

高密度情報誘導手術環境を支援する手術工程解析法の開発

Surgical process analysis for supporting complex information-guided surgery environment

2001011



研究代表者	千葉大学大学院 工学研究科	特任准教授	中村 亮一
共同研究者	東京女子医科大学 先端生命医学研究所	特任准教授	鈴木 孝司

[研究の目的]

複雑かつ並列に複数のタスクの流れる作業環境において、その作業の効率を最適化し、最小のコストで効用を最大化するためには、作業の要素解析と工程管理により、それぞれの作業ステージを最適化することが重要である。本研究では、この技術を複雑化する外科医療の管理体制に応用し、医療の品質向上（効用・効率・安全の向上）を達成するための手術工程解析技術の創成を目的とする。品質管理・省力化のための機械情報工学的技術をシステムと人間の調和的技術に昇華して医療に導入し、過酷な外科医療環境によりよい業務環境と安全で効果の高い治療結果をもたらすことを目指す。具体的には

- [1] 術野内作業から手術の工程を推測するナビゲーションベースの情報分析システム
- [2] 術野外の人員・器材の動体から手術の工程を推測する画像計測ベースの情報分析システム

の構築を目標とし、その基礎的要素技術の研究を行った。

[研究の内容・成果]

1. 手術ナビゲーション情報を用いた手術工程分析^[1-4]

手術ナビゲーションを用いた手術では、ナビは患者の体内地図と術者の持つ術具の位置関係

をリアルタイムに表示することで治療を支援するが、同時にシステム内には術野のデジタル3Dデータ（3次元医用画像）と術具位置姿勢データ（手術開始時からその時点まで）が蓄積されている。これらはすなわち術者がそれまでに術野のどこで作業を行ってきたかの記録となるため、治療ステージによって作業位置が変化する手術の場合、このデータを分析することで治療の進捗状況と経過時間を把握することができる。本研究ではこの情報を用いた術野内での作業イベントの自動記録・分析法について研究を行った。

1.1 ナビゲーションログによる作業進捗計測と終了時刻予想

本研究では手術ナビゲーションシステムを併用した術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術を対象術式とし、脳腫瘍を摘出する作業の進捗把握、そして摘出作業が終わり、脳腫瘍が摘出される時刻の予測を行った。一般的な脳腫瘍摘出術の術式では脳腫瘍を周囲の正常な組織から剥がす様に剥離と止血作業を進め、腫瘍を取り出す。ゆえに術具先端の位置座標ログデータは画像上の腫瘍表面を中心に分布している。この特性より、進捗解析アルゴリズムをFig.1のように定義した。

Step1ではMRI画像群から脳腫瘍領域を閾値処理等を用いてセグメンテーションし、エッジ検出により脳腫瘍表面データ： $S(x, y, z)$ を定義する。また、腫瘍近傍のログのみを解析対

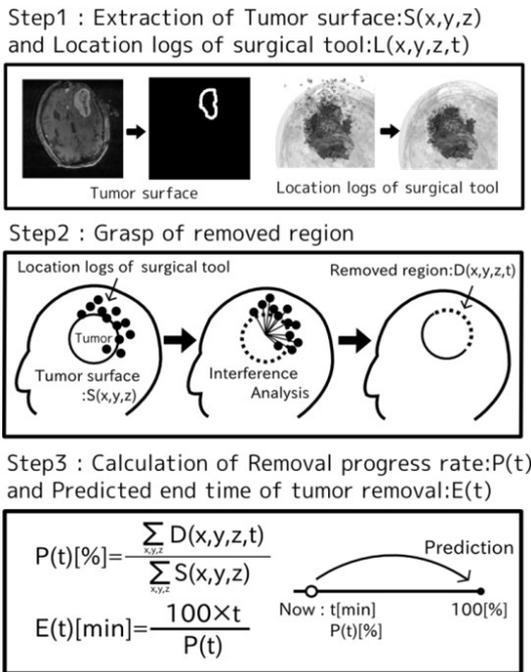


Fig. 1 Process progress analysis algorithm

象とするため、領域設定により術具位置ログデータ： $L(x, y, z, t)$ を抽出した。Step2では脳腫瘍表面と術具位置ログデータの干渉解析を行い、摘出作業が完了した腫瘍表面領域： $D(x, y, z, t)$ を定義する。術具位置ログデータは主に腫瘍表面の外側に分布していることから、術具位置ログデータと腫瘍の重心を繋ぐ直線と干渉した脳腫瘍表面領域を作業の終了した領域とした。Step3では摘出進捗度、腫瘍摘出予測時刻を算出した。摘出進捗度は腫瘍領域全体に対する作業終了領域の割合から算出した。腫瘍摘出予測時刻は摘出作業全体としては摘出進捗度はおおよそ等速に増加すると仮定し、現在の摘出進捗度と作業時間から、摘出進捗度が100%に到達するまでにかかる時間を予測し、時刻を求めた。解析アルゴリズムを実装したシステムを試作し、東京女子医科大学病院インテリジェント手術室における術中MRI誘導下脳腫瘍摘出術4例より得られたデータを用いて評価を行った (Fig. 2)。

摘出進捗度評価、腫瘍摘出時刻予測を行った結果の1例を Fig. 3 に示す。Fig. 3: (a)の摘出進捗度評価では、腫瘍の摘出作業の進捗を自動

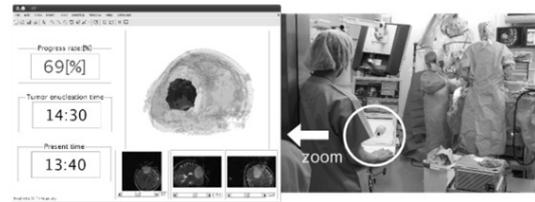
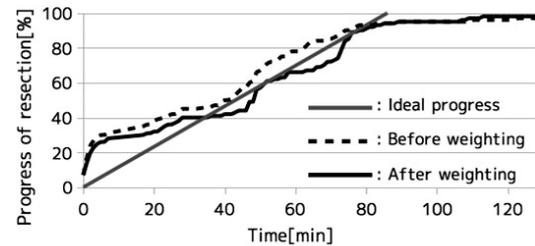
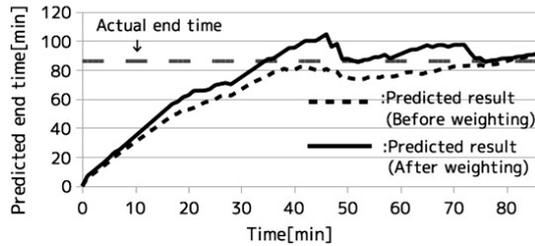


Fig. 2 Overview of process progress analysis system



(a) Progress of tumor resection



(b) Prediction of end time of resection

Fig. 3 Example of analysis results

かつ定量的に把握できた。また、本予測アルゴリズムは摘出進捗の増加が一定であるという仮定に基づいているが、摘出進捗の変化量は作業の経過に伴って小さくなる傾向が見られた。そこで摘出進捗が一定速度で変化するように腫瘍の深淺情報を用いて腫瘍データの重みづけ（深部ほど単位表面積あたりの進捗増加量を多くする）をしたところ (Fig. 4)、本予測アルゴリズムにおける理想的な進捗変化に近づいた。この重みづけした腫瘍表面データを用いて腫瘍摘出

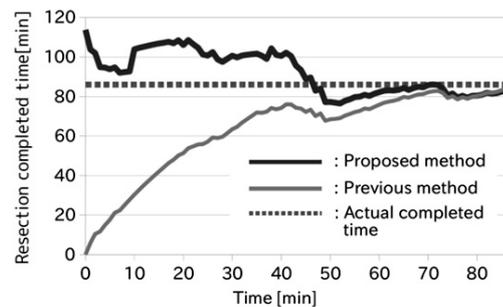


Fig. 4 Example of analysis results with estimated mean incremental speed of progress

時刻予測を行ったところ、Fig. 3: (b) では中盤以降、実際の腫瘍摘出時刻付近の予測結果が得られた。この症例では摘出作業終了時刻（開始 86 分後）を、摘出開始 20 分後以降では術中を通じ平均約 8 分の誤差で予測可能であった。解析した 4 症例のうち、ナビゲーションデータの記録精度・量が十分であった 3 症例においては平均約 89 分間の摘出作業の終了時刻を平均約 15 分の誤差で予測できた。

1.2 標準術式データ推定による高精度化^[5]

前項にて開発した手法は、術中の作業速度のみにより終了時刻を予測するため、局所的な速度変化に多く依存して予測結果が変化するほか、手術の前半では予測の精度が見込めないという問題点があった。そこで我々は前項の方法に統計的に求めた主要の大きさに基づく標準的な摘出所要時間のデータを加味した新しい予測手法を開発した。

まず、17 症例の脳腫瘍摘出術の腫瘍サイズと摘出所要時間のデータの主成分解析により、腫瘍サイズに基づく推定平均摘出所用時間を統計的に求め、これらから摘出進捗速度 V_e [%/min] を求めた。この速度と術中の瞬間摘出進捗速度

$$v_i(t)[\%/min] = \begin{cases} \frac{p(t)}{t} & (t < 30) \\ \frac{p(t) - p(t-30)}{30} & (t > 30) \end{cases}$$

を元に、終了時刻予測に用いる摘出進捗推測速度を

$$V(t)[\%/min] = \begin{cases} V_e & (t < 10) \\ \frac{V_e + V_i(t)}{2} & (t > 10) \end{cases}$$

と適宜し、摘出進捗度が r に到達する時刻を

$$E(t, r)[min] = t + \frac{r - P(t)}{V(t)} \quad (5)$$

として求めた。

結果例を Fig. 4 に示す。先の手法に比較し、摘出術前半からより精度の高い終了時刻予測が

出来ていることが確認された。

2. 複数カメラによる手術室人動計測・解析^[6,7]

手術ナビゲーションにより得られる手術情報は術野内の術者の作業のみであるが、チームによる複雑な作業である外科手術においては、術野外での状況、具体的には他の医療スタッフ・医療機器の状況・位置等が治療ステージによって変化する。よってこれらの動的情報を取得することでステージの分類が可能と考えられる。そこでこれらの情報を獲得するために、手術室内に手術ベッド周辺の映像を取得するカメラを複数台設置し、死角を低減した映像から人員・機器の動的な位置情報を獲得する。本研究では特に、動画像のステレオ差分処理により移動物体の自動抽出とラベリングを行う手法について研究を行った。

まず手術室に設置された任意の 2 台のカメラの事前のキャリブレーション情報から内部パラメータと 2 カメラ相対位置情報を取得する。次に動体がない状態で各カメラにて取得した画像から、手術室と同系色の手術着を着用した動体を区別するためにパラメータを適した値に設定した背景画像を構築する。この背景画像情報を元に、背景差分処理により動体の検出を行い、検出した動体の特徴点を抽出する。複数動体の区別および特徴点計測エラー除去のために、特徴点を中心とした検索範囲内に前フレームの特徴点を検索し、前フレームの動体の特徴点との連続性を評価し、同一の動体と識別された特徴点データをつなぎ、各カメラの 2 次元動線を取得する。2 カメラから得られた 2 次元動線を 2 カメラ相対位置情報を元に三角測量法により統合し、3 次元動線を算出する。

本手法では手術室に設置された複数のカメラから自由にステレオカメラ 3 次元計測環境を構築することが出来るため、適宜計測用カメラを切り替える・並列計測を行うことにより、死角や複数動体の重なりによるオクルージョンを低減した 3 次元計測が可能である。

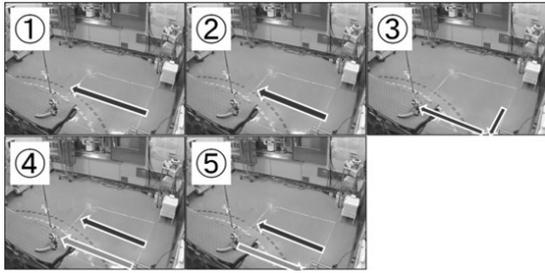


Fig. 5 Experiment walking pattern

本システムが実際の手術室において3次元動線取得可能か評価する。被験者4人に対し、手術室の床やドレープと同系色の手術着、靴カバーを着用した被験者が手術室を歩行する様子を2台のカメラで同時に記録し、動体検出を行い、3次元動線を算出した。実験は以下の5種類の歩行を行った (Fig. 5)。

実験①：1人が直線2mの歩行。

実験②：実験①に屈伸運動を合わせた歩行。

実験③：奥に背景となった被験者がいる場面において、被験者1人が直線1m-90°方向転換-直線1mの歩行。

実験④：2人が同方向に直線2mの歩行。

実験⑤：2人が逆方向に直線2mの歩行。

評価実験結果の一例を以下に示す。入力画像から環境と同系色の手術着を着用した動体である人物の検出が可能であった。2次元動線・3次元動線の取得結果の一例として実験③ (Fig. 6)、および実験④ (Fig. 7) の結果を以下に示す。

5種類の歩行全ての2次元動線・3次元動線において動線の直線性が見られた。Fig. 6-aより、指示した方向転換の動線も取得可能であった。また Fig. 7-aより、被験者2人を識別した動線取得が確認できたが、歩行開始時・歩行終了時において一方の被験者のデータ数が他方の被験者に比べて少なかった。Fig. 6-bより、方向転換時の様子が確認できたが、グラフの直交性には差異がみられた。Fig. 7-bより、同距離(2m)を歩行した被験者2人の歩行距離に違いが見られた。また、Fig. 7より、複数人の計測の場合、人の重なりによるオクルージョンに

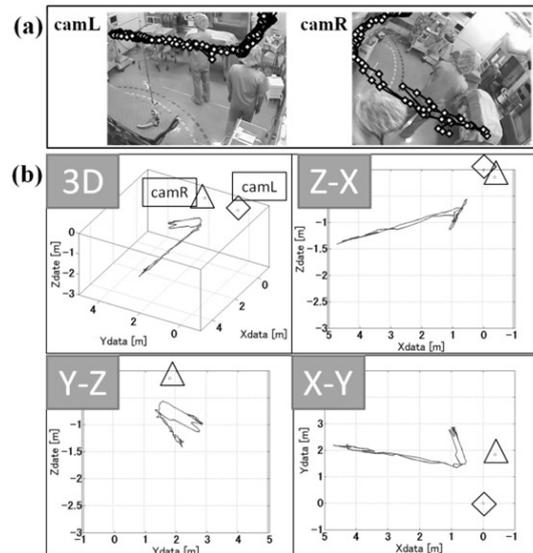


Fig. 6 Trail analyzing result of 2D/3D model (-1-)

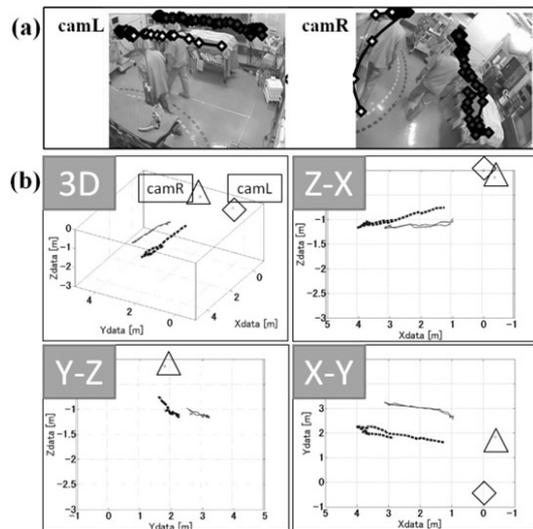


Fig. 7 Trail analyzing result of 2D/3D model (-2-)

より、歩行時の全データの取得は困難であった。また3次元の直交性に差異がみられた。

[今後の研究の方向, 課題]

手術ナビゲーション情報を利用することにより、手術環境への影響を最小限に抑え、脳腫瘍の摘出進行を自動かつ定量的に解析することができた。術式の誘導装置として利用されている手術ナビゲーションシステムが、手術工程解析においても有用である可能性が示唆された。手術ナビゲーションシステムを併用した術式では

術者の作業情報を正確かつリアルタイムに獲得できることから、本研究で提案したナビゲーション情報による解析法が、術中の作業評価における解析要素の重要な1つとなることが期待できる。今後は症例数を増やし詳細な分析を深めると共に、解析アルゴリズムを改良し、分析精度向上を目指す。

また医用画像ベースのナビゲーションシステムの問題点として、術中の臓器変形・移動による位置情報の信頼性低下があげられる。これに対する対策として、医用画像情報に加え術中リアルタイムに臓器運動等を補償する計測・分析システムが必須となる。本研究課題では対象を脳腫瘍外科としていたためこれら変形・移動の影響は少ないが、胸腹部の外科において心臓・肺・消化器などを対象とした場合にその影響は無視できない。そこで本研究課題内では心臓を対象にした低侵襲局所運動計測システムの試作も試みた (Fig. 8) [8]。現在2次元平行移動の計測が限界であるが、よりシステムを深化し3次元平行運動、回転運動、変形の計測が可能なシステムを構築し、これによりナビゲーションシステムの情報を補正し、より正確な手術工程の

計測が可能なシステムの構築を目指す。

またナビゲーションシステムではとらえられない術野外の作業を自動記録し工程分析に繋げるためのプラットフォームとして手術室内の動線分析システムの開発を行い、複数台の小型単眼カメラによる手術室における複数人の3次元動線分析を実現し、人員・機材の動線を自動的に記録・推定・提示することが可能となった。今後は検出の精度と信頼性の向上と共に、より多くのカメラを用いてオクルージョンや死角を回避した計測システムの構築と、計測動線から工程を推測する分析システムの開発を行う。

[成果の発表, 論文等]

1. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋: 手術ナビゲーション情報を利用したMRI誘導下脳腫瘍摘出術の進捗工程解析法, 日本コンピュータ外科学会誌, 13(1): 25-32. (2011)
2. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki: Process progress analysis method using surgical navigation information in glioma surgery, The 6th Asian Conference on Computer Aided Surgery, Busan, Korea, Nov. 26-27. (2010)
3. Ryoichi Nakamura, Tomoaki Aizawa, Yoshihiro Muragaki, Takashi Maruyama, Masahiko Tanaka, Hiroshi Iseki: Intraoperative analysis of task progress and performance of glioma surgery using navigation information, 24th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2010), Geneva, Switzerland, June 23-26, 2010, Int J of CARS, 5(suppl 1): S405-6. (2010)
4. 相沢知明, 中村亮一, 村垣善浩, 丸山隆志, 田中雅彦, 伊関洋: 術具・腫瘍干渉情報に基づく脳腫瘍摘出術の進捗工程解析, 日本コンピュータ外科学会誌, 12(3): 430-431. (2010)
5. Tomoaki Aizawa, Ryoichi Nakamura, Takashi Maruyama, Yoshihiro Muragaki, Hiroshi Iseki, Method to estimate the end time of brain tumor resection by using surgical navigation information, 25th International Congress on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS2011), Berlin, Germany, June 22-25, 2011, Int J of CARS, 6 (suppl 1): S141-2. (2011)
6. 中村亮一, 大澤千晃, 鈴木孝司, 佐藤生馬: 複数カメラを用いたステレオ計測による手術室内人員動

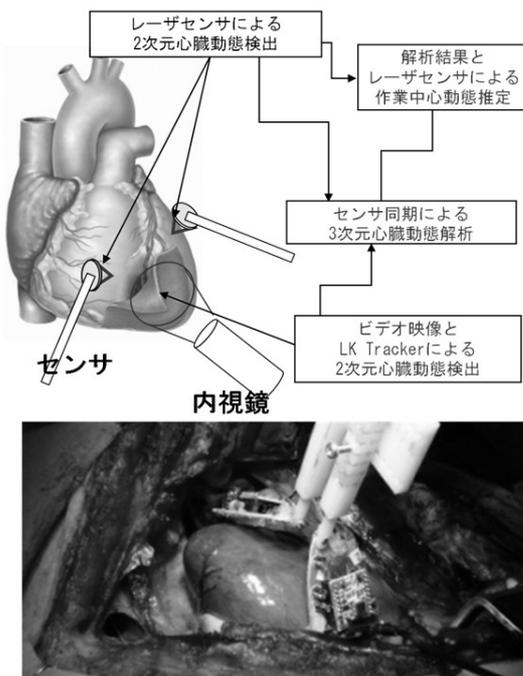


Fig. 8 Organ motion measurement with optical sensor

- 線分析に関する基礎的研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 (ROBOMECH 2011), 岡山, 5月26-28日, 2011, 抄録集 p180/ 論文集 2P1-C07 (CDROM)
7. 大澤千晃, 中村亮一, 佐藤生馬, 単眼 CCD カメラ情報の連結による手術室内人員動線分析システムの開発, 第50回日本生体医工学学会大会, 東京, 4月29日-5月1日, 2011, 生体医工学 49 (Supple 1): 171. (2011)
8. 萩原大輔, 中村亮一, 佐藤生馬, 重症心不全治療用心筋シート移植ロボットのための心運動計測システムの開発, 第50回日本生体医工学学会大会, 東京, 4月29日-5月1日, 2011, 生体医工学 49 (Supple 1): 90. (2011)