

軌跡データマイニングによる手術工程認識

奈良温・和泉潔・鈴木孝司・伊関洋

Surgical Workflow Recognition by Trajectory Data Mining

Atsushi NARA, Kiyoshi IZUMI, Takashi SUZUKI and Hiroshi ISEKI

Abstract: 手術室内における空間情報を安全・効率的な手術マネジメントに活用することは医療 GIS の新たな展開である。本研究では術中における術室内複数スタッフの位置情報を収集する超音波式位置情報計測システムを開発した。さらに軌跡データマイニング技術を用いることにより術中における各スタッフの動線パターンを抽出し、手術工程を推定する手法を開発した。脳神経外科手術 10 例において手術スタッフの動線パターンから手術工程を推定した結果、平均認識率 62.93%を得た。

Keywords: 手術マネジメント (surgical management), 軌跡データマイニング (trajectory data mining), 手術工程認識 (surgical workflow recognition)

1. 研究背景

手術をより安全かつ確実に遂行するために、手術計画・プロセスの改善、術前・術中計画と手術デバイスの稼動状況をリアルタイムに管理し最適化する支援、そして手術室における外科医とその他のスタッフの連携を支援する手術マネジメントが注目されている（伊関ほか, 2004; 南部ほか, 2006）。具体的には手術情報を様々な視点から正確に計測・分析し、進捗状況の把握・重要点判別（手術工程の変化、異常検出など）・人的物的資源の最適配分・リスクアセスメント&マネジメント・手術計画の見直し・術室空間設計の改善・情報共有・訓練や教育を通して、手術の可視化・最適化を目指すことである（Cleary ほか, 2005; Padov ほか, 2007）。

奈良温 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

工学部 8 号館 525 室

Phone: 03-5841-8922

E-mail: anara@save.sys.t.u-tokyo.ac.jp

ここでいう手術情報には、映像、音声、電子カルテ、手術機器ログ、スタッフ作業ログなど多岐にわたるが、医療工学分野の研究動向として映像や手術機器の動作ログを自動計測し、得た情報から手術状況を推定する手法の開発がさかんに行われている。特に空間情報を利用した事例に着目すると、外科医の肘と手首（Ohnuma ほか, 2006）、視線（James ほか, 2007）、術具（相沢ほか, 2010）の位置情報から手術工程の認識や手術の進捗状況を推定する手法が提案されている。

一方、地理情報科学（GISci: Geographic Information Science）の分野ではユビキタス社会の発展や位置認識技術（LATs: Location Aware Technologies）の進歩により膨大な空間情報が取得可能になり、Geographic Knowledge Discovery (GDK) の重要性が増している（Millar ほか, 2009）。近年、特に LATs などにより取得された移動体の時空間情報を動線として解析し、有用な知識を抽出する軌跡

データマイニング (Trajectory Data Mining) が注目されている (Lee ほか, 2007).

本稿では、術中における術室内複数スタッフの位置情報を超音波式位置計測システムにより収集した。さらに軌跡データマイニング技術を利用し術中の各スタッフの動線パターンを抽出し、手術工程を推定する手法を開発した。

2. 手法の概略

2.1 超音波式位置計測システム

本研究では超音波式位置計測システムを東京女子医科大学病院インテリジェント手術室に設置した(図-1)。手術室の大きさは、幅 5.8m、奥行き 4.8m、高さ 2.9m である。超音波式位置計測システムは、手術スタッフに超音波送信タグ(図-1c)を取り付け、天井に 32 個設置された受信器(図-1b)で送信パルスを受信することによって手術スタッフと受信器の距離を計測する。さらに演算装置(図-1a)で冗長な距離情報に基づくロバスト推定を用いた Multilateration によって 3 次元位置を計算している。超音波式位置計測システムの仕様を表-1 に示す。本研究において位置計測する手術スタッフは、術中おもに手術室にいる執刀医、麻酔科医、器械出し看護士、外回り看護士である。

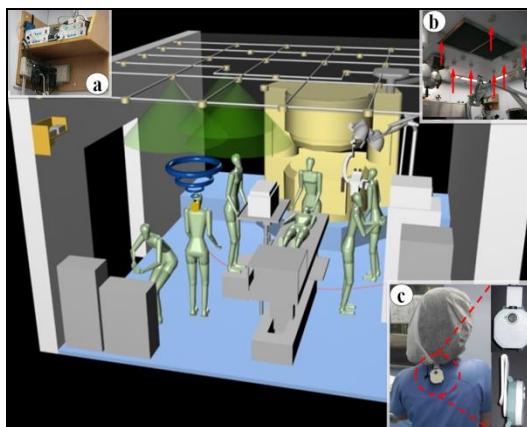


図-1 超音波位置計測システム

表-2 超音波式位置計測システム仕様

超音波周波数	40KHz
位置計測精度	≤80mm
サンプリング周波数	50 Hz(1tag), 50/n Hz(n tags)
受信器計測距離	7m (鉛直方向)
受信器計測角度	100° (鉛直方向)
タグ外形寸法	44mm(w), 75mm(h) mm, 24mm(d)
タグ重量	30g

2.2 軌跡データマイニング

収集した時系列空間データ($ID(i)$, Time(t), P(x, y, z))を ID 每の動線 ($TR_{(i)} = \{P_{(i, 1)}, P_{(i, 2)}, \dots, P_{(i, t)}\}$) とし、本研究で開発した軌跡データマイニング手法を用いて動線パターンの抽出を行う。軌跡データマイニングの分析法を下記に示す。

- 1) 各動線を移動と滞留に分割する ($TR_i = \{\{moveTR_{(i, j)}\}, \{stayTR_{(i, k)}\}\}$) (図-2)。滞留は動線のある 2 点間の 2 次元移動距離が閾値 (Th_{2D}) 以下、もしくは z 方向の移動距離が閾値 (Th_z) 以下の場合とし、それ以外を移動と定義する。これは手術室内の移動はおもに 2 次元平面上の動きと、しゃがみ込みや台に乗るなどの鉛直方向の動きに分けられるからである。
- 2) 移動と滞留に分けられた分割動線の特徴量を計算する。移動分割動線の特徴量は、位置ベクトル・移動時間・線分数・変位・総移動量・速度ベクトル・平均速度・角度統計量からなる。滞留分割動線の特徴量は位置ベクトルと滞留時間からなる。
- 3) 正規化した特徴量を主成分分析 (PCA) により次元圧縮する (固有値 ≥ 1 を採用)。
- 4) PCA により得られた固有ベクトルから主成

分得点を計算し、新たな特徴量とする。K-means 法により特徴量をクラスタリングし、スタッフ役割毎の動線クラスタ（移動・滞留）を抽出する。K-means 法における最適な K はギャップ統計量（Tibshirani ほか, 2001）により推定する（K-max = 20）。

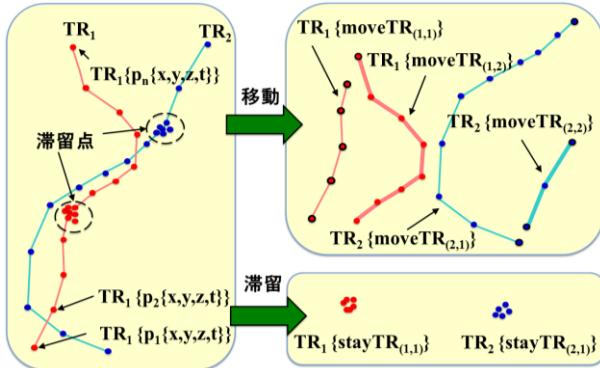


図-2 動線分割法

2.3 手術工程の推定

超音波式位置計測システムを設置した東京女子医大インテリジェント手術室は脳神経外科手術用の手術室である。本研究ではこの手術室における全身麻酔による脳腫瘍摘出手術の工程を軌跡データマイニングにより抽出された各手術スタッフの動線パターンから推定する。推定する手術工程は、術前準備（患者入室後）、開頭作業、術中 MRI 撮影、脳腫瘍切除、閉頭作業である。術中 MRI 撮影は通常 2~3 回行われ、残存脳腫瘍の大きさや位置を確認しながら腫瘍切除を行い、腫瘍摘出率を高める施術法である。手術工程の推定法を下記に示す。

- 1) 任意の時間幅 (w) におけるスタッフ役割毎の動線クラスタの頻度を合計時間で求める。
- 2) 直接観測された各手術工程と動線クラスタの頻度から決定木法 (J48) によって手術工程の推定をする。

3. 分析結果

全身麻酔による脳腫瘍摘出手術 10 例における手術スタッフの動線を計測した（平均手術時間=8 時間 19 分）。図-3 に 10 例における手術工程と経過時間を示す。分析において、閾値 $Th_{2D}=200\text{mm}$, 閾値 $Th_z=100\text{mm}$, $w = 300$ 秒とした。図-4 に外回り看護士の動線クラスタ（移動のみ）の例と術中における動線クラスタの頻度分布図を示す。

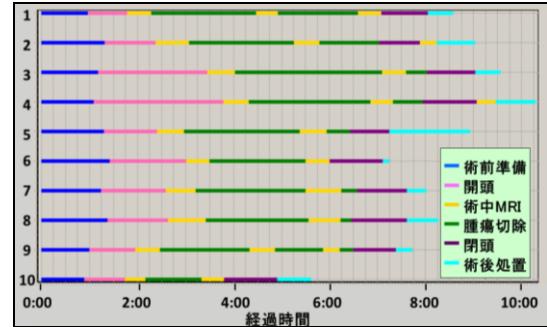


図-3 手術 10 例における手術工程

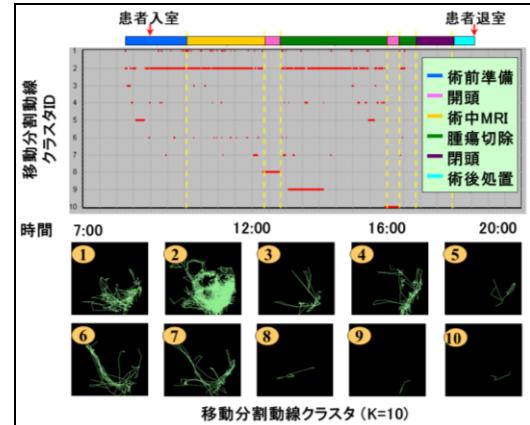


図-4 動線クラスタ例(下), 動線クラスタ頻度分布(上)

決定木による手術工程認識率は 10-fold cross validation により評価した。10 例の平均認識率は動線クラスタの頻度のみを用いた場合 62.93%、動線クラスタの頻度に経過時間も足した場合で 77.48%を得た。

4. 結論

保健医療 GIS の疫学的な分析や医療サービスな

どの活用はマクロスケールにおける空間情報を扱う事例が多く紹介されているが（中谷ほか, 2004）、本稿では手術室内というミクロスケールにおける空間情報の活用事例を紹介した。

軌跡データマイニングの分析結果として手術スタッフの動線パターンのみから手術工程推定し平均認識率 62.93% 得た。これはスタッフ役割毎の術室内の移動パターンや立ち位置という空間情報から、ある程度手術状況が推測可能であることを示している。また経過時間情報を追加することにより認識精度は 77.48% に上がった。今後の展開として、映像や音声などの他の手術情報と統合分析することにより認識精度を上げることが考えられる。また他の解析法との比較や他の手術情報と比較することで軌跡データマイニング手法と動線データを使うことの有用性を検証する必要がある。

謝辞

本研究の一部は NEDO 内視鏡下手術支援システムの研究開発事業(P10003)により実施された。また実験に協力頂いた東京女子医科大学病院丸山先生、田中先生、および手術スタッフの方々に感謝する。

参考文献

- 伊関洋・村垣善浩・丸山隆志・中村亮一・杉浦円・谷口拡樹・小澤紀彦・大森繁・南部恭二郎(2004)：インテリジェントオペ室の現状と将来展望, 日本医用画像工学会, 22(3), 115-119.
- 南部恭二郎・伊関洋(2006)：手術戦略デスクと手術安全支援システム, 生体医工学, 44(2), 257-264.
- Cleary, K., Chung, H. Y., and Mun, S. K., 2005. OR 2020: The operating room of the future. *Laparoendoscopic and Advanced Surgical Techniques*, 15(5), 495-500.
- Padoy, N., Blum, T., Essa, I., Feussner, H., Berger, M-O., and Navab, N., 2007. A boosted segmentation method for surgical workflow analysis, *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 102-109.
- Ohnuma, K., Masamune, K., Yoshimitsu, K., Sadahiro, T., Vain, J., Fukui, Y., and Miyawaki, F., 2006. Timed-automata-based model for laparoscopic surgery and intraoperative motion recognition of a surgeon as the interface connecting the surgical and the real operating room, *International journal for computer assisted radiology and surgery*, 1, 442-445.
- 相沢知明・中村亮一・村垣善浩・丸山隆志・田中雅彦・伊関洋(2010)：Progress process analysis method using surgical navigation information in brain tumor resection, 生体医工学, 48(Suppl), 166.
- Miller, H. J. and Han, J., 2009. Geographic data mining and knowledge discovery: An overview. In H. Miller & J. Han (Eds.), *Geographic data mining and knowledge discovery* (2nd Ed.), 1-26, CRC Press, Taylor and Francis.
- Lee, J. G., Han, J., and Whang, K. Y., 2007. Trajectory clustering: a partition-and-group framework, Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, 593-604.
- Tibshirani, R., Walther, G., and Hastie, T., 2001. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic, *Journal of the Royal Statistical Society B*, 63(2), 411-423.
- 中谷友樹・谷村晋・二瓶直子・堀越洋一(2004)：「保健医療のための GIS」, 古今書院。