後にレジストレーションによりリファレンスマーカ座標系( $\Sigma_R$ )から医用画像座標系( $\Sigma_{Image}$ )への変換行列  ${}^{Image}_R T$  を求め、次式に基づき変換行列  ${}^{Tip}_{Image} T$  を導出することで、医用画像上での術具の位置姿勢情報を含有するログデータを 2 台の計測装置から取得している。

$${}^{Tip}_{Image} T = {}^{Tip}_{Tool} T \cdot {}^{Tool}_{P1} T \cdot {}^{P1}_R T \cdot {}^{Image}_R T = {}^{Tip}_{Tool} T \cdot {}^{Tool}_{P2} T \cdot {}^{P2}_R T \cdot {}^{Image}_R T \quad (5.1)$$

なお、レジストレーションに関しては、図 5.4 に示すレジストレーション用マーカを基準点とし、レジストレーションツール(4-Marker Passive Probe, Northern Digital Inc.)により得られた実空間上(リファレンスマーカ座標系( $\Sigma_R$ ))の点群と医用画像処理ソフトウェア(3D Slicer, Brigham and Women's Hospital)により得られた医用画像空間上(医用画像座標系( $\Sigma_{Image}$ ))の点群間でポイントベースのレジストレーション [77]を行うことで上記の  ${}^{Image}_R T$  を求めた。このとき、レジストレーションエラー(Fiducial Registration Error;

FRE)に関しては1 mm 以下になるように設定されたが、情報取得時の術具先端位置における医用画像上と実空間上の誤差(Target Registration Error; TRE)に関しては最大で約 3 mm 程度の誤差が確認されている。

最終的に、本実験では計測装置 1 を主計測装置、もう一方の計測装置 2 を副計測装置とし、計測装置 1 の計測範囲を外れた術具を計測装置 2 が計測できていた場合に計測装置 2 のデータを用いて欠落を補間する、という手順を経てデータの統合を行った。

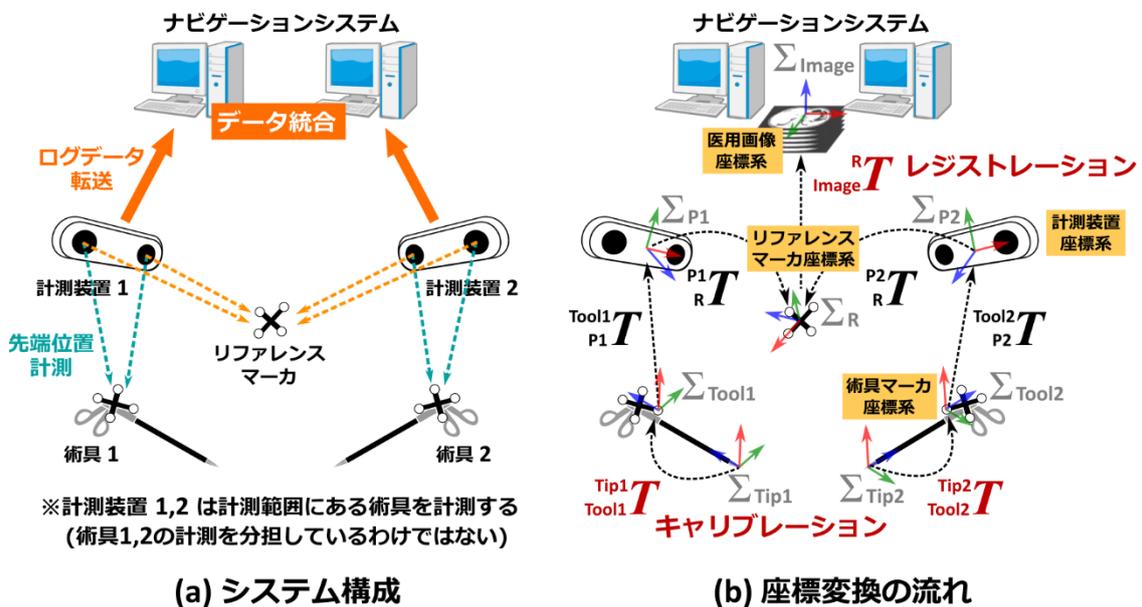


図 5.6 ナビゲーションシステム概要

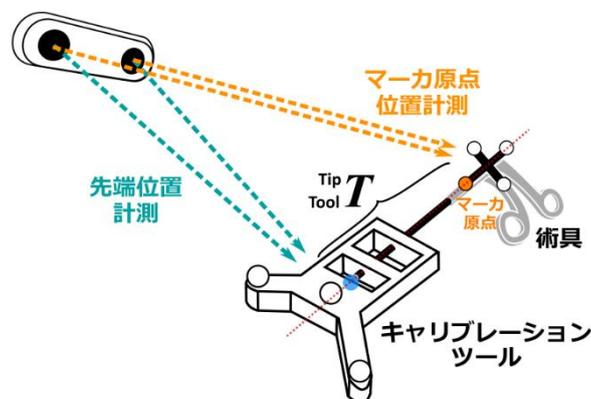


図 5.7 キャリブレーション方法概要

#### ◆ データセット

表 5.2 に LC の模擬手術実験におけるデータリストを示す。被験者は LC 経験のある外科医 30 名とし、上記実験環境下での計 45 例の LC に対して提案手法による解析が行われた。ただし、全 45 例のうち、表中 x の文字が示してある 20 例は右手術具操作のみの計測が行われたものである。一般に、術者の熟練度は経験年数に比例するものの、特殊かつ複雑な技能を必要とする内視鏡下手術のような手術の場合には特に技能習熟に個人差があることから、どの程度経験年数を積みば Expert として判断できるかという明確な基準は存在しない。先行関連研究 [26] では経験年数や経験症例数に応じて Expert 群、Intermediate (Resident) 群、Novice 群の 3 群に分類・定義することで評価検証を行っているものも見受けられるが、特に技能習熟の途上に位置する Intermediate (Resident) 群では結果のバラつきが大きくなり、正確な検証の妨げになることが起こり得る。そこで、ここではより明確に熟練医と非熟練医の特徴の差を明らかにするために、腹腔鏡下手術の経験年数及び日本内視鏡外科学会技術認定制度における技術認定の資格の有無を考慮して、各被験者を Expert 群と Non-expert 群の単純な 2 群に分類した。十分な実地経験と技能を有すると考えられる腹腔鏡下手術経験年数 10 年以上の術者を Expert とすることを基本とした。被験者 J に関してのみ例外的に経験年数 10 年未満ではあったものの、実験実施時に既に技術認定医の資格を有していたことから Expert として定義した。各熟練度群の被験者の数と実験データ数はそれぞれ、Expert 群 10 名(n=19)、Non-expert 群 20 名(n=26)である。Expert 群と Non-expert 群において Stage 1~5 の模擬手術作業工程を行うのに要した平均手術時間はそれぞれ 14 分 23 秒と 28 分 19 秒であった。各被験者の実験回数の配分に関しては統一されていないが、複数回実施した被験者に関してはラーニングカーブ等の影響が出ないように同日に 3 例以上連続で行うことは避け、それ以上実施する場合には別の日に改めて行うように設定した。

表 5.2 腹腔鏡下胆嚢摘出術の実験データリスト

Expert				Non-expert			
実験 番号	被験者 ID	腹腔鏡下手術 経験年数	手術時間	実験 番号	被験者 ID	腹腔鏡下手術 経験年数	手術時間
1	A		14分36秒	18	(a)		30分27秒
2	B		25分11秒 x	19			16分39秒 x
3	C		10分10秒 x	20	(b)		21分13秒 x
4			17分28秒 x	21			25分10秒 x
5	D		11分44秒 x	22			21分05秒
6			11分06秒 x	25	(c)		18分19秒
7	E		13分49秒	26	(d)	5~10年	30分12秒
8	F		9分47秒 x	27	(e)		13分26秒
9		10年以上	17分46秒 x	28	(f)		31分22秒 x
10			13分42秒 x	29	(g)		22分34秒
11	G		12分09秒 x	30			35分08秒
12			14分19秒	31	(h)		33分36秒
13			23分18秒 x	32	(i)		43分53秒 x
14	H		15分18秒	33			35分56秒 x
15			17分33秒	34	(j)		19分43秒
16			13分16秒 x	35	(k)		23分44秒
17	I		9分53秒 x	36	(l)		32分47秒
23	J	5~10年	12分43秒 x	37	(m)		28分43秒
24			9分26秒 x	38	(n)	5年未満	11分48秒
				39			33分45秒
				40	(o)		17分43秒
				41	(p)		18分57秒
				42	(q)		44分27秒
				43	(r)		45分15秒
				44	(s)		42分56秒
				45	(t)		37分24秒
			平均 14分23秒				平均 28分19秒

※ x: 右手術具操作に関するデータのみを計測した症例

## 5.2.2 内視鏡下副鼻腔手術

### ◆ 選定理由

本研究では本手法の汎用性、すなわち多様な術式への適用性を目的の一つとしていることから、他の術式への適用可能性を検証するために、さらに内視鏡下副鼻腔手術 (Endoscopic Sinus Surgery; ESS) を対象術式とした。

図 5.8 に副鼻腔の解剖を示す。副鼻腔は前・後篩骨洞、前頭洞、上顎洞、蝶形骨洞の4つの洞から成る。副鼻腔手術は主にこの副鼻腔に炎症を引き起こす副鼻腔炎の治療として行われ、排泄口の作成と病変部位の除去により、粘膜の腫脹に伴う鼻閉や膿性の鼻汁過多(鼻漏)の改善を図る術式である。ESS は 1980 年代に導入されて以降、現在では全国で年間約 3 万件以上施行されるなど耳鼻咽喉科の中で最も件数の多い術式であり、副鼻腔疾患の外科治療の標準的術式として定着している [79,80]。鼻孔から内視鏡と術具を挿入して行う ESS は、術野及び術具操作を拡大明視下に置きながら低侵襲に治療することができるという利点から、近年では副鼻腔の疾患以外に眼窩や頭蓋底の疾患にも拡大適応されつつある [81,82]。ただし、ESS は基本的に、術者が左手で内視鏡、右手で術具を操作して行うソロサージェリーであるため、術具の動きが制限される狭い鼻内での作業を片手操作で行わなければならない上に、解剖構造が複雑でバリエーションが多い副鼻腔を対象としていることから、術中副損傷や術後合併症を生じるリスクの高い手術として知られている。特に副鼻腔は眼窩や頭蓋底等の重要器官と隣接しているため、

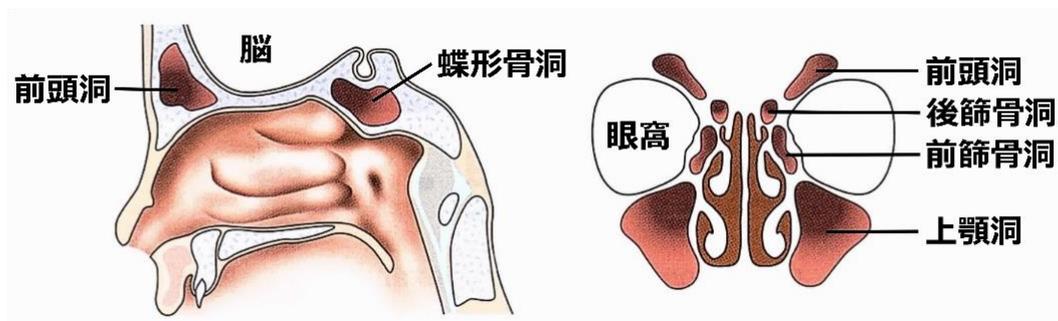


図 5.8 副鼻腔の構造 [78]

ひどい場合には失明や髄液漏などの重篤な副損傷が発生する可能性もある [83]。実際、ESS が標準的術式として確立されている本邦においても、眼窩内側壁、頭蓋底部、動脈血管等の損傷を含む術中副損傷や術後合併症が報告されている [80,84]。こうした実情から、より安全に手術を行うため、1993 年に Zinreich ら [85]によって鼻科手術にナビゲーションシステムが応用されたのを皮切りに鼻科領域でナビゲーションシステムが普及し始め、ESS でナビゲーションシステムが利用されるようになった。友田らの調査報告 [86]によると、日本において図 5.9 のようなナビゲーション誘導下 ESS の実施施設及び手術件数は年々増加しており、2011 年には年間 3,500 例を超えるナビゲーション誘導下 ESS が実施されている。しかし、ナビゲーションの有用性は確かに認められている一方で、それでも ESS における術中副損傷・術後合併症の事例が少なからず発生し続けていることを考えると [87]、ESS もまた手術作業工程解析を導入する意義の大きい術式の一つであるといえる。また、腹部外科領域の内視鏡下手術とは異なる手技が要求される術式である点とナビゲーションシステムが既に実用化されている術式のため臨床症例での検証が可能である点を考慮すると、本手法の汎用性及びロバスト性の検証に適しているため、本研究では ESS を LC と共に対象術式として選定した。

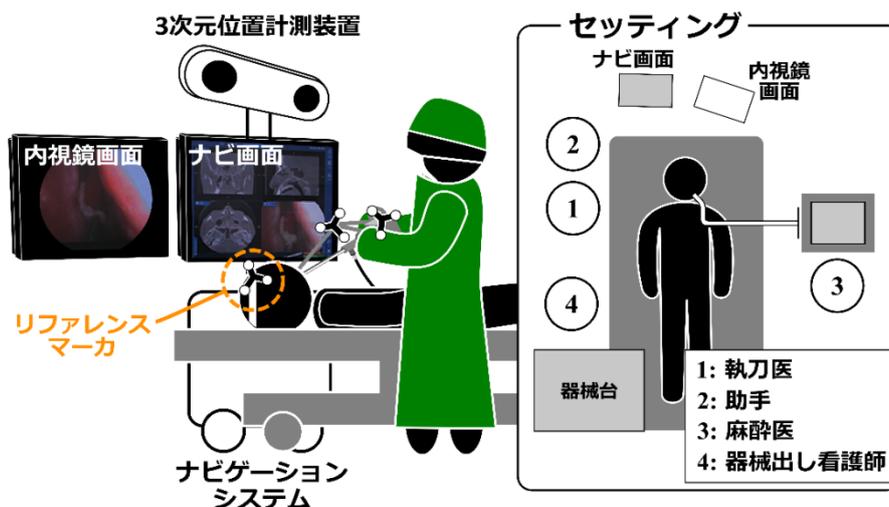


図 5.9 ナビゲーション誘導下内視鏡下副鼻腔手術

#### ◆ 手術作業工程の分類・定義

副鼻腔炎を対象とした ESS の術式は、疾患重症度に応じて 5 種類に分類される [88]. 表 5.3 にその ESS の術式分類について示す. 本研究では、熟練医と後期レジデント(以下レジデント)との比較・評価を行うため、レジデントの手術技術度に見合った副鼻腔単洞手術に該当する症例のうち、特に手術操作手順の第一段階として挙げられる前篩骨洞でのタスクを対象とした [80]. 図 5.10 に篩骨洞の詳細な解剖構造について図示する. 篩骨洞は第III基板の前後で、前篩骨洞と後篩骨洞に大きく分けられ、作業内容も次の 2 つのステップに分けられる [89].

Step 1: 鉤状突起、篩骨胞など前篩骨蜂巢の処置

Step 2: 第III基板を破り後篩骨蜂巢の処置

後篩骨蜂巢ではより頭蓋底に近くなり術中副損傷のリスクが高まることから、安全性を考慮して上記 Step 1 と Step 2 の第III基板を除去する部分までを対象とし、さらにその手術作業の流れを主要な 4 工程に分類した(表 5.4). ESS では、図 5.11 に示すように多くの種類の術具を使用するが、本研究ではその中でも使用頻度が高く、扱いを間違えると副損傷につながるリスクの高いマイクロデブリッダー(図中 K)と上向き截除鉗子(図中 D の下側の鉗子)を計測対象の術具とした. また、スコピストが存在せず術者が自ら内視鏡を操作する ESS では、安全な手技の実施のポイントの一つとして内視鏡での術野の適切な観察及び視野確保の技術が挙げられ、内視鏡操作の技術が非常に重要な役割を持つ [90]. そこで、本研究ではマイクロデブリッダーと上向き截除鉗子に内視鏡を加えた 3 つの器具に着目した計測及び分析に基づき、本手法の検証評価を行う. なお、ESS では鼻孔から直線的に視認・アクセスすることが困難な領域を処置するために視野角のついた斜視鏡や先端部が彎曲したマイクロデブリッダー及び截除鉗子を用いることがあるが、今回対象とする前篩骨洞の作業でのこれらの器具の使用頻度は少ないため、計測術具は直視鏡及び直型術具とした.

表 5.3 副鼻腔炎を対象とした ESS の術式分類 [88]

ESS 分類	手術術式	手術技術度
I	副鼻腔自然口開窓術	卒 3~4 年(後期レジデント)
II	副鼻腔単洞手術 (前・後篩骨洞, 前頭洞, 上顎洞, 蝶形骨洞)	
III	選択的(複数洞)副鼻腔手術 (IIの括弧内の 2 つ以上の洞)	卒 5~7 年(専門医習得前後)
IV	汎副鼻腔手術(一側すべての洞)	卒 8~10 年
V	拡大副鼻腔手術 両側前頭洞単洞化手術 頭蓋底手術・眼窩手術(副鼻腔炎に伴う)	限られた施設で実施

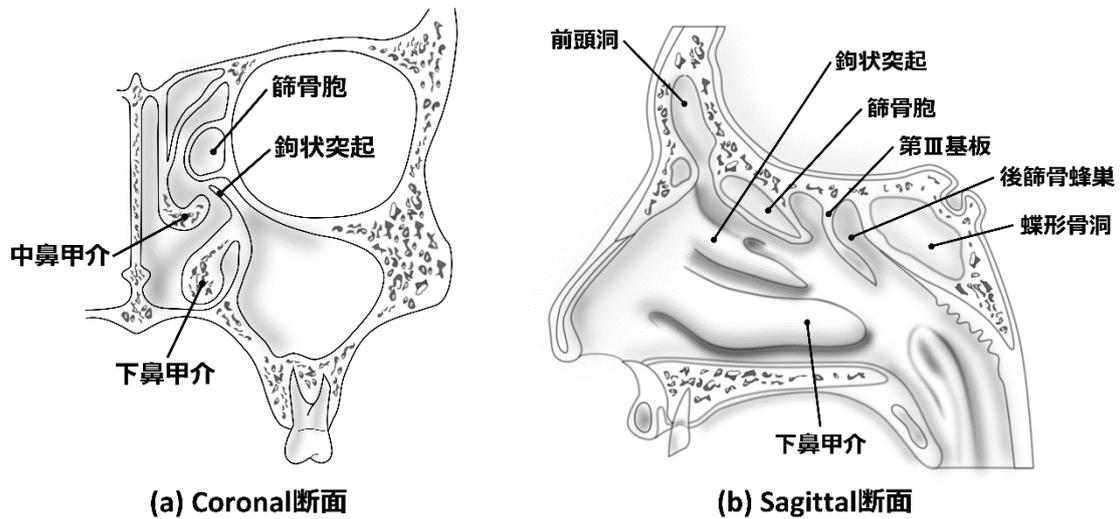


図 5.10 篩骨洞周囲の解剖構造 [91]

表 5.4 内視鏡下副鼻腔手術の工程分類の定義

工程	内容	計測術具	
		右手	左手
Stage 1	鼻茸の除去	マイクロデブリッダー	内視鏡
Stage 2	鉤状突起の除去	マイクロデブリッダー	
Stage 3	篩骨胞の除去	マイクロデブリッダー, 截除鉗子	
Stage 4	第三基板の除去	マイクロデブリッダー, 截除鉗子	

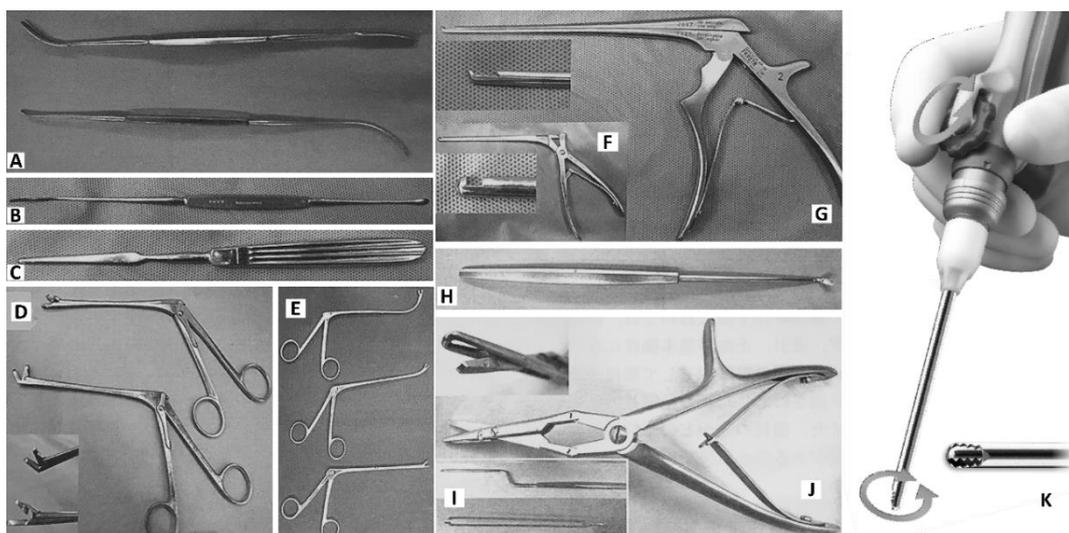


図 5.11 鼻用鉗子(文献 [92]より抜粋改変)

(A-C: 剥離子, D: 截除鉗子, E: 鋭匙鉗子, F,G: 彫骨器, H: 鋭匙, I: 中隔回転軟骨刀, J: 鼻中隔截除鉗子, K: マイクロデブリッダー(Straightshot® M4 Microdebrider, Medtronic Inc.))

#### ◆ 計測環境

図 5.12 に ESS における臨床計測環境を示す. なお, このデータ計測は東京慈恵会医科大学との共同研究(研究課題名: 内視鏡トラッキング装置を用いた内視鏡下副鼻腔手術における術者の手術技量の定量解析への試み)により, 同大学の倫理委員会の承認(受付番号: 27-131(8016))を得た上で実施したものである.

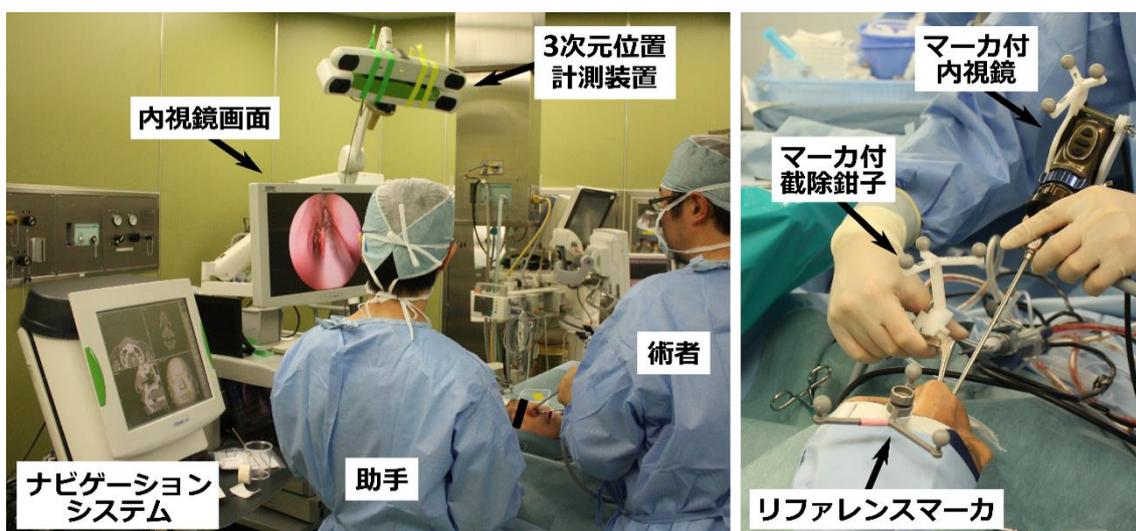


図 5.12 内視鏡下副鼻腔手術の臨床計測環境

現在臨床では磁気式と光学式の 2 種類のナビゲーションシステムが利用されているが、本研究ではより使用頻度の高い光学式のナビゲーションシステム(ENT Navigation Application, Brainlab Inc.)による ESS を対象に計測を実施した。ただし、現在実用化されているナビゲーションシステムは計測した情報を誘導支援のみに利用することを想定しているため、理論上はログデータを記録して取り出すことは可能であるが、その取得情報を取り出せるような仕様になっていない。そこで、図 5.12 に示すように、本研究では情報取得のためにナビゲーションシステムの 3 次元位置計測装置と同じ仕様の計測装置(Polaris Spectra, Northern Digital Inc.)を計測範囲が一致するように固定して使用した。そのため、新たに設置した計測装置を用いてナビゲーションシステムと同等の情報を取得できるようにするため、前項で述べた方法と同様の方法でレジストレーションとキャリブレーションを手術開始前に行った上で計測を実施した。図 5.13 と図 5.14 に実施したレジストレーションとキャリブレーションの概要を示す。レジストレーションに関しては患者の顔面上の特徴的な箇所(両目目頭、鼻尖部、鼻柱基部)を基準点とすることで行った。

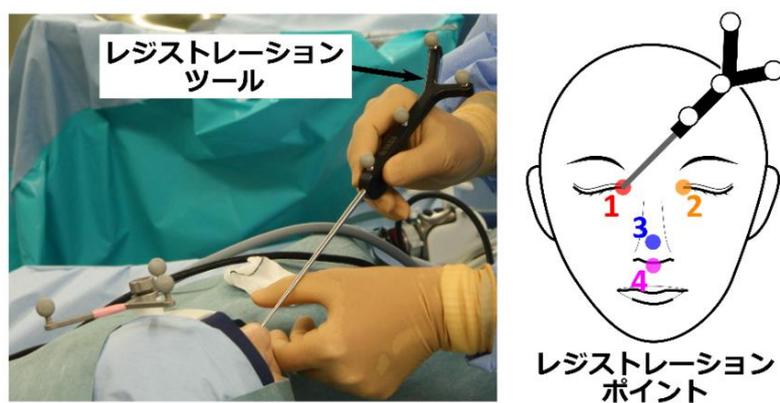


図 5.13 臨床計測前のレジストレーション概要

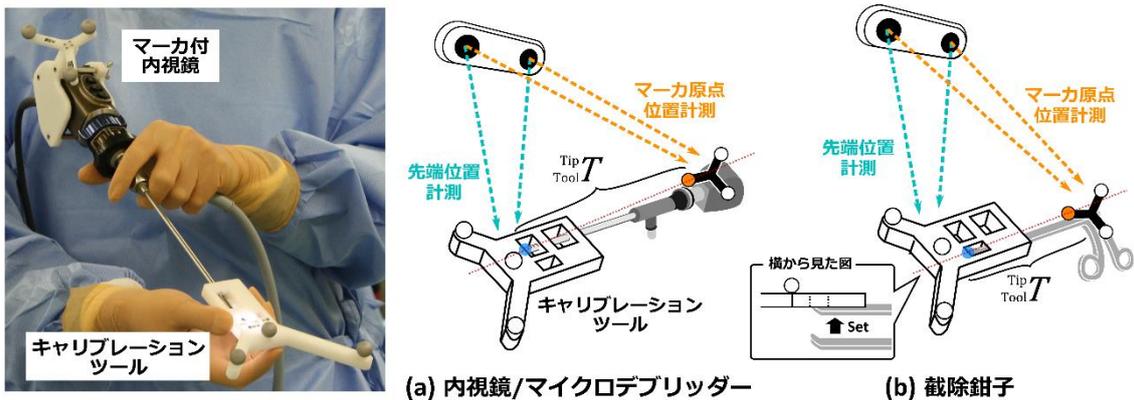


図 5.14 臨床計測前のキャリブレーション概要

◆ データセット

表 5.5 に ESS における臨床計測データリストについて示す。本研究では、右と左の両側の副鼻腔の治療が必要な副鼻腔炎症例を対象とし、同一の患者において熟練医 (Expert) と研修医 (Resident) が片側ずつ実施することで、14 例の症例に対して計 28 回のデータ計測を行った。ただし、症例 No. 9 に関してのみ、右側と左側の副鼻腔ともに Expert が実施した。LC 同様、Expert 及び Resident の分類・定義に関して明確な基準は存在しないが、手術教育の目標設定を目的とした山崎ら [93] のアンケート調査によれば、経験年数 10 年未満の若手医師が ESS を執刀する場合、独り立ちするのに必要と考えられている手術件数は約 50 例であり、目標執刀数としては約 150 例という数字が挙げられている。そこで、ここではこの目標執刀数を十分に上回る ESS 経験症例数 300 例以上の術者を Expert、独り立ちに必要とされる経験症例数 50 例未満の術者を Resident として分類した。計測に参加した術者は Expert 6 名と Resident 8 名であり、Expert 群と Resident 群において Stage 1~4 の作業工程を行うのに要した平均手術時間はそれぞれ 12 分 40 秒と 24 分 59 秒であった。ただし、症例 No. 8, 12, 13 に関しては鼻茸の病変のない症例患者であったため、Stage 1 を除く Stage 2~4 の手術時間を示している。なお、本研究では右と左のどちらの鼻孔の副鼻腔を処置するかは固定せず、ランダムに入れ替えて実施した。

表 5.5 内視鏡下副鼻腔手術の臨床計測データリスト

症例 No.	Expert			Resident		
	ID	鼻孔	手術時間	ID	鼻孔	手術時間
1	A	左	22分 28秒	G	右	37分 42秒
2	B	右	18分 08秒	H	左	37分 15秒
3	C	左	10分 40秒	I	右	22分 22秒
4	D	左	19分 02秒	J	右	20分 58秒
5	E	右	6分 33秒	K	左	9分 04秒
6	C	右	7分 50秒	L	左	23分 57秒
7	A	左	16分 10秒	H	右	28分 49秒
8*	D	右	17分 20秒	M	左	18分 04秒
9	C	右	7分 07秒			
	F	左	15分 42秒			
10	F	左	12分 37秒	N	右	34分 18秒
11	C	右	7分 31秒	N	左	23分 49秒
12*	F	左	13分 47秒	L	右	40分 47秒
13*	C	左	7分 08秒	M	右	15分 04秒
14	A	左	7分 53秒	M	右	12分 42秒
			平均	12分 40秒		
					平均	24分 59秒

※手術時間: Stage 1~4 の合計時間

\* 症例 No. 8, 12, 13 は Stage 1(鼻茸の除去)なし

以上の LC と ESS の 2 種類のデータセットを基に、第 2 章から第 4 章にかけて述べてきた手法の妥当性及び有用性についてそれぞれ検証を行った。以下に各手法における検証評価項目・結果・考察等について記述する。

## 5.3 手術作業特徴の定量表現手法の検証

### 5.3.1 評価項目

本研究では多様な術式への汎用性を考慮し、多角的な観点から術具操作に関する作業特徴を表現することで、どの術式においても術者が必要とする特徴量を選択的に利用して手術作業工程の分析・評価を行えるようにすることを目的として、11種類の時系列データによる分析指標(表 2.1)と 13種類のクロス・セクションデータによる分析指標(表 2.2)を定義した。そこで、実験及び臨床研究より得られた計測データセットのログデータを基に定義した分析指標を算出し、実際にこれらの解析指標が多角的に手術手技の特徴を表現できているのか、またその定量表現が適切であるかについて検証する。

ここでは、時系列データと比較して作業特徴が埋没しやすいと考えられるクロス・セクションデータによる分析指標を利用し、各指標における熟練度別の算出結果の比較・有意差検定により適切にかつ多角的に表現できているかを確認することで術者の手術作業の特徴が定義した分析指標に反映されているかどうかについて評価する。各指標における熟練度別の算出結果の有意差検定については、LC と ESS のデータセットともに被験者の熟練度群を 2 群(LC: Expert/Non-expert, ESS: Expert/Resident)に分類したため、2 群間の有意差検定に利用可能なマン・ホイットニーの U 検定を利用した。

### 5.3.2 結果

#### (1) 腹腔鏡下胆嚢摘出術

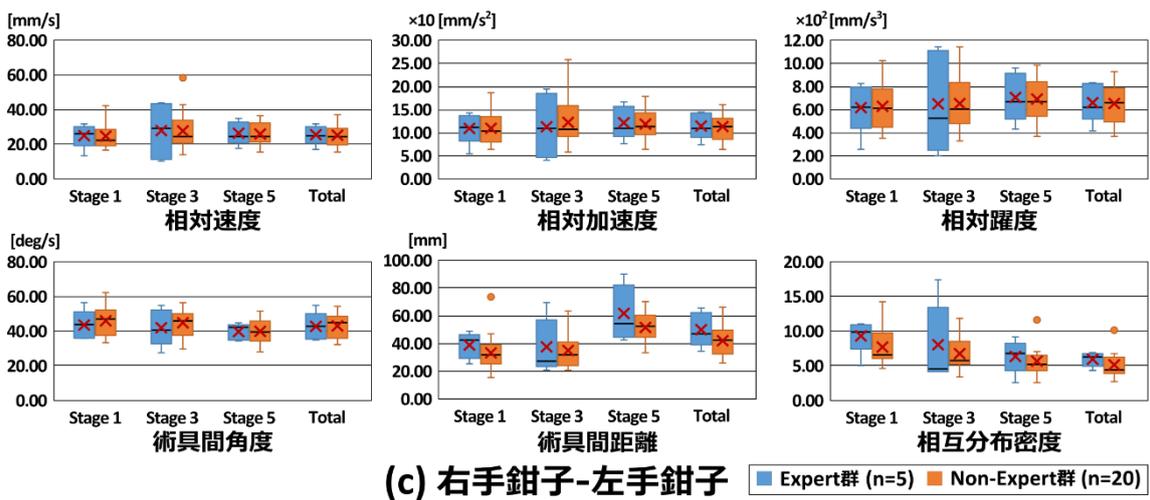
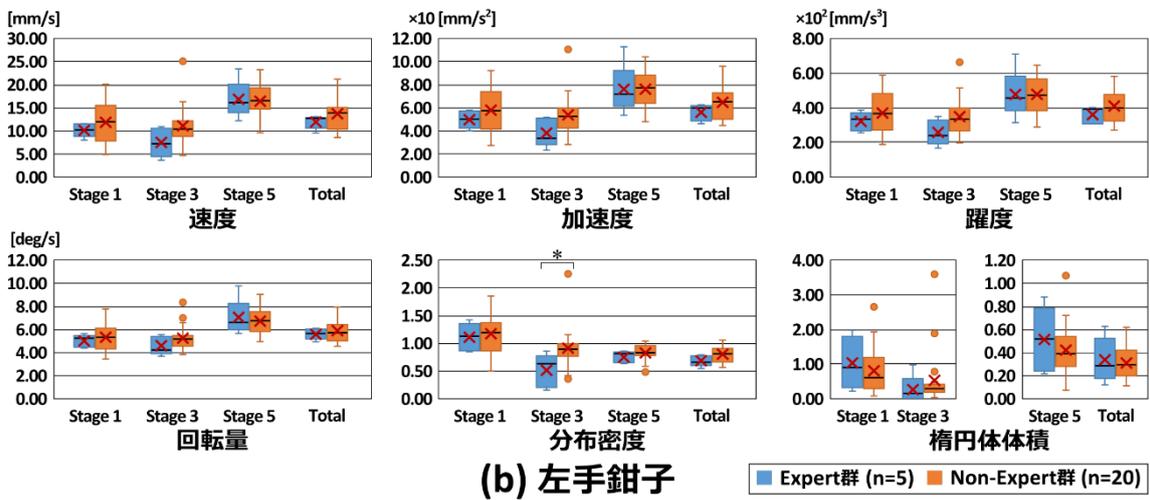
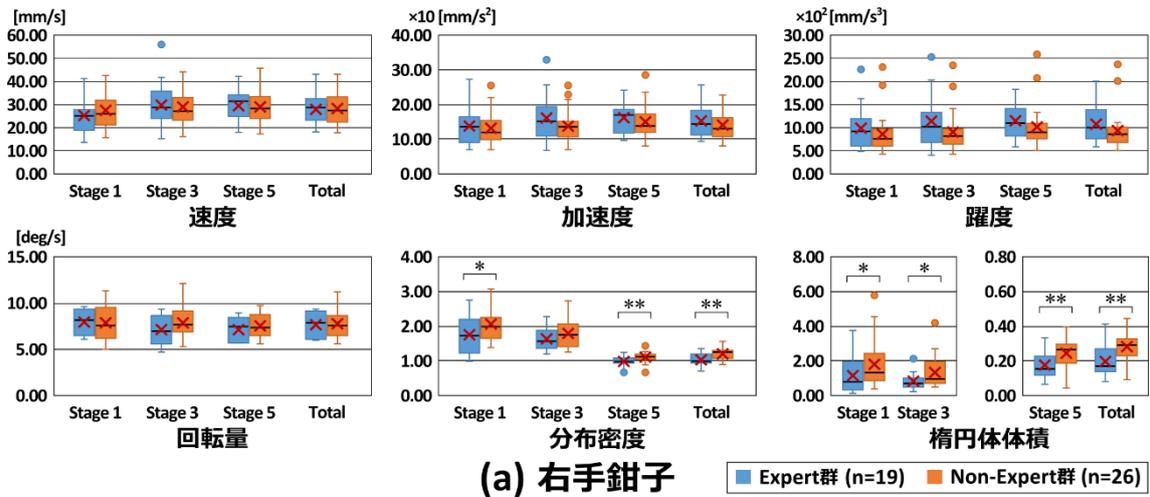
図 5.15 (a), (b), (c)に LC の模擬手術実験における右手鉗子(剥離/鉗鉗子)、左手鉗子(把持鉗子)の術具操作、右手鉗子-左手鉗子の協調操作に関するクロスセクションデータの算出結果を示す。右手鉗子-左手鉗子の協調操作の分析指標に関しては、LC の場合、術者が内視鏡を操作することはないため、画面中心-術具間距離の指標を除く 6 指標の算

出結果を示している。また、本研究では手術作業工程を全 5 工程(Stage 1, 3, 5: 剥離作業, Stage 2, 4: クリッピング作業)に定義・分類したが、ここでは剥離作業の工程 Stage 1, 3, 5 の結果のみを示す。クリッピング作業は直前の剥離作業に依存しており、剥離作業によりクリッピングの処置対象である胆嚢管及び胆嚢動脈を正しく露出することができていれば、クリッピング作業は滞りなく非常に短時間に行えることから、ここではより胆嚢摘出工程において重要と考えられる剥離作業に着目した。

図 5.15 (a)の右手鉗子の分析指標の結果を見ると、分布密度や近似楕円体体積などの作業範囲に関連する分析指標で Expert 群と Non-expert 群で有意差が見られ、全ての工程においてどちらの指標も Expert 群の方が小さい値を示している。分布密度の指標は低ければ低いほど作業密度が高いことを表していることから、この結果は全ての工程において Expert 群の方が右手鉗子の作業範囲が集中しており、無駄な動きが少なかったということの意味している。また、右手鉗子の指標に関して言えば、有意差はないものの加速度、躍度に関しては Expert 群の方が大きい傾向があることがわかる。

一方、図 5.15 (b)の左手鉗子の結果では、Stage 3 における分布密度の指標のみ 2 群間で有意差が見られ、他の指標では有意差は見られなかった。ただし、ほぼ全ての指標において、Stage 1, 3 では Expert 群の方が Non-expert 群よりも小さく、Stage 5 では逆に大きくなるといった傾向があることがわかる。すなわち、Expert は Stage 1, 3 の剥離作業時には左手の動きが小さく、Stage 5 の剥離作業時には左手の動きがより大きくなるということの意味しているといえる。

また、図 5.15 (c)の両手協調操作に関する分析指標算出結果においては、2 群間での有意差のある指標はなかったが、術具間距離や相互分布密度の指標を見ると全工程で Expert 群の方が大きいという一貫した結果が得られている。



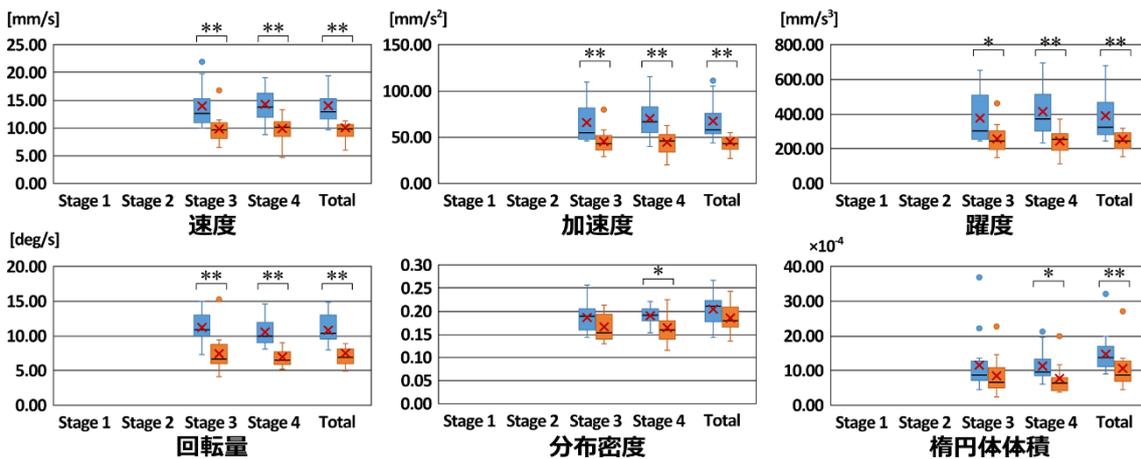
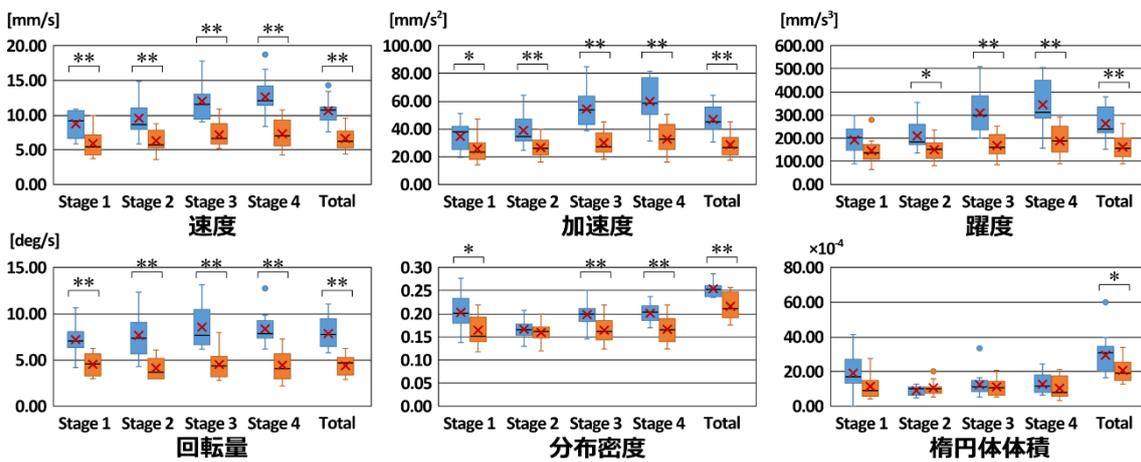
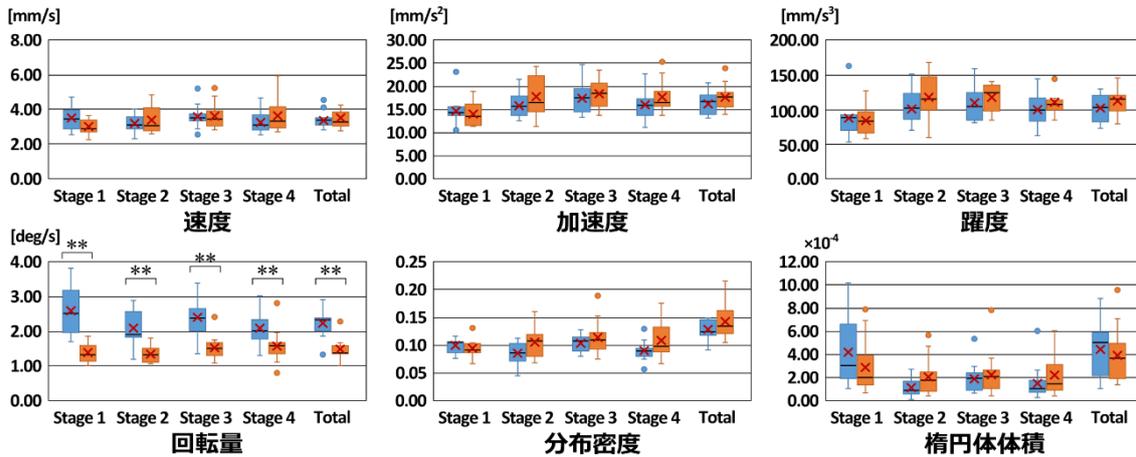
× 平均値 ○ 外れ値 \* p < 0.05 \*\* p < 0.01

図 5.15 LCにおけるクロスセクションデータ算出結果

## (2) 内視鏡下副鼻腔手術

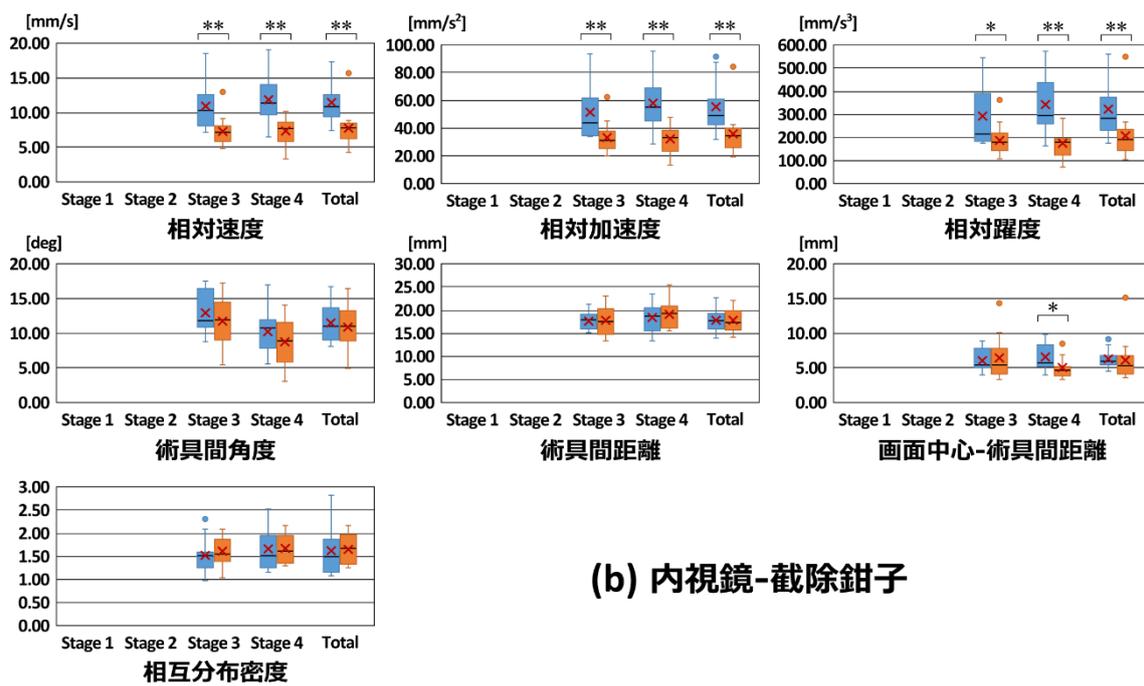
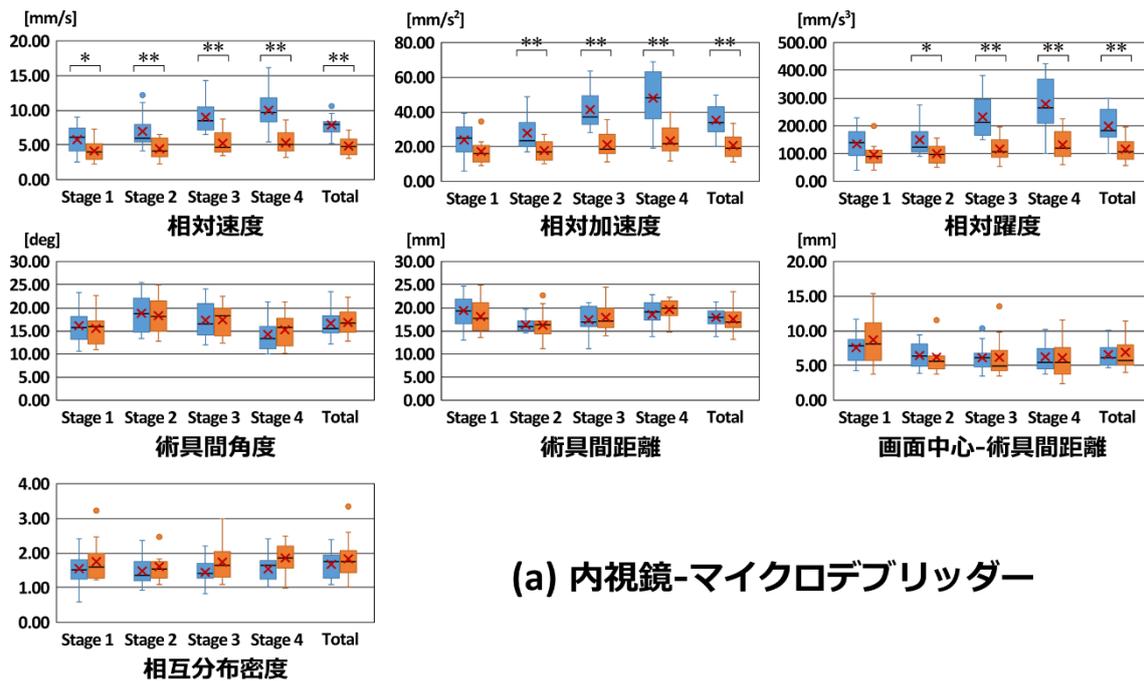
図 5.16 (a), (b), (c)に ESS における内視鏡, マイクロデブリッダー, 截除鉗子の 3 つの術具操作に関するクロスセクションデータの算出結果を示す. なお, 本研究で定義した Stage 1, 2 では截除鉗子は使用されないため, 図 5.16 (c)のグラフ中 Stage 1, 2 の箇所は空欄になっている. まず内視鏡の算出結果において Expert 群と Resident 群で有意差が見られる部分に着目すると, 回転量の指標で 2 群間の差が顕著に現れており, 全ての工程において Expert 群の方が手術中の内視鏡の回転量が多い傾向にあることがわかる. ただし, その他の指標に関しては 2 群間での有意差はないものの, Stage 1 を除く全ての工程で Expert 群の方が小さい値を示している. またマイクロデブリッダーと截除鉗子の結果を見ると, ほぼ全ての分析指標において Expert 群の方が Resident 群よりも有意に高い値を示している.

続く図 5.17 (a), (b)にはそれぞれ, 内視鏡-マイクロデブリッダー, 内視鏡-截除鉗子における協調操作を表すクロスセクションデータの算出結果を示す. ESS は術者が左手で内視鏡, 右手で術具を操作しながら行う術式であるため, ここでは内視鏡の画面中心-術具間距離の分析指標も加えて算出している. 図 5.17 (a), (b)のどちらの結果においても主に相対速度・相対加速度・相対躍度の指標で有意差が見られ, 図 5.16 (b)と(c)の結果同様, Expert 群の方が有意に高いという結果であった. 内視鏡-截除鉗子の分析指標の算出結果に着目すると, 術具間角度の指標においても, 有意差はないものの全ての工程で Expert 群の方が高い傾向にあることがわかる. また, 同算出結果の画面中心-術具間距離の分析指標において, Stage 4 の工程で 2 群間の有意差が現れており, Resident 群の方が有意に小さい値となっている.



■ Expert群 (n=15)   
 ■ Resident群 (n=13)   
 × 平均値   
 ○ 外れ値   
 \*  $p < 0.05$    
 \*\*  $p < 0.01$

図 5.16 ESS におけるクロスセクションデータ算出結果 1



■ Expert群 (n=15)   
 ■ Resident群 (n=13)   
 × 平均値   
 ○ 外れ値   
 \*  $p < 0.05$    
 \*\*  $p < 0.01$

図 5.17 ESS におけるクロスセクションデータ算出結果 2

### 5.3.3 考察

ここでは、定義した分析指標が LC と ESS という異なる術式に対して Expert 群及び Non-expert/Resident 群の手術作業の特徴を反映しているのかどうかを調べるため、算出した結果を単純に 2 群間で比較することで評価を行った。以下に LC と ESS のそれぞれのデータセットにおける分析指標の算出結果に関する考察を述べる。

#### (1) 腹腔鏡下胆嚢摘出術

LC のデータセットにおける分析指標に関してまず顕著な結果として観察されたのは、右手鉗子操作の結果(図 5.15 (a))において、分布密度及び楕円体体積の指標で Expert 群の方が有意に小さい値であった点であるが、これはすなわち Expert 群の方が作業範囲が小さく、作業密度が高いということを表している。Stage 1, 3, 5 の作業はそれぞれ、胆嚢管、胆嚢動脈、胆嚢床の部位の剥離作業であり、胆管・血管及び肝臓等の重要な器官近くでの作業が求められる。したがって、これらの作業を行う場合、侵襲性の高い処置を担う右手鉗子の動作は必要最低限であるべきであるため、Expert 群の方が無駄な動きが少ないことを示すこの結果は極めて妥当な結果であるといえる。ただし一方で、有意差はなかったものの術具操作に急峻な動きやブレが多いときに高い値を示す傾向のある加速度や躍度といった指標に関しては全工程で Expert 群の方が Non-expert 群よりも高い傾向にあった。これはおそらく本実験環境の設定が関係していると考えられる。実際の LC の手術手技において剥離を行う際は電気メス等のエネルギーデバイスが使用されることが多いが、今回使用した胆嚢モデルではエネルギーデバイスが使えないことから、こうした術具の代替として剥離鉗子と鉗子を使用した。エネルギーデバイスの場合は術具先端を剥離箇所押し当てただけで組織を蒸散させて剥離を行うことができるが、鉗子の場合はエネルギーデバイスのように術具先端を剥離箇所に当てただけでは組織を剥離させることは難しいため、エネルギーデバイスを使用した場合と比較すると

必然的に剥離作業時の術具先端の動きは大きくなることが予想される。また、通常、剥離作業の際に鉗鉗子が用いられる場面は少ないが、胆嚢モデルの表面が実際の胆嚢の表面よりも固かったことから、実験中に鉗鉗子を使用する術者が多く見られた。鉗鉗子を使用して剥離作業を行う場合、鉗鉗子の扱いに慣れている熟練医は特に、鉗の開閉時に急峻な動きが生じやすくなる。実際、全被験者における全作業時間に対する鉗鉗子の使用時間の割合は平均 73%であり、非常に高頻度で鉗鉗子を用いていたことも考慮すると、この加速度、躍度の結果は鉗子を使用したことが影響したものであると推察される。

次に、左手で扱う把持鉗子の分析指標算出結果(図 5.15 (b))では、Stage 3 の分布密度以外で有意差は見られなかったが、全体的に Expert 群の方が Stage 1, 3 で各指標の値が小さく、Stage 5 では大きくなるという傾向があった。すなわち Stage 1, 3 では術具操作の動きが比較的小さく、Stage 5 では大きいという結果であった。剥離作業の場合、通常、左手は組織の把持と牽引により剥離箇所にはテンションをかけるという役割を担うことから、臨床医の見解では左手鉗子の動きは Expert 群の方が大きくなることが予想されたが、本実験結果では Stage 1, 3 で逆の結果となっている。ただし、この点に関しても本実験環境の設定、すなわち胆嚢モデルが固定されていたことが影響したものであると考えられる。本実験で利用した術前医用画像ベースのナビゲーションシステムは手術中の対象臓器の移動・変形を追従することはできないことから、対象臓器である胆嚢モデルと術具の正確な位置情報を取得するために胆嚢モデルを土台に固定した上で実験を実施した。そのため、本実験では、図 5.18 に示すように Stage 1, 3 では胆嚢モデルの動きが大きく制限され、逆に Stage 5 では胆嚢床の剥離により作業が進むにつれて胆嚢モデルの動きの制限が解けて自由度が高くなる状況にあった。したがって、本実験結果では Expert 群の左手鉗子の分析指標は Stage 1, 3 で小さく、Stage 5 で大きくなる傾向が見られたが、Expert はこうした胆嚢モデルの動きの自由度に応じて巧みに左手鉗子进行操作していたものと推察されることから、妥当な結果であると判断できる。

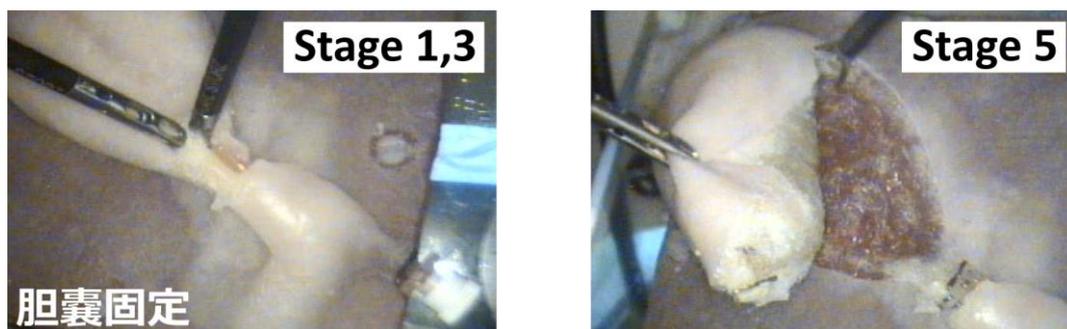


図 5.18 模擬手術実験時の胆嚢モデルの様子

最後に、両手協調操作の分析指標(図 5.15 (c))に関してであるが、左手鉗子同様、2 群間で明確な差が見られた指標は少なかったものの、術具間距離や相互分布密度の指標が Expert 群の方が若干大きい傾向が見られる。相互分布密度が大きいということは右手鉗子と左手鉗子のログデータの分布の状態が大きく異なることを意味するため、これらの結果は Expert 群の方が右手鉗子と左手鉗子の作業位置がより離れていたことを示している。先述の通り、剥離作業の場合には左手鉗子で組織を牽引して剥離箇所にはテンションをかけることが重要であり、そのためには左手鉗子の作業位置と右手鉗子が位置する剥離箇所間に一定の距離が開いていることが望ましいといえる。したがって、大きな差ではないもののこれらの結果も妥当なものであると考えられる。

実験環境上、実際の手術環境とは異なる条件及び状況に設定して実施せざるを得ない部分があり、得られた結果に関しても一部、臨床医の見解とは異なる部分はあったが、この模擬手術実験時の環境及び状況を考慮すると、算出された分析指標の結果はほぼ妥当な結果を示しており、Expert 群と Non-expert 群の作業特徴を適切に反映することができているものであると考える。

## (2) 内視鏡下副鼻腔手術

続いて、ESS の分析指標算出結果に関して考察を述べる。まず 2 群間で非常に顕著な差を示した右手術具(マイクロデブリッダー/截除鉗子)の分析指標(図 5.16 (b), (c))に関してであるが、これらの術具においてはほぼ全ての分析指標で Expert 群の方が大きい値を示している。これは Expert 群の方が解剖構造の理解・把握能力が優れていることと術具の扱いに慣れていることが大きな要因であると考えられる。この右手で扱う 2 つの術具はどちらも扱いを間違えれば重大な事故につながる術具であることから、実際、手術経験の浅い Resident は手術中これらの術具を慎重に扱う傾向があったことが観察されている。一方、Expert は患者の副鼻腔の解剖と術具の使い方を熟知しており、迷いなく術具を操作することができたため、右手術具のほぼ全ての項目で有意に大きい値を示したものと考えられる。両手術具操作(内視鏡-マイクロデブリッダー/内視鏡-截除鉗子)に関する分析指標において相対速度・相対加速度・相対躍度で有意差が見られる点についても同様に、この点が大きく影響しているといえる。

ESS においては内視鏡操作も安全な手術を行う上で重要な要素であるが、内視鏡操作に関する分析指標(図 5.16 (a))では、回転量の指標において Expert 群の方が有意に大きいという結果が得られている。これは Expert の方が術野を様々な方向から満遍なく見ようとして内視鏡を操作している結果が反映されたものであると考えられる。また回転量が高いにも関わらず、内視鏡先端の速度・加速度・躍度などの指標は Resident 群よりも低い傾向があった。これらの結果は、Expert が内視鏡の先端のブレを抑え、鏡筒の向きを変えることによって視野を確保する傾向があることを示唆しているが、これは臨床医の見解と相違ないものである。

一方で、内視鏡-截除鉗子における分析指標算出結果(図 5.17 (b))を見ると、Stage 4 の画面中心-術具間距離の指標において Resident 群の方が有意に小さい値を示している。基本的に、ESS においては右手術具を内視鏡画面の中心付近で捉えながら手術操作を行

うのが良いとされている [66]ため、ここでは臨床医の見解とは逆の結果となっている。ただし、この点に関しては、同じく内視鏡-截除鉗子の Stage 4 の術具間角度、そして截除鉗子(図 5.16 (c))の Stage 4 の分布密度や楕円体体積の指標で Resident 群の方が小さいことを考慮すると、図 5.19 に示すように Resident は内視鏡と截除鉗子が平行に近くなる傾向があり、それにより術具間の干渉が生じるなど、作業がスムーズに進まずに内視鏡画面中心付近で截除鉗子の作業の停滞が生じているためであると推察される。特に ESS の手術作業工程においては、Stage 1~4 に進むにつれて作業空間の狭い鼻腔内の奥での作業となるため、Stage 4 ではより術具間の干渉及び作業の停滞が生じやすくなると推察されることから、この結果は妥当なものであると考えられる。

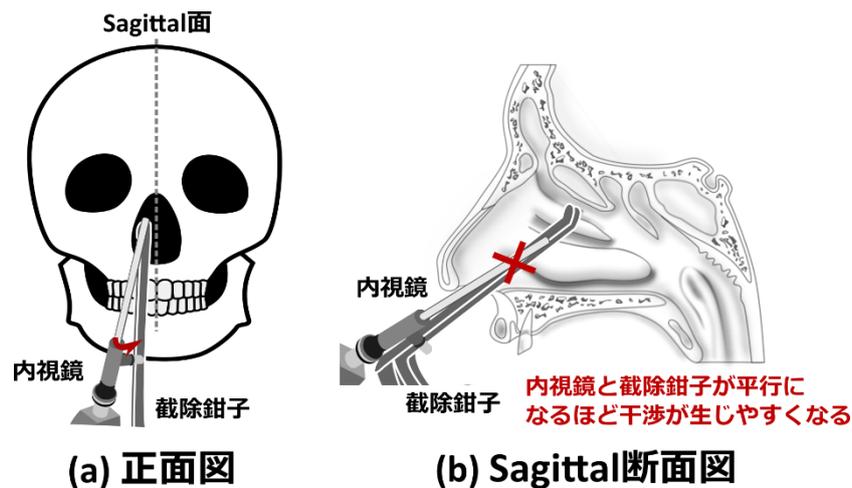


図 5.19 Stage 4 (第Ⅲ基板の除去)における Resident の作業傾向

以上の点から、LC に関しては模擬手術実験環境下であったものの、LC と ESS という全く異なる手技から成る術式であっても、本研究で定義した分析指標を術式に応じて術者の作業傾向及び特徴を多角的にかつ定量的に表すことが可能であった。また、算出して得られた結果に関しても十分妥当な解釈のできる結果であり、熟練医及び非熟練医の特徴を適切に反映しているものであったことから、本研究により定義した分析指標は十分な汎用性も有していると考えられる。

## 5.4 手術プロセスモデルによる手技課題特定法の検証

### 5.4.1 評価項目

本研究で提案する手技課題特定法は、患者の個体差などの外的要因による手術の変動に対応可能な手術作業工程の比較評価を目的としている。そのため、ここでは患者の個体差による外的要因がデータセットに含まれる ESS のデータセットを用いて本手法の検証を行う。3.3 節で述べたように、症例ごとの医用画像の撮像状況の違いと患者の個体差への対応を図るために、ナビゲーションシステムによる取得情報の特性を活かし、ログデータの新規座標を再定義した。図 5.20 に ESS の術式における新規座標系の設定の概要を示す。患者の鼻孔のサイズを基に、各症例の鼻腔内の新規座標系のブロック(ボックス)数が一致するように座標系を設定した。また、ESS では両鼻孔の処置を必要とする症例を対象として右側と左側のどちらかをそれぞれ Expert と Resident が行ったため、設定した座標系を用いたとしても右側と左側を処置したときで解剖学的構造に対するログデータの座標値は大きく異なってしまう。そこで鼻中隔を中心に線対象となるように新たな座標軸を設けることでどちらの鼻孔を処置したとしても患者の解剖部位に対するログデータの座標値が統一されるように設定した(図 5.21)。

本研究では作業内容と関連性が高いと考えられる解剖部位に対する相対的な術具先端位置、すなわち新たに定義した座標系によってラベリングされた術具先端の位置座標

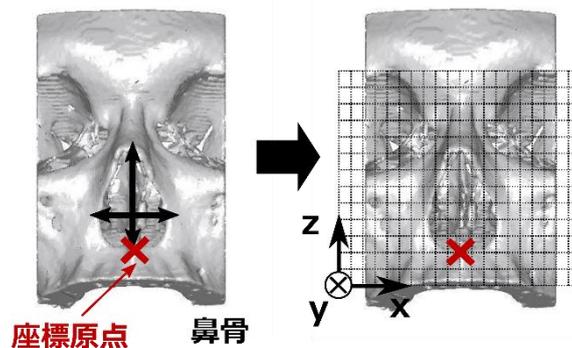


図 5.20 座標系設定の概要

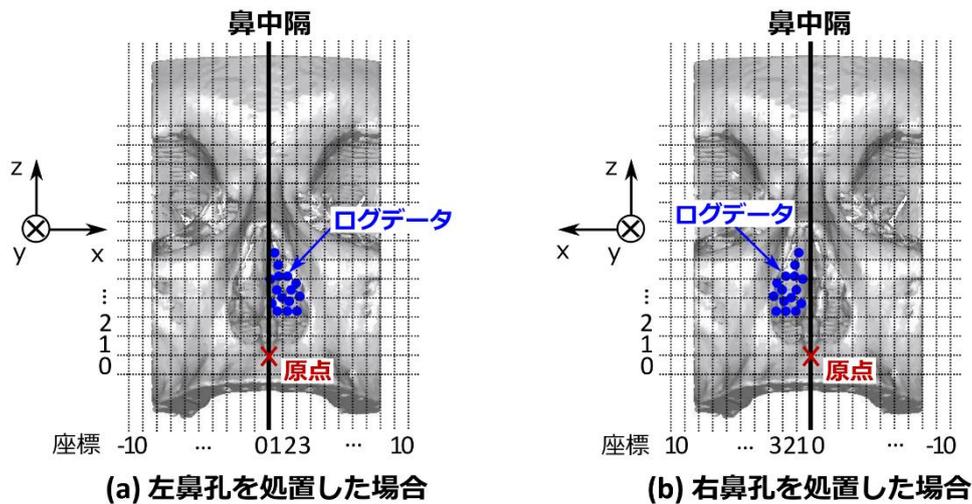


図 5.21 両鼻孔における新規座標値の定義

を基に、DTW をベースとした手術作業工程比較法について構築した。この手法では、作業内容と関連性の高いと推察される解剖部位に対する術具操作位置情報から成る  $SPM_t$  を基にアラインメントを施すことで、異なる  $SPM$  間の作業内容が合致するように揃えて比較することを目的としている。そこで、ここではまず、そのアラインメントにより異なる  $SPM$  間の作業内容を実際に一致させることが可能かどうかを検証する。

本研究では ESS を 4 工程に分類したが、各工程の中でも内容の異なる作業が混在しているため、検証用にここではさらに細かく作業状況/内容を定義・分類し、手動で  $SPM$  のデータセットに作業状況/内容の情報を付加した。その作業状況/内容の定義を表 5.6 に示す。 $SPM$  データセットに本手法のアラインメントを適用した後、図 5.22 に示すように、作業状況/内容の定義に合わせて  $SPM$  をカラーインデックス化して積み上げ面グラフを作成することで  $SPM$  間の合致の度合いを可視化する。可視化した結果に関しては、線形的に長さを揃える均等スケーリング(図 5.22 (a))、 $SPM_t$  の術具操作情報を用いた DBA(図 5.22 (b))を施した場合と比較し、本研究で提案する  $SPM_t$  の解剖部位に対する術具位置情報に基づく DBA によるアラインメントを用いることで  $SPM$  間の作業状況/内容がどれだけ合致するかについて検証及び評価する。

次に提案手法のアラインメントにより長さが統一された SPM のデータセットを基に, Expert 群と Resident 群でそれぞれ SPM の各構成要素を平均化した手術プロセスモデル  $SPM_t^{(Expert)}$  と  $SPM_t^{(Resident)}$  を導出して比較する. これにより, Expert と Resident の作業特徴の違いを評価することができるかどうかを検証する.

表 5.6 ESS の作業状況/内容の定義

工程	No.	作業状況	術具
	0	内視鏡抜去	
	1	血液吸引	吸引器
	2	止血(ガーゼ挿入)	鑷子
Stage 1	3	鼻茸剥離	剥離子
	4	鼻茸除去	マイクロデブリッター
Stage 2	5	鉤状突起剥離	剥離子・彫骨器
	6	鉤状突起除去	マイクロデブリッター
Stage 3	7	篩骨胞剥離	剥離子・彫骨器
	8	篩骨胞除去	マイクロデブリッター・截除鉗子
Stage 4	9	第Ⅲ基板穿破	鑷子・鋭匙鉗子・彫骨器
	10	第Ⅲ基板除去	マイクロデブリッター・截除鉗子

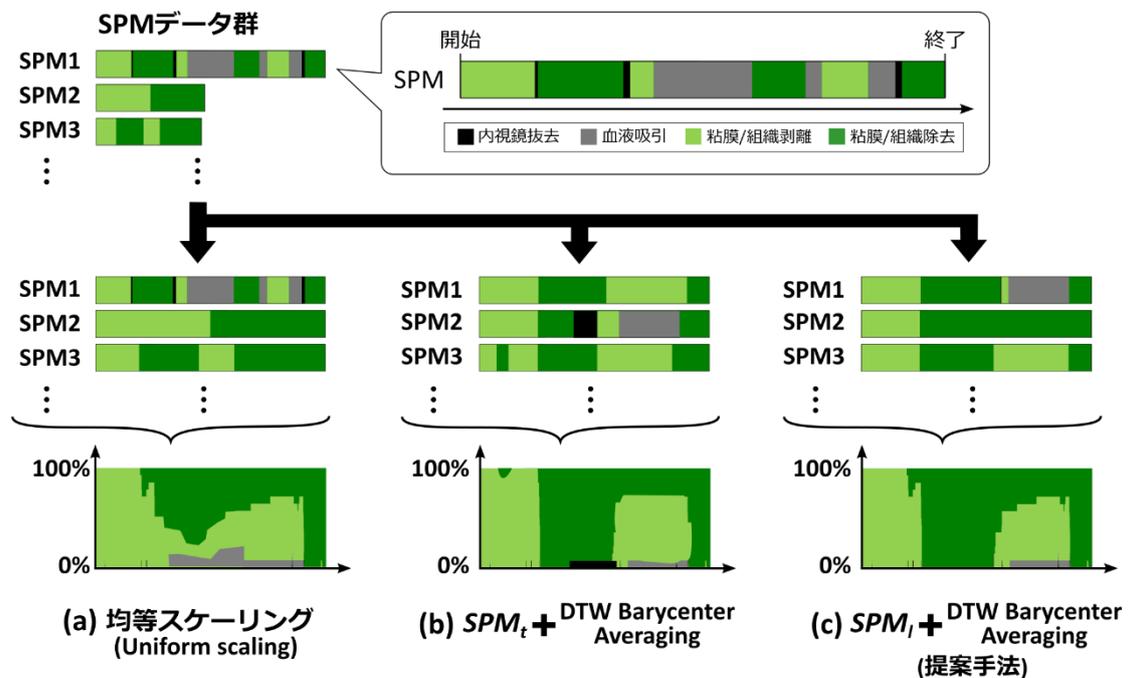


図 5.22 SPM アラインメントの評価方法概要

## 5.4.2 結果

ESS の計測データを基に生成された SPM データセットに対して、均等スケーリングと、 $SPM_t$  及び  $SPM_l$  のそれぞれの情報を基に DBA によるアラインメントを適用して得られたアラインメント結果を図 5.23 に示す。なお、この結果は検証のために SPM に手動で加えた作業状況・作業内容の情報を基にアラインメント後の SPM データセットをカラーインデックス化したものであるが、あくまでこの付加情報は利用せずに元々 SPM が保有していた情報のみを使用して得られた結果である。時間軸(横軸)に対して垂直方向に見たときに同一色でまとまっていれば、全被験者の SPM 中の作業内容が一致していることを意味する。したがって、均等スケーリングの結果と比較すると、本手法によるアラインメントの結果の方が全体的に垂直方向に同一色でまとまりを持った結果、すなわち作業内容が合致した結果が得られていることがわかる。特に、図 5.23 の点線で囲まれた部分に着目すると、均等スケーリングでは他の作業内容と混在して多色で示さ

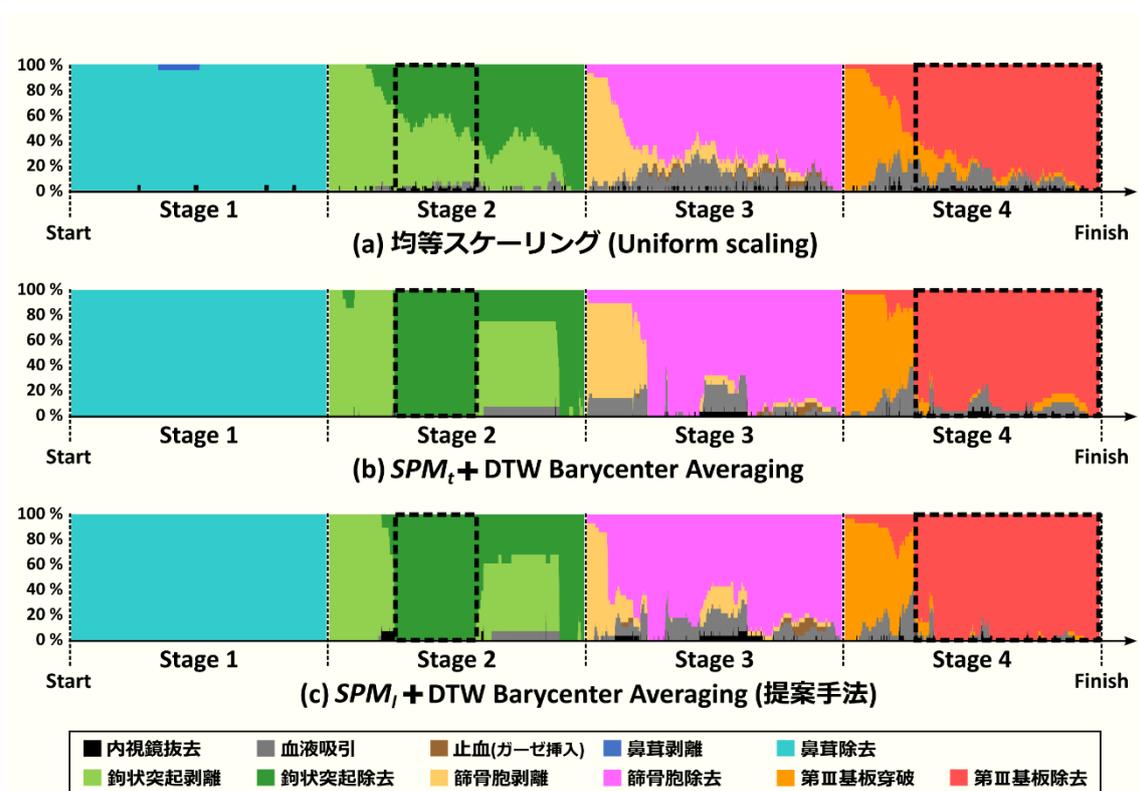


図 5.23 SPM アラインメント結果

れている部分において、本手法の結果では同一色で表される部分の割合が顕著に増えていることが見て取れる。また、図 5.23 (b)の結果を見ると、術具操作に関する時系列データの分析指標から成る  $SPM_t$  を用いたアラインメントにおいても本提案手法と同様の結果が得られている。ただし、基本的に第Ⅲ基板の除去作業が行われる Stage 4 の点線で囲まれた箇所において、本手法の方が他の作業の混在の割合が少ないなど、局所的に見ると本手法の結果の方が作業内容が合致している箇所を観察することができる。

次に、図 5.24 に Expert 群と Resident 群でそれぞれ、本手法による SPM 間のアラインメント及び構成要素の平均化を行った手術プロセスモデル  $SPM_t^{(Expert)}$  と  $SPM_t^{(Resident)}$  の比較結果を示す。なお、ここでは SPM を構成する要素のうち、図 5.16 のクロス・セクションデータの算出結果において 2 群間で有意差のあった内視鏡の回転量、マイクロデブリッダーの速度、截除鉗子の速度の時系列指標を上から順に示している。まず内視鏡の回転量の指標に着目すると、Resident と比較すると Expert の方は常に一定量内視鏡を回転、すなわち鏡筒の向く方向を変えており、特に各工程の中盤から後半にかけて大きい値を示す傾向があることがわかる。続いてマイクロデブリッダーの速度の指標に関して見ると、Stage 1 では Expert と Resident とともにそれほど大きな値は見られないが、Stage 2 以降では Expert の方が顕著に術具使用時の速度のグラフの振幅及び急峻な変化が生じている箇所が増加する傾向

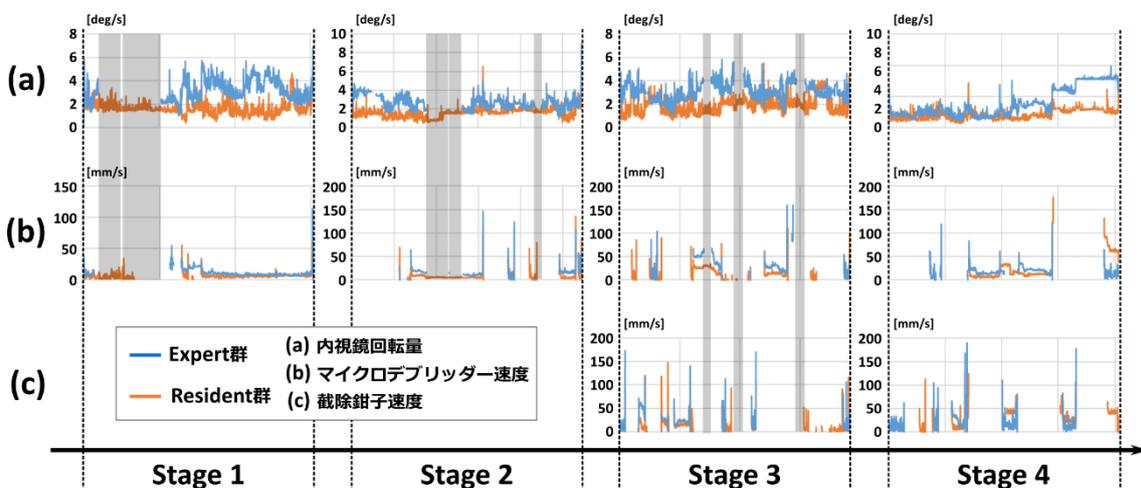


図 5.24 Expert 群と Resident 群の平均化手術プロセスモデルの比較結果

があることが観察できる。Stage 3 以降から使用される截除鉗子の速度の指標についても同様、特に Expert の結果において急峻な速度変化が生じている箇所が多く見られる。

また、図中の黒の網掛けの箇所は Resident の SPM 構成要素の超過箇所、すなわち Expert と Resident の SPM 間で共通箇所として対応付けがされなかった箇所である。したがって、この箇所は Resident による無駄な作業が含まれていた箇所を意味していることから、Resident は特に Stage 1 の前半部分で無駄な作業が多かったことを示している。

#### 5.4.3 考察

まず、図 5.23 の SPM のアラインメント結果に関して述べる。元々症例に応じて血液吸引の回数が多いなどの作業内容のバラつきの大きかった Stage 3 では多少合致していない部分が見られるが、本手法のアラインメントにより Stage 2 や Stage 4 では大部分で垂直方向への同一色のまとまりができています。したがって、本手法により SPM 間での作業内容の共通箇所を着実に適合させることができていることから、手術において解剖部位と作業内容の関係性は高く、患者の解剖部位の個体差など、症例ごとの変動があったとしても本手法によるアラインメントは有効に働くものであると考えられる。ただし、解剖学的な作業位置情報を有していない  $SPM_t$  によるアラインメントにおいても同様に良好な結果が得られていたが、これは本研究で解析の対象とした作業工程及び内容が使用術具とも関連性が高いことが影響していると考えられる。本研究で定義した  $SPM_t$  は一つの術具につき最大 13 個の術具操作情報から成る構成要素によって構成されることから、計測対象の術具を使用している間の作業と使用していない間の作業での情報量には大きな差が生じる。構成要素間の差分に基づくスコアが最も小さくなるように最適な並びを探索する DTW のアルゴリズムの特性を考慮すると、術具使用時と未使用時における  $SPM_t$  の構成要素間の差分スコアは大きくなることが予想されることから、その使用時と未使用時の境界及びタイミングを同定することが可能となる。実際、本研究で

対象とした ESS では、基本的に対象部位の除去作業を計測対象術具であるマイクロデブリッターや截除鉗子、その他の対象部位の剥離作業などでは他の術具が用いられる場面が多く、作業内容と術具の関連性が高かった。そのため、 $SPM_t$ の情報を利用したアラインメントにおいても良好な結果が得られたものと推察される。ただし、 $SPM_t$ が内包する時系列データによる作業特徴量は時に非常に高い変動性を有する場合が生じ得ることを考慮すると、作業内容は合致していたとしても、全く異なる操作を行っている箇所でも共通箇所として認識するといった問題が生じる可能性があるといえる。したがって、こうした誤認識ともとれる問題について考えると、作業位置が類似した箇所を共通箇所として SPM 間の対応付けを図る本手法の方が手術作業工程の比較評価においては有用であると考えられる。

次に、図 5.24 の結果では、クロス・セクションデータからのみでは読み取れない部分が反映されており、この情報を合わせて用いることでより詳細に手術手技の特徴を知ることが可能になると考えられる。例えば、図 5.24 において内視鏡回転量の指標に着目すると、クロス・セクションデータの結果(図 5.16(a))では Expert 群の方が Resident 群よりも有意に大きい値を示す傾向にあったが、Expert 群が常に大きい値を取っているわけではなく、特に Stage 4 などの作業工程では後半部分で値が大きくなり Resident 群との

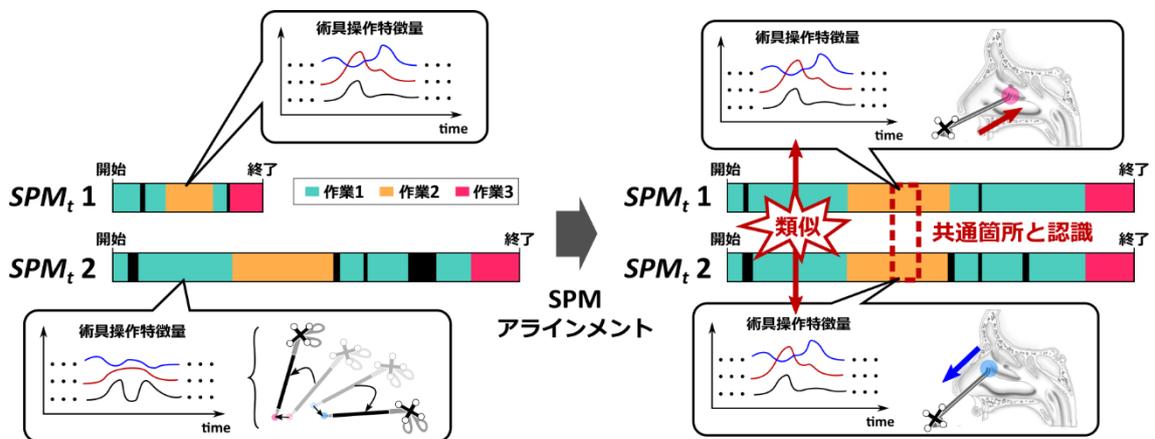


図 5.25 術具操作情報を利用した SPM アラインメントにおける問題

差が顕著に現れる傾向があることがわかる。これは、Expert は作業工程の終盤では除去すべき組織の取り残しの探索・確認や状況把握などの意識が働き、各作業工程の後半に進むにつれて視野をより広くとろうとする傾向があるためであると推察される。また Stage 1 の特に前半部分において、Resident 群の SPM の構成要素が超過した無駄な手術手技の操作が集中しているが、これは Resident の術具操作能力と手術プランニング/判断能力が Expert と比べると未熟である点を反映した結果であると考えられる。実際、この Stage 1 の開始時は扱い方を間違えると重大なミスにつながるマイクロデブリッターを操作するにあたり、Resident はかなり慎重に手技を始めることが多く見受けられた。また、手術経験の浅い Resident の場合、どこからアプローチしてどのように手術を進めるか、といったプランを立てるのに Expert よりも時間を要するため、Stage 1 開始時に作業が停滞する場面も見受けられた。したがって、この Stage 1 の前半部分に SPM 構成要素の超過分が集中し、Expert 群の SPM との共通箇所として認識されなかったこの結果は妥当なものであると考えられる。以上の検証結果を考慮すると、本手法により SPM 中の共通箇所の探索・対応付けは可能であり、またそれにより得られる時系列データの SPM 比較により、手術作業工程中、術者自身の課題がどこにあるのかを詳細に把握することが可能になるといえる。

## 5.5 総合的手術技量の定量化手法の検証

### 5.5.1 評価項目

本研究ではさらに、患者の個体差等の外的因子が含まれる中で、術者の技量値とその技量値に影響を与える手術作業の重要因子が何であることを定量化することを目指す。そのため、ここでも外的因子の含まれる ESS のデータセットを用いて本手法の検証を実施する。具体的には、ESS のデータセットのうち、まず熟練医群のデータセットを基に 4.2.1 項で述べた教師データマップを作成し、評価対象者の  $SPM_t$  とその教師データマップの指標基準値を比較して得られる類似度スコアを目的変数、クロス・セクションデータの分析指標を説明変数として重回帰分析を実施する。これにより、回帰モデルの構築と術者技量値の定量化を行い、適切な結果が得られるかどうかについて検証する。また、この際に得られる回帰モデルの標準偏回帰係数の値を基に、技量値への影響因子及びその影響度の値の妥当性についても評価する。

各被験者の技量値の算出に関しては、一つ抜き交差検証を採用して検証を実施する。すなわち 1 つのテストデータ以外のデータをトレーニングデータとして使用し、回帰モデルを生成してテストデータをそのモデルに当てはめて技量値を算出する、という手順を全てのデータがテストデータとなるまで入れ替えて繰り返す。これにより算出された各被験者の技量値の妥当性について確認・評価する。

### 5.5.2 結果

表 5.7 と表 5.8 に ESS のデータセットを基に作成された教師データを利用して得られた回帰モデルの生成結果と技量推定値算出結果を示す。なお、症例 No. 8, 12, 13 においては Stage 1 の作業工程が元々なかったため、技量推定値算出結果において斜線が引かれているが、それ以外の箇所で斜線が引かれている部分に関しては、術者がその工程

の際に計測対象である術具を適切に使用しなかったなどの理由から除外されたものである。また、この技量値は Expert 群のデータを教師データとして得られる基準値との差分値として定義していることから値が小さいほど技量が高いことを表す。

回帰モデルの生成結果を見ると、説明変数として回帰モデルに含まれる分析指標は工程ごとに大きく異なる結果が得られている。目的変数への影響度を表す標準偏回帰係数に着目すると、Stage 1 では内視鏡-マイクロデブリッダー間の相対速度と術具間角度、Stage 2 ではマイクロデブリッダーの速度、Stage 3 ではマイクロデブリッダーの楕円体体積と截除鉗子の躍度、そして Stage 4 では内視鏡-截除鉗子間の相対速度の指標がそれぞれ影響度の高い指標として示されている。これらの指標は適切に目的変数が設定され

表 5.7 回帰モデル生成結果

Stage 1 鼻茸の除去				Stage 2 鉤状突起の除去			
術具	説明変数		$\beta$	術具	説明変数		$\beta$
E	分布密度	$x_1$	0.142	E	速度	$x_1$	0.062
	楕円体	$x_2$	0.069		M	速度	$x_2$
	相対速度	$x_3$	0.824**	楕円体		$x_3$	0.234
E - M	術具間角度	$x_4$	0.255*	決定係数 $R^2 = 0.547$			
	相対分布密度	$x_5$	0.178				
決定係数 $R^2 = 0.883$							
Stage 3 篩骨胞の除去				Stage 4 第三基板の除去			
術具	説明変数		$\beta$	術具	説明変数		$\beta$
E	速度	$x_1$	0.353*	E	加速度	$x_1$	0.283
	回転量	$x_2$	0.197		回転量	$x_2$	0.040
M	分布密度	$x_3$	0.038	M	分布密度	$x_3$	0.197
	楕円体	$x_4$	0.421*	E - M	術具間距離	$x_4$	0.354
E - M	術具間角度	$x_5$	0.143		相対分布密度	$x_5$	-0.288
	相対分布密度	$x_6$	0.148	E - F	相対速度	$x_6$	0.539**
F	躍度	$x_7$	0.481**		術具間角度	$x_7$	0.078
E - F	画面中心距離	$x_8$	0.223	決定係数 $R^2 = 0.754$			
決定係数 $R^2 = 0.799$							

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$

\*E: 内視鏡, M: マイクロデブリッダー, F: 截除鉗子,  
E - M: 内視鏡-マイクロデブリッダー, E - F: 内視鏡-截除鉗子,

ている場合には、目的変数への影響度、すなわち本研究の場合であれば技量値への影響度を表し、手術作業における潜在的な重要要素を示すものである。ただし、表 5.8 の技量推定値の結果を見てみると、本手法により算出及び推定された技量値では、Expert の方が技量が高いことを示す明確な値は得られなかった。

表 5.8 技量推定値算出結果

Stage 1 鼻茸の除去					Stage 2 鉤状突起の除去				
症例 No.	Expert	技量値	Resident	技量値	症例 No.	Expert	技量値	Resident	技量値
1	A	20.31	G	13.87	1	A	16.19	G	13.66
2	B	18.03	H	13.87	2	B	13.57	H	14.94
3	C	13.97	I	12.91	3	C	17.88	I	13.54
4	D	16.69	J	18.60	4	D	16.66	J	16.20
5	E	21.30	K	17.44	5	E	22.53	K	16.34
6	C	18.11	L	13.82	6	C	17.62	L	13.82
7	A	16.92	H	14.33	7	A	16.31	H	12.83
8	D		M		8	D	18.14	M	14.65
9	C	19.17			9	C	15.16		
	F	15.17				F	14.67		
10	F	16.88	N	16.14	10	F	16.99	N	14.34
11	C	20.03	N	14.36	11	C	20.29	N	17.94
12	F		L		12	F	17.24	L	18.52
13	C		M		13	C	16.68	M	14.25
14	F	22.25	M	18.99	14	F	19.21	M	16.92

Stage 3 篩骨胞の除去					Stage 4 第三基板の除去				
症例 No.	Expert	技量値	Resident	技量値	症例 No.	Expert	技量値	Resident	技量値
1	A	21.17	G	16.44	1	A	21.19	G	18.70
2	B	18.06	H	15.92	2	B	18.72	H	18.84
3	C	18.82	I	17.68	3	C	22.48	I	15.52
4	D	20.62	J	19.80	4	D	19.45	J	16.73
5	E	21.13	K		5	E	23.41	K	
6	C	24.41	L	19.68	6	C	23.66	L	18.68
7	A	19.20	H	16.63	7	A		H	14.19
8	D	23.97	M	17.23	8	D	23.95	M	
9	C	21.50			9	C	21.21		
	F	21.12				F	20.70		
10	F	21.25	N	15.98	10	F	23.62	N	17.58
11	C	25.49	N	18.79	11	C	27.52	N	21.36
12	F	18.95	L	19.83	12	F	22.84	L	25.70
13	C	23.89	M	18.28	13	C	22.23	M	
14	F	19.18	M	20.26	14	F	19.87	M	21.08

### 5.5.3 考察

技量推定値が適切な形で得られなかった要因としては、目的変数の生成に利用した教師データマップの妥当性が不十分であったことが考えられる。まず教師データマップとして技量値を算出するための指標基準値の定義が不適切であった可能性が挙げられる。本研究ではこの基準値が1つの値に収束するものと仮定し、各解剖位置で集約された分析指標に対して外れ値除去と平均化を施すことで得られる値を指標基準値と定義したが、各解剖位置での術具操作の分析指標が1つの値に収束するという仮定自体が不適切であった可能性が考えられる。実際、図 5.24 に示すように、クロスセクションデータにおいて明確に大きい値を示していたマイクロデブリッダーや截除鉗子の速度などの指標も、時系列データとして見ると、高いバラつき・変動性を持っていることがわかる。したがって、こうした分析指標自体が有する変動性を考慮すると、これらの指標は、平均化により1つの値に収束させることで基準値を設定する本手法での利用には不向きであると考えられる。したがって、教師データとしての基準値を設定することを考えた場合には、分析指標の時系列データ自体が持つ要素・情報を平均化などで打ち消すことなく定量化できるような設定の構築が今後は必要になってくると考えられる。ただし、ここでは技量値については適切に設定・導出することは難しかったが、回帰モデルに組み込まれた分析指標に関して言えば、ESSの手術手技を行う上で重要な作業要素を潜在的に表す指標であると考えられる。本研究では、回帰モデルを構築する際、多重共線性を排除するために説明変数間で高相関であった変数は自動的に除外されるように設定した。そのため、残った変数は技量値の正確性に関わらず、他の指標と類似することなく、作業特性を定量化していたことになるため、潜在的に重要な要素としてみなすことは可能であるといえる。したがって、本手法は技量値の教師データを適切に設定することができれば、より明確に技量に影響を及ぼす重要因子の特定につながるものであると考える。

## 第6章 結論

本研究では本来誘導支援に利用されるナビゲーションシステムを手術作業情報記録媒体として応用することで、工学的見地から手術作業工程を分析・評価し、術者の安全かつ効率的な手術の施行を支援するシステムのための要素技術の開発を行った。

第1章では、序論として本研究の背景と目的及び本研究の方針・位置づけについて述べた。特にここでは日本の外科医療を取り巻く現状及び求められる外科医療支援とその実現に必要な要素技術について論じ、(i) 汎用性の向上、(ii) ロバスト性の向上という2つの観点から本研究が目指す分析手法の設計及び到達点について明らかにした。

第2章では、手術作業工程の分析・評価を行う上での基盤となる作業特徴量の定量表現手法について述べた。ここでは多様な術式に対応した表現手法の設計を目的として、ナビゲーションシステムより得られる情報を基に手術作業特徴の定量化するため、時系列的表現法と横断的表現法の2種類の表現手法を提案した。前者の時系列的表現法では高い変動性を有する手術作業工程を経時的に表現するための時系列データによる分析指標、後者の横断的表現法ではより包括的な作業特徴を表現するためのクロス・セクションデータによる分析指標についてそれぞれ定義した。

第3章では、従来困難であった手術作業工程中の詳細な過程の評価を実現するための手法として、第2章にて定義した時系列データによる分析指標を利用した手術作業工程の比較評価手法について提案した。ここではまず、臨床環境下での手術作業工程の比較評価において大きな課題となる患者の個体差による分析条件の変動に対応した上で手術作業工程の形式化及び比較評価を図るため、2種類の手術プロセスモデル、①経時的な術具操作特徴を内包する時系列分析指標から成る手術プロセスモデル、②解剖部位に対する相対的術具先端位置情報から成る手術プロセスモデル、の定義・構築方法について論じた。さらにここでは、異なる手術プロセスモデル間の共通作業箇所探索・対応

付けを可能とする配列アラインメント技術を利用した比較手法を提案し、手術作業工程の比較評価による手技課題特定法について構築した。

第4章ではさらに、各手術作業工程がどの程度良好に行われたのかを総合的技量値として定量化すること、またそれと同時に各手術作業工程における重要な作業要素を特定することを目的として、第2章で定義した分析指標を基に、重回帰分析を利用した技量定量化手法について検討した。具体的には、各解剖部位で取るべき術具操作の基準値をマップ化した教師データマップを導入し、この教師データマップと比較した際の差分値を技量値(目的変数)、クロスセクションデータによる分析指標を説明変数として術者の技量を定量化する回帰モデルの生成法について提案した。

第5章にて、ここまで提案した手術作業工程の分析・評価手法の実現性及び有用性の検証評価を行った。この検証評価のため、本研究では腹腔鏡下胆嚢摘出術と内視鏡下副鼻腔手術の2種類の術式を対象に、臨床医協力の下、実験環境下での模擬手術実験及び臨床研究による手術工程解析実験を実施した。実験を通じてナビゲーションシステムにより計測されたデータセットに基づき、本研究で提案した手法に関してそれぞれの手法の目的に則った分析・評価が行えるかどうかを検証した。検証を行った結果から、本論文の中で定義した分析指標を用いることで潜在的な手術手技の特徴も含めた定量表現が可能であることが示唆された。また、配列アラインメント技術に基づいた手術作業工程の比較手法を用いることで、手術作業工程中のより詳細な手術手技の特徴及び課題の発見が可能になると考えられる。さらに、この検証結果を通じて解剖部位と作業内容の関連性の高さも示唆され、本手法による分析技術は将来的には術中支援のための自動的な手術工程認識のための技術にも応用できるものであると考える。重回帰分析による技量値の定量化に関しては妥当な技量値の導出には至らなかったが、教師データのベースとなるデータセットの更なる蓄積を通じて教師データの最適化を図れば、教師データの設定次第で十分に適切な技量値の算出及びそれに関わる重要な作業要素の特定は可

能になると考えられる。

本研究で構築した手法・システムは手術ナビゲーションシステムがあれば機能するものであることから、今後手術ナビゲーションシステムの発展に付随して適用領域を広め発展させていくことが可能である。当該分野における将来構想の中で検討されている手術支援システムの要素技術として本研究の知見及び理論が役立つことを期待する。

## 引用文献

- [1] P. Mouret, “How I developed laparoscopic cholecystectomy,” *Ann. Acad. Med. Singapore*, Vol. 25, No. 5, pp. 744–747, 1996.
- [2] 日本内視鏡外科学会, “内視鏡外科手術に関するアンケート調査—第13回集計結果報告—,” 日本内視鏡外科学会誌, Vol. 21, No. 6, 2016.
- [3] 橋爪誠, 安全な内視鏡外科手術のための基本トレーニング. 大道学館出版部, 2005.
- [4] OECD, “Health workforce.” *Health Statistics 2015*.
- [5] 厚生労働統計一覧, “医師・歯科医師・薬剤師調査.” 厚生労働省, 平成 6-26 年度.
- [6] 中澤勇一, “医師不足の現状と対策,” 信州医誌, Vol. 58, No. 6, pp. 291–300, 2010.
- [7] 外科医労働環境改善委員会, “日本外科学会会員の労働環境に関するアンケート調査.” 日本外科学会, 平成 19, 23 年度.
- [8] 医療事故情報収集・分析・提供事業, “平成 27 年年報集計報告.” 日本医療機能評価機構.
- [9] 医事関係訴訟委員会, “医事関係訴訟事件統計.” 最高裁判所, 平成 7-27 年度.
- [10] 小林弘幸, “最近の医療訴訟の現状から学ぶ説明義務違反,” 日本外科学会雑誌, Vol. 114, No. 2, p. 77, 2013.
- [11] 出月康夫, “内視鏡下手術のトレーニングと一般外科手術のトレーニング,” 日本内視鏡外科学会雑誌, Vol. 9, No. 3, pp. 288–290, 2004.
- [12] 山下樹里 and 横山和則, “3次元印刷された患者実体モデルによる手術技能研修支援-Realized Virtuality-,” 研究報告グラフィクスとCAD (CG), Vol. 2013, No. 22, pp. 1–6, 2013.
- [13] 杉本真樹, “医用画像情報の可触化による生体質感造形 Bio-Texture Modeling と BIOTEXTURE Wet Model の開発,” 人工臓器, Vol. 44, No. 1, pp. 53–56, 2015.
- [14] 迫井正深, “DPCはいかに誕生したか-DRGとDPCの違い-,” 保健医療科学, Vol. 63, pp. 488–501, 2014.
- [15] 小林利彦, “病院経営戦略を考えるうえでのDPC分析の有用性とその限界,” 日本臨床麻酔学会誌, Vol. 31, No. 1, pp. 050–056, 2011.
- [16] 中川義章, 野口雅滋, and 竹村匡正, “DPC導入後のストラテジー—在院日数短縮が病院収益に及ぼした影響,” 日本医療マネジメント学会雑誌, Vol. 9, No. 4, pp. 511–518, 2009.
- [17] 鈴木利保, “周術期管理の効率化に果たす麻酔科医の役割,” 日本臨床麻酔学会誌, Vol. 33, No. 5, pp. 781–789, 2013.
- [18] F. Lalys and P. Jannin, “Surgical process modelling: a review,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 9, No. 3, pp. 495–511, 2014.

- [19] K. Ahmed, D. Miskovic, A. Darzi, T. Athanasiou, and G. B. Hanna, “Observational tools for assessment of procedural skills: a systematic review,” *Am. J. Surg.*, Vol. 202, No. 4, pp. 469–480.e6, 2011.
- [20] R. Reznick, G. Regehr, H. MacRae, J. Martin, and W. McCulloch, “Testing technical skill via an innovative ‘bench station’ examination,” *Am. J. Surg.*, Vol. 173, No. 3, pp. 226–230, 1997.
- [21] M. C. Vassiliou, L. S. Feldman, C. G. Andrew, S. Bergman, K. Leffondré, D. Stanbridge, and G. M. Fried, “A global assessment tool for evaluation of intraoperative laparoscopic skills,” *Am. J. Surg.*, Vol. 190, No. 1, pp. 107–113, 2005.
- [22] I. Oropesa, P. Sánchez-González, P. Lamata, M. K. Chmarra, J. B. Pagador, J. A. Sánchez-Margallo, F. M. Sánchez-Margallo, and E. J. Gómez, “Methods and tools for objective assessment of psychomotor skills in laparoscopic surgery,” *J. Surg. Res.*, Vol. 171, No. 1, pp. e81-95, 2011.
- [23] G. Forestier, F. Lalys, L. Riffaud, D. Louis Collins, J. Meixensberger, S. N. Wassef, T. Neumuth, B. Goulet, and P. Jannin, “Multi-site study of surgical practice in neurosurgery based on surgical process models,” *J. Biomed. Inform.*, Vol. 46, No. 5, pp. 822–829, 2013.
- [24] G. Forestier, F. Petitjean, L. Riffaud, and P. Jannin, “Non-linear temporal scaling of surgical processes,” *Artif. Intell. Med.*, Vol. 62, No. 3, pp. 143–152, 2014.
- [25] T. Morineau, L. Riffaud, X. Morandi, J. Villain, and P. Jannin, “Work domain constraints for modelling surgical performance,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 10, No. 10, pp. 1589–1597, 2015.
- [26] I. Oropesa, P. Sánchez-González, M. K. Chmarra, P. Lamata, A. Fernández, J. A. Sánchez-Margallo, F. W. Jansen, J. Dankelman, F. M. Sánchez-Margallo, and E. J. Gómez, “EVA: laparoscopic instrument tracking based on Endoscopic Video Analysis for psychomotor skills assessment,” *Surg. Endosc.*, Vol. 27, No. 3, pp. 1029–1039, 2013.
- [27] N. Ahmidi, P. Poddar, J. D. Jones, S. S. Vedula, L. Ishii, G. D. Hager, and M. Ishii, “Automated objective surgical skill assessment in the operating room from unstructured tool motion in septoplasty,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 10, No. 6, pp. 981–991, 2015.
- [28] 中西一浩, 小川龍, 高柳和江, 徳永昭, and 長谷川幸子, “本学におけるクリティカルパスの現状,” *J. Nippon Med. Sch.*, Vol. 67, No. 6, pp. 468–472, 2000.
- [29] D. D. Woods, E. S. Patterson, and E. M. Roth, “Can We Ever Escape from Data Overload? A Cognitive Systems Diagnosis,” *Cogn. Technol. Work*, Vol. 4, No. 1, pp. 22–36.
- [30] D. Katić, J. Schuck, A.-L. Wekerle, H. Kenngott, B. P. Müller-Stich, R. Dillmann, and S. Speidel, “Bridging the gap between formal and experience-based knowledge for context-aware laparoscopy,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 11, No. 6, pp. 881–888, 2016.

- [31] C. Meißner, J. Meixensberger, A. Pretschner, and T. Neumuth, “Sensor-based surgical activity recognition in unconstrained environments,” *Minim. Invasive Ther. Allied Technol. MITAT Off. J. Soc. Minim. Invasive Ther.*, Vol. 23, No. 4, pp. 198–205, 2014.
- [32] S. Franke, J. Meixensberger, and T. Neumuth, “Multi-perspective workflow modeling for online surgical situation models,” *J. Biomed. Inform.*, Vol. 54, pp. 158–166, 2015.
- [33] S. Thiemjarus, A. James, and G.-Z. Yang, “An eye–hand data fusion framework for pervasive sensing of surgical activities,” *Pattern Recognit.*, Vol. 45, No. 8, pp. 2855–2867, 2012.
- [34] C. L. MacKenzie, J. A. Ibbotson, C. G. L. Cao, and A. J. Lomax, “Hierarchical decomposition of laparoscopic surgery: a human factors approach to investigating the operating room environment,” *Minim. Invasive Ther. Allied Technol. MITAT Off. J. Soc. Minim. Invasive Ther.*, Vol. 10, No. 3, pp. 121–127, 2001.
- [35] L. Bouarfa, P. P. Jonker, and J. Dankelman, “Discovery of high-level tasks in the operating room,” *J. Biomed. Inform.*, Vol. 44, No. 3, pp. 455–462, 2011.
- [36] N. Padoy, T. Blum, S.-A. Ahmadi, H. Feussner, M.-O. Berger, and N. Navab, “Statistical modeling and recognition of surgical workflow,” *Med. Image Anal.*, Vol. 16, No. 3, pp. 632–641, 2012.
- [37] T. Neumuth, P. Jannin, G. Strauss, J. Meixensberger, and O. Burgert, “Validation of Knowledge Acquisition for Surgical Process Models,” *J. Am. Med. Inform. Assoc. JAMIA*, Vol. 16, No. 1, pp. 72–80, 2009.
- [38] T. Neumuth, F. Loebe, and P. Jannin, “Similarity metrics for surgical process models,” *Artif. Intell. Med.*, Vol. 54, No. 1, pp. 15–27, 2012.
- [39] S. Schumann, U. Bühligen, and T. Neumuth, “Outcome quality assessment by surgical process compliance measures in laparoscopic surgery,” *Artif. Intell. Med.*, Vol. 63, No. 2, pp. 85–90, 2015.
- [40] D. Katić, C. Julliard, A.-L. Wekerle, H. Kenngott, B. P. Müller-Stich, R. Dillmann, S. Speidel, P. Jannin, and B. Gibaud, “LapOntoSPM: an ontology for laparoscopic surgeries and its application to surgical phase recognition,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 10, No. 9, pp. 1427–1434, 2015.
- [41] S. Speidel, M. Delles, C. Gutt, and R. Dillmann, “Tracking of Instruments in Minimally Invasive Surgery for Surgical Skill Analysis,” in *Medical Imaging and Augmented Reality*, G.-Z. Yang, T. Jiang, D. Shen, L. Gu, and J. Yang, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 148–155.
- [42] A. Nara, K. Izumi, H. Iseki, T. Suzuki, K. Nambu, and Y. Sakurai, “Surgical Workflow Monitoring Based on Trajectory Data Mining,” in *New Frontiers in Artificial Intelligence*, T. Onada, D. Bekki, and E. McCready, Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 283–291.

- [43] L. Bouarfa and J. Dankelman, “Workflow mining and outlier detection from clinical activity logs,” *J. Biomed. Inform.*, Vol. 45, No. 6, pp. 1185–1190, 2012.
- [44] F. Lalys, D. Bouget, L. Riffaud, and P. Jannin, “Automatic knowledge-based recognition of low-level tasks in ophthalmological procedures,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 8, No. 1, pp. 39–49, 2013.
- [45] Y. Xiao, P. Hu, H. Hu, D. Ho, F. Dexter, C. F. Mackenzie, F. J. Seagull, and R. P. Dutton, “An algorithm for processing vital sign monitoring data to remotely identify operating room occupancy in real-time,” *Anesth. Analg.*, Vol. 101, No. 3, p. 823–829, table of contents, 2005.
- [46] M. Kranzfelder, A. Schneider, A. Fiolka, S. Koller, S. Reiser, T. Vogel, D. Wilhelm, and H. Feussner, “Reliability of sensor-based real-time workflow recognition in laparoscopic cholecystectomy,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 9, No. 6, pp. 941–948, 2014.
- [47] T. Suzuki, K. Yoshimitsu, M. Tamura, Y. Muragaki, and H. Iseki, “Video Information Management System for Information Guided Neurosurgery,” in *Computer Aided Surgery*, T. Dohi and H. Liao, Eds. Springer Japan, 2012, pp. 75–82.
- [48] A. James, D. Vieira, B. Lo, A. Darzi, and G. Z. Yang, “Eye-gaze driven surgical workflow segmentation,” *Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv. MICCAI Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Interv.*, Vol. 10, No. Pt 2, pp. 110–117, 2007.
- [49] E. F. Hofstad, C. Våpenstad, M. K. Chmarra, T. Langø, E. Kuhry, and R. Mårvik, “A study of psychomotor skills in minimally invasive surgery: what differentiates expert and nonexpert performance,” *Surg. Endosc.*, Vol. 27, No. 3, pp. 854–863, 2013.
- [50] M. S. Holden, T. Ungi, D. Sargent, R. C. McGraw, E. C. S. Chen, S. Ganapathy, T. M. Peters, and G. Fichtinger, “Feasibility of real-time workflow segmentation for tracked needle interventions,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 61, No. 6, pp. 1720–1728, 2014.
- [51] S. K. Jun, M. S. Narayanan, P. Agarwal, A. Eddib, P. Singhal, S. Garimella, and V. Krovi, “Robotic Minimally Invasive Surgical skill assessment based on automated video-analysis motion studies,” in *2012 4th IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 2012, pp. 25–31.
- [52] R. Kumar, A. Jog, A. Malpani, B. Vagvolgyi, D. Yuh, H. Nguyen, G. Hager, and C. C. G. Chen, “Assessing system operation skills in robotic surgery trainees,” *Int. J. Med. Robot. Comput. Assist. Surg. MRCAS*, Vol. 8, No. 1, pp. 118–124, 2012.
- [53] F. Despinoy, D. Bouget, G. Forestier, C. Penet, N. Zemiti, P. Poignet, and P. Jannin, “Unsupervised Trajectory Segmentation for Surgical Gesture Recognition in Robotic Training,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 63, No. 6, pp. 1280–1291, 2016.
- [54] T. Neumuth, N. Durstewitz, M. Fischer, G. Strauss, A. Dietz, J. Meixensberger, P. Jannin, K. Cleary, H. U. Lemke, and O. Burgert, “Structured recording of intraoperative surgical workflows,” 2006, Vol. 6145, p. 61450A–61450A–12.

- [55] S. S. Chopra, S. C. Schmidt, R. Eisele, U. Teichgräber, I. Van der Voort, C. Seebauer, F. Streitparth, and G. Schumacher, “Initial results of MR-guided liver resection in a high-field open MRI,” *Surg. Endosc.*, Vol. 24, No. 10, pp. 2506–2512, 2010.
- [56] K. Konishi, M. Nakamoto, Y. Kakeji, K. Tanoue, H. Kawanaka, S. Yamaguchi, S. Ieiri, Y. Sato, Y. Maehara, S. Tamura, and M. Hashizume, “A real-time navigation system for laparoscopic surgery based on three-dimensional ultrasound using magneto-optic hybrid tracking configuration,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 2, No. 1, pp. 1–10, 2007.
- [57] 中村亮一, 北角権太郎, 長村伸一, 田辺良子, 須藤政光, 勝池康允, 望月剛, and 千葉敏雄, “術中リアルタイム 3D 超音波診断画像を用いた胎児外科手術ナビゲーションの開発,” *J. Jpn. Soc. Comput. Aided Surg. JJSCAS*, Vol. 13, No. 2, pp. 87–95, 2011.
- [58] T. Sugino, H. Kawahira, and R. Nakamura, “Surgical task analysis of simulated laparoscopic cholecystectomy with a navigation system,” *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, Vol. 9, No. 5, pp. 825–836, 2014.
- [59] T. Yamaguchi, T. Sugino, H. Kawahira, and R. Nakamura, “Proposal and evaluation of surgical process analysis based on left handwork information in laparoscopic surgery using surgical navigation system,” presented at the The 11th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Singapore, 2015.
- [60] C. Loukas, C. Rouseas, and E. Georgiou, “The role of hand motion connectivity in the performance of laparoscopic procedures on a virtual reality simulator,” *Med. Biol. Eng. Comput.*, Vol. 51, No. 8, pp. 911–922, 2013.
- [61] R. Nakamura, T. Aizawa, Y. Muragaki, T. Maruyama, and H. Iseki, “Automatic surgical workflow estimation method for brain tumor resection using surgical navigation information,” *J. Robot. Mechatron.*, Vol. 24, No. 5, pp. 791–801, 2012.
- [62] 児玉悟, “内視鏡下鼻内副鼻腔手術の基本手技と副損傷時の対応,” 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 119, No. 7, pp. 974–977, 2016.
- [63] P. J. Clark and F. C. Evans, “Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations,” *Ecology*, Vol. 35, No. 4, pp. 445–453, 1954.
- [64] P. J. Clark and F. C. Evans, “Generalization of a Nearest Neighbor Measure of Dispersion for Use in K Dimensions,” *Ecology*, Vol. 60, No. 2, pp. 316–317, 1979.
- [65] 平岡和幸 and 堀玄, *プログラミングのための確率統計*. 東京: オーム社, 2009.
- [66] Y. Lee, “A Nearest-Neighbor Spatial-Association Measure for the Analysis of Firm Interdependence,” *Environ. Plan. A*, Vol. 11, No. 2, pp. 169–176, 1979.
- [67] 鈴木幸仁, 井筒正義, 釜道紀浩, 石川潤, and 古田勝久, “両手操作時の操作能力熟達度の定量評価に関する研究,” *日本機械学会論文集 C 編*, Vol. 77, No. 776, pp. 1413–1428, 2011.
- [68] 山下樹里, 横山和則, 熊谷徹, 友田幸一, 小西琢, and 村田英之, “仮想の鏡「ハイパ

- ーミラー」を用いた内視鏡下鼻内手術の遠隔手技指導実験(<特集>臨床現場の VR),”  
日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 4, pp. 445–454, 2009.
- [69] G. Forestier, F. Lalys, L. Riffaud, B. Trelhu, and P. Jannin, “Classification of surgical processes using dynamic time warping,” *J. Biomed. Inform.*, Vol. 45, No. 2, pp. 255–264, 2012.
- [70] H. Sakoe and S. Chiba, “Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition,” *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.*, Vol. 26, No. 1, pp. 43–49, 1978.
- [71] S. B. Needleman and C. D. Wunsch, “A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins,” *J. Mol. Biol.*, Vol. 48, No. 3, pp. 443–453, 1970.
- [72] F. Petitjean, A. Ketterlin, and P. Gançarski, “A global averaging method for dynamic time warping, with applications to clustering,” *Pattern Recognit.*, Vol. 44, No. 3, pp. 678–693, 2011.
- [73] 前野昌弘 and 三国彰, 図解でわかる 統計解析—データの見方・取り方から回帰分析・多変量解析まで. 日本実業出版社, 2000.
- [74] 長谷川勝也, *Excel 統計解析—回帰分析編*. 東京: 共立出版, 1995.
- [75] S. Chatterjee and A. S. Hadi, *Regression Analysis by Example*, 5 edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012.
- [76] 北野正剛 and 白石憲男, 消化器内視鏡外科ベーシックテクニック. メジカルビュー社, 2008.
- [77] C. R. Maurer, J. M. Fitzpatrick, M. Y. Wang, R. L. Galloway, R. J. Maciunas, and G. S. Allen, “Registration of head volume images using implantable fiducial markers,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, Vol. 16, No. 4, pp. 447–462, 1997.
- [78] 高橋茂樹 and 渡辺建介, *STEP 耳鼻咽喉科*, 第3版. 東京: 海馬書房, 2013.
- [79] 森山寛, “内視鏡下鼻内副鼻腔手術: 進歩と定着,” *耳喉頭頸*, Vol. 68, pp. 287–298, 1996.
- [80] 春名眞一, “ESS における合併症対策,” *日本耳鼻咽喉科学会会報*, Vol. 118, No. 6, pp. 736–744, 2015.
- [81] 唐木將行 and 森望, “眼窩病変に対する内視鏡下経副鼻腔眼窩アプローチ法の適応と限界,” *頭頸部外科*, Vol. 19, No. 1, pp. 13–18, 2009.
- [82] 鴻信義, “頭蓋底疾患に対する内視鏡下鼻内手術,” *耳鼻咽喉科展望*, Vol. 52, No. 1, pp. 43–47, 2009.
- [83] R. Eliashar, J.-Y. Sichel, M. Gross, E. Hocwald, I. Dano, A. Biron, A. Ben-Yaacov, A. Goldfarb, and J. Elidan, “Image guided navigation system—a new technology for complex endoscopic endonasal surgery,” *Postgrad. Med. J.*, Vol. 79, No. 938, pp. 686–690, 2003.
- [84] 重田泰史, 大櫛哲史, 吉川衛, 飯田誠, 中山次久, 浅香大也, 濱孝憲, 森恵莉, 小島

- 純也, 吉田拓人, 飯村慈朗, 和田弘太, 松脇由典, 柳清, 森山寛, and 鴻信義, “内視鏡下鼻内手術における術中副損傷および術後合併症の検討,” 日本耳鼻咽喉科学會會報, Vol. 115, No. 1, pp. 22–28, 2012.
- [85] S. J. Zinreich, S. A. Tebo, D. M. Long, H. Brem, D. E. Mattox, M. E. Loury, C. A. vander Kolk, W. M. Koch, D. W. Kennedy, and R. N. Bryan, “Frameless stereotaxic integration of CT imaging data: accuracy and initial applications,” *Radiology*, Vol. 188, No. 3, pp. 735–742, 1993.
- [86] 友田幸一 and 馬場一泰, “耳鼻咽喉科ナビゲーション手術の現状,” 耳鼻咽喉科展望, Vol. 55, No. 5, pp. 392–399, 2012.
- [87] J. A. Stankiewicz, D. Lal, M. Connor, and K. Welch, “Complications in endoscopic sinus surgery for chronic rhinosinusitis: a 25-year experience,” *The Laryngoscope*, Vol. 121, No. 12, pp. 2684–2701, 2011.
- [88] 春名眞一, 友田幸一, 黒野祐一, 平川勝洋, 三輪高喜, 松根彰志, 鴻信義, 朝子幹也, 竹内裕美, 竹中洋, and 岡本美孝, “慢性副鼻腔炎に対する内視鏡下副鼻腔手術—新たな手術分類とその評価—,” 日本鼻科学会会誌, Vol. 52, No. 2, pp. 143–157, 2013.
- [89] 清水猛史, “Cadaver dissection による内視鏡下鼻副鼻腔手術のトレーニング,” 耳鼻咽喉科臨床, Vol. 97, No. 9, pp. 840–841, 2004.
- [90] 鴻信義, “鼻副鼻腔炎に対する内視鏡下鼻内手術,” 耳鼻咽喉科展望, Vol. 56, No. 3, pp. 96–103, 2013.
- [91] H. R. Stammberger, D. W. Kennedy, and Anatomic Terminology Group, “Paranasal sinuses: anatomic terminology and nomenclature,” *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol. Suppl.*, Vol. 167, pp. 7–16, 1995.
- [92] JOHNS 編集委員会, *JOHNS 第31 巻第2 号(2015 2) 特集: よくわかる鼻副鼻腔手術*. 東京: 東京医学社, 2015.
- [93] 山崎ももこ, 櫻井結華, 小宮清, 小島博己, 宮本康裕, 俵道淳, 肥塚泉, and 森山寛, “卒後教育における「技術の可視化」の試み: 手術技術の要素化と定量化,” 耳鼻咽喉科展望, Vol. 57, No. 5, pp. 265–275, 2014.

## 本論文に関する研究業績

### A. 原著論文

1. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Surgical task analysis of simulated laparoscopic cholecystectomy with a navigation system”, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Vol. 9, No. 25, pp. 825–836, 2014.
2. 杉野貴明, 久保木章仁, 中山次久, 大村和弘, 浅香大也, 山口智子, 小島博巳, 鴻信義, 中村亮一, “ナビゲーション情報を利用した内視鏡下副鼻腔手術における内視鏡操作の定量分析”, *日本コンピュータ外科学会誌*, Vol. 17, No. 4, pp. 333–342, 2015.
3. T. Sugino, R. Nakamura, A. Kuboki, O. Honda, M. Yamamoto, N. Ohtori, “Quantitative analysis of a camera operation for endoscopic sinus surgery using a navigation information: clinical study”, *Journal of Japan Society of Computer Aided Surgery*, Vol. 19, No. 1, pp. 17–26, 2017.
4. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Comprehensive surgical task analysis on image-guided surgery”, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*, 2017 (Accepted).

### B. 商業誌

1. 中村亮一, 杉野貴明, “外科手術を可視化する：術中情報解析による手術工程解析・作業自動評価システム”, *化学工業*, Vol. 65, No. 8, pp. 610–616, 2014.
2. 中村亮一, 杉野貴明, 本多有芽, 川平洋, “計算解剖学モデルを応用したナビゲーション誘導下腹腔鏡下手術の自動工程分析・評価”, *Innervision*, Vol. 29, No. 11, p. 56, 2014.
3. 中村亮一, 杉野貴明, 伊藤香織, 川平洋, 五十嵐辰男, “手術ナビゲーションによる解剖と手技の可視化”, *メディカル&イメージング*, オプトロニクス社, No. 2, pp. 36–42, 2015.

## C. 本研究に関する学会発表

### 【国際学会】

1. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Analysis of the surgical workflow during laparoscopic cholecystectomy using surgical navigation information”, The 8th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2012), Beijing, China, 2012.
2. T. Sugino, R. Nakamura, “Quantitative surgical workflow analysis and evaluation of laparoscopic surgery using surgical navigation system”, The 9th Asian Conference on Computer Aided Surgery (ACCAS 2013), Tokyo, Japan, 2013.
3. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Surgical workflow analysis during laparoscopic cholecystectomy using surgical navigation system as a record medium”, The 27th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2013), Heidelberg, Germany, 2013.
4. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Approach for modeling surgical processes in laparoscopic surgery based on navigation information”, The 28th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2014), Fukuoka, Japan, 2014.
5. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Surgical workflow analysis method for laparoscopic surgery using navigation information: modeling and visualization of surgical process”, Fifth Workshop on Modeling and Monitoring of Computer Assisted Interventions (M2CAI 2014), Boston, USA, 2014.
6. T. Sugino, H. Kawahira, R. Nakamura, “Surgical task evaluation by an operational region analysis during laparoscopic cholecystectomy using navigation system information”, The 29th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS 2015), Barcelona, Spain, 2015.

### 【国内学会】

1. 杉野貴明, 川平洋, 相沢知明, 中村亮一, “ナビゲーション情報を利用した手術工程解析：腹腔鏡下胆嚢摘出術への応用”, 第 51 回日本生体医工学大会, 福岡, 2012.

2. 杉野貴明, 川平洋, 中村亮一, “手術ナビゲーションシステムを記録媒体として用いた腹腔鏡下胆嚢摘出術の工程解析法”, 第 21 回日本コンピュータ外科学会大会, 徳島, 2012.(2012 年度講演論文賞受賞)
3. 杉野貴明, 川平洋, 中村亮一, “手術ナビゲーションシステムを作業記録装置として利用した腹腔鏡下胆嚢摘出術の手術工程解析法の提案と評価”, 第 25 回日本内視鏡外科学会総会, 横浜, 2012.
4. 杉野貴明, 川平洋, 中村亮一, “ナビゲーション装置を応用した内視鏡下手術の手術工程解析による定量的作業評価手法の開発”, 第 26 回日本内視鏡外科学会総会, 福岡, 2013.
5. 杉野貴明, 川平洋, 中村亮一, “内視鏡下手術の手技習熟支援に向けた手術ナビゲーション情報ベースの定量的作業解析法”, 第 27 回日本内視鏡外科学会総会, 盛岡, 2014.
6. 杉野貴明, 久保木章仁, 中山次久, 大村和弘, 浅香大也, 山口智子, 小島博巳, 鴻信義, 中村亮一, “内視鏡下副鼻腔手術における定量的手術技能分析法の開発～ナビゲーション情報を用いた内視鏡操作の定量分析～”, 第 24 回日本コンピュータ外科学会大会, 東京, 2015.
7. 杉野貴明, 久保木章仁, 中山次久, 山口智子, 鴻信義, 中村亮一, “手術ナビゲーション情報を用いた手技定量評価手法：内視鏡下副鼻腔手術への応用”, 第 28 回日本内視鏡外科学会総会, 大阪, 2015.

#### D. 特許

1. 発明の名称：手術工程解析プログラム  
発明者：中村亮一, 杉野貴明  
特許権者：国立大学法人 千葉大学  
特許出願公開番号：2014-147541 公開日：2014 年 8 月 21 日

## E. 受賞等

1. 日本コンピュータ外科学会 2012 年度 講演論文賞
2. 公益財団法人 内藤記念科学振興財団 2014 年度内藤記念若手研究者海外派遣助成金(春季)
3. 公益財団法人 NEC C&C 財団 2015 年度前期 国際会議論文発表者助成
4. 千葉大学ベンチャービジネスラボラトリー なのはなコンペ 2015 なのはな賞/特別賞(日本インサイトテクノロジー賞/絆賞)
5. 公益財団法人 立石科学技術振興財団 2016 年度 研究助成(C)

## 謝辞

本論文に関する研究は、千葉大学大学院工学研究科及びフロンティア医工学センター 中村亮一先生が指揮する先端治療工学研究室において実施されました。日頃より丁寧なご指導を賜り、多くの貴重な学びと経験の機会を与えて下さいました、主任指導教員の千葉大学フロンティア医工学センター 中村亮一准教授に深い感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

ご多忙の中、本学位審査をお引き受け頂き、貴重なご指導を賜りました千葉大学フロンティア医工学センター 五十嵐辰男教授、同 羽石秀昭教授、千葉大学大学院工学研究科デザイン科学専攻 下村義弘教授に厚く御礼申し上げます。

本論文の腹腔鏡下胆嚢摘出術に関する研究の実施に際して貴重なご助言と温かいご支援を賜りました、千葉大学フロンティア医工学センター 川平洋准教授をはじめ、九州大学大学院医学研究院 橋爪誠教授、同 植村宗則助教(現 日本医療研究開発機構 産学連携部 主幹)に厚く御礼申し上げます。

また、本論文の内視鏡下副鼻腔手術に関する研究の実施に際し、臨床データの提供と多大なご協力及びご助言を賜りました、東京慈恵会医科大学耳鼻咽喉科学講座 鴻信義教授、同 久保木章仁講師をはじめ、当講座の医局の先生方に厚く御礼申し上げます。

また、学部より今日まで多くのご指導とご支援を賜りました、千葉大学フロンティア医工学センター 川村和也助教をはじめ、千葉大学メディカルシステム工学科、千葉大学大学院工学研究科人工システム科学専攻メディカルシステムコース、フロンティア医工学センターの先生方、職員の皆様に厚く御礼申し上げます。

先端治療工学研究室をはじめ、メディカルシステムコースの先輩方、同期、後輩の皆様には多くの素晴らしい時間を共有させていただき、互いに切磋琢磨したことが何よりの励みになりました。多くの温かいご支援を頂きましたことに深い感謝の意を表します。

最後になりましたが、家族の理解と応援なくして学位取得は成し得ませんでした。この場を借りて心から感謝申し上げます。

なお、本研究は千葉大学ベンチャービジネスラボラトリー なのはなコンペ 2015 研究助成と立石科学技術振興財団 2016 年度研究助成(c)の支援を受けて実施されました。