

人工心肺装置用スマートアラームのための異常検知

Fault Detection for Smart Alarm of Cardiopulmonary Bypass

松井 藤五郎*1*2 児玉 泰*1 宮崎 洋輔*1 中野 琴江*1
 Tohgoroh Matsui Yasushi Kodama Yosuke Miyazaki Kotoe Nakano

*1中部大学生命健康科学部臨床工学科

Department of Clinical Engineering, College of Life and Health Sciences, Chubu University

*2中部大学工学部情報工学科

Department of Computer Science, College of Engineering, Chubu University

This paper describes a method to detect faults in Cardiopulmonary Bypass. We use rare pattern mining, which is based on conditional probabilities, in order to detect faults. We confirmed that our proposed method improves the sensitivity also called recall in data mining.

1. はじめに

人工心肺装置 [1] は心臓手術の際に用いられる医療機器であり、手術において患者の心臓を停止している間、全身に血液を送る心臓と血液中に酸素を取り込む肺の役割を担う。臨床工学技士は、人工心肺装置が安全に作動するよう日常より装置を人工心肺装置を点検・整備し、手術においては人工心肺装置の操作を担当する。

人工心肺装置は使用時に異常が生じると患者の命に関わる重要な装置であるため、使用時のアクシデントや異常事態に備えて、貯血槽液面の低下を検知しアラームを鳴らすレベルセンサー、回路内の気泡を検出するとアラームを鳴らして送血ポンプのスピードをコントロールする気泡検出器（バブルセンサー）、遠心ポンプの揚程の上昇による血流量の低下や送血回路の屈曲による血流量の低下を検知しアラームを鳴らす流量下限アラーム、回路内圧の異常値を検知しアラームを鳴らす圧力センサーなど、様々な安全装置が取り付けられている [2]。これらの安全装置は、基本的には、センサーの値が事前に設定した正常値の範囲から外れたときにアラームを鳴らすという仕組みになっている。しかしながら、この方法では、一旦正常値の範囲から外れるとアラームが鳴り続けるという問題や、センサーの値が正常値の範囲内で生じた異常を検知できないという問題がある。

そこで我々は、これまでに、人工心肺装置のログに対して時系列マイニング [3] の方法を適用し、時系列パターンに基づいて心臓手術に用いられた人工心肺装置の異常を検知する手法を開発し、スマートアラームを試作した [4, 5]。[4] では、人工心肺装置から患者に送られる一分間当たりの血液の量を表す灌流量に着目し、灌流量の全体平均に基づいて異常を検知する手法を提案した。全体平均は手術後でないと計算できないため、手術中に異常を検知することができない。そこで、[5] では、手術中に異常を検知するため、移動平均に基づいて異常を検知する方法を提案した。また、灌流量だけでなく、患者に送られる血液の圧力である送血圧に対しても異常検知を行い、灌流量に対する異常検知と組み合わせる方法を提案した。

本論文では、人工心肺装置用スマートアラームのための異常



図1 人工心肺装置

検知の手法について述べ、本手法の有効性を臨床工学技士の立場から評価する。

2. 人工心肺装置のログデータ

人工心肺装置は、主に、貯血槽、血液ポンプ、人工肺、動脈フィルター、血液回路で構成されている [6]。本学において実習で用いられている人工心肺装置を図1に示す。

貯血槽は、患者から脱血した血液や吸引した血液を貯留するとともに、循環血液量を調節する役目もある。血液ポンプには、回転するローラーにより血液を送るローラーポンプと、ローターの回転による遠心力で圧力差を発生させて血液の流れを作る遠心ポンプがあり、臨床工学技士が心臓手術中にこれらのポンプを操作する。人工肺では、多数の微細孔を持つ人工膜を通して酸素と二酸化炭素のガス交換が行われる [7]。動脈フィルターは、血液中の異物や気泡を取り除き、塞栓を防止する役割がある。血液回路は、貯血槽、血液ポンプ、人工肺、動脈フィルターなどを接続する血液流路であり、血管を代行する。

人工心肺装置のログには、各種操作に対する時間、灌流量、FiO2（吸入酸素濃度）、尿量、送血温、送血圧、pH、PO2、PCO2、血圧、体温など数十種類の値が手術の経過時間と共に1

連絡先: 松井藤五郎, 中部大学生命健康科学部臨床工学科兼工学部情報工学科, 愛知県春日井市松本町 1200 番地, TohgorohMatsui@tohgoroh.jp

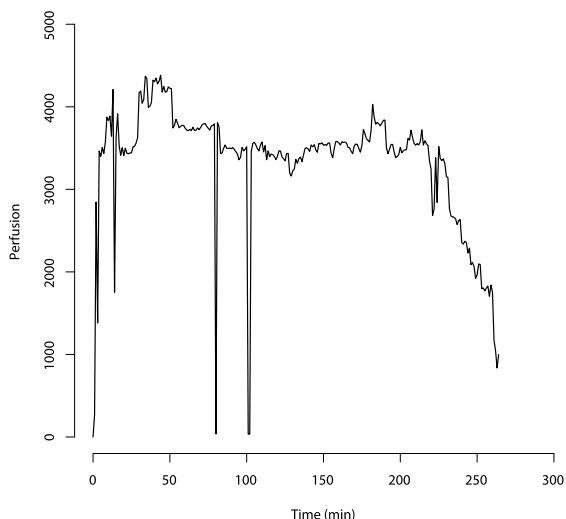


図2 ある手術における灌流量の変化.

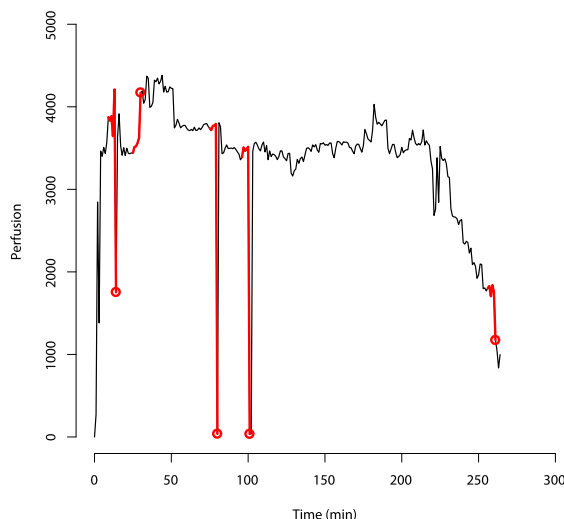


図3 図2の灌流量に対して異常検知を行った結果.

分ごとに記録されている。また、臨床工学技士が「体外循環開始」「体外循環終了」「採血」「大動脈遮断」などのラベルを付与することができ、ラベルを付与するとそのときの経過時間と各項目の値が記録される。

ある手術における灌流量の変化を図2に示す。このように、灌流量は、体外循環の開始とともに増加し、体外循環の間、体表面積から求められた目標灌流量となるように調整される。しかし、時折、患者の容態や手術の進行状況などによって、灌流量が大きく変化することがある。本研究では、このような灌流量の変化のうち、通常の手術ではほとんど発生しない変化を異常として検知する。

3. 手法

時刻 t に観測されたセンサー値を x_t とする。時刻 t において、直近 m 分間の移動平均を求め、これを $\mu_{t,m}$ とする。

$$\mu_{t,m} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{t-k+1} \quad (1)$$

現在は、臨床工学技士の経験に基づいて $m = 5$ としている。

次に、 x_t と $\mu_{t,m}$ を比較し、以下のように x_t を $\{A, B, C, D, E\}$ のいずれかに対応させて離散化し、 c_t とする。

$$c_t = \begin{cases} A & x_t \geq (1 + \sigma_2)\mu_{t,m} \text{ のとき} \\ B & (1 + \sigma_1)\mu_{t,m} \leq x_t < (1 + \sigma_2)\mu_{t,m} \text{ のとき} \\ C & (1 - \sigma_1)\mu_{t,m} \leq x_t < (1 + \sigma_1)\mu_{t,m} \text{ のとき} \\ D & (1 - \sigma_2)\mu_{t,m} \leq x_t < (1 - \sigma_1)\mu_{t,m} \text{ のとき} \\ E & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad (2)$$

σ_1, σ_2 は離散化の閾値を表すパラメーターであり、現在は臨床工学技士の経験に基づき $\sigma_1 = 0.1$, $\sigma_2 = 0.2$ としている。

続いて、離散化した値の n グラムからなる時系列パターン p を作成し、 p が出現した後にそれぞれの離散値 c が出現する確率を求める。

$$\Pr(c_t | p_{t-1}) = \Pr(C = c_t | P = p_{t-1}) = \frac{N(p, c)}{N(p)} \quad (3)$$

ここで、関数 $N(p)$ は時系列パターン p の出現した回数を表し、関数 $N(p, c)$ は時系列パターン p の直後に離散値 c が出現した



図4 試作したスマートアラーム

回数を表す。現在は、臨床工学技士の経験に基づいて n グラムの長さを $n = 5$ としている。本論文では、この確率を時系列パターン (p_{t-1}, c_t) の条件付き確率と呼ぶ。

移動平均 μ_t と x_t から離散値 c_t を求め、直前の n グラム時系列パターン p_{t-1} を条件とする条件付き確率 $\Pr(c_t | p_{t-1})$ が閾値 θ 以下であるとき、これを異常として検知する。現在は、臨床工学技士の経験に基づいて、 $\theta = 0.01$ としている。

図3に、図2の灌流量に対して異常検知を行った場合に検出される異常を示す。丸印が異常が検知されたところであり、太線が異常検知の際に用いられた時系列データを表している。

これを、灌流量と送血圧のそれぞれに対して行い、両方で異常が検知されたときには黄色の警告灯を点灯させ、いずれか一方で以上が検知されたときはシアン（青色）の警告灯を点灯させて警告する。これらの仕様は、医療機器におけるインテリジェントアラームシステムに関する JIS 規格 [8] に基づいて策定した。試作したスマートアラームを図4に示す。本体には Raspberry Pi を使用し、警告灯にはネットワーク監視表示灯を用いている。

4. 結果

人工心肺装置の専門家の観点から提案手法による異常検知の評価を行った。

全 384 の手術例から、クリーニングによって欠損などを含むものを取り除き、解析が可能な 341 の手術例を取り出した。こ

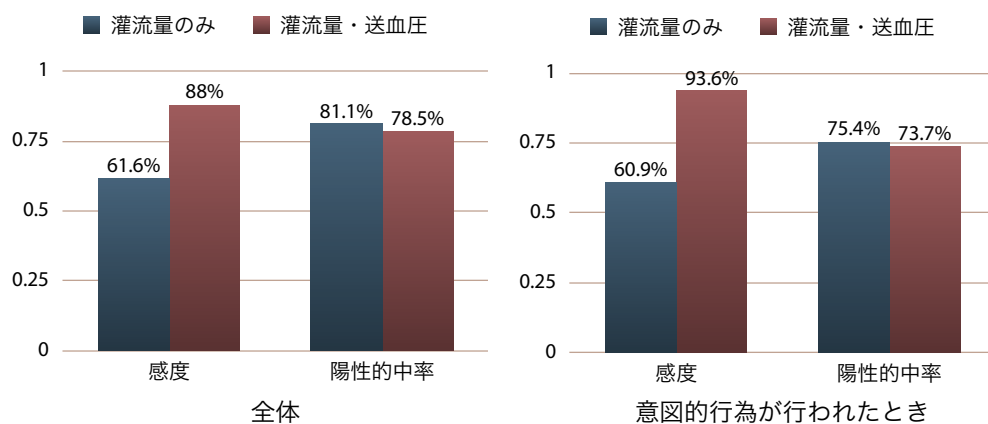


図5 感度と陽性的中率の比較.

の341の手術例からランダム・サンプリングによって無作為に34の手術例を選択し、それぞれの手術例について、その手術例以外の340の手術例を訓練データとして出現パターンのカウントして条件付き確率を求めて異常検知を行った。その後、提案手法によって検知された異常が実際に異常であるか、また、提案手法が検知しなかった異常があるかを調べ、提案手法の感度(再現度, recall)と陽性的中率(精度, 適合率, precision)を求めた。この結果を図5左に示す。灌流量のみから異常を検知したときの感度は61.6%だったが、灌流量と送血圧を組み合わせることによって感度が88.0%に26.4%上昇した。これに対し、陽性的中率の低下は81.1%から78.5%へと2.6%低下した。

また、ログのラベルから大動脈遮断や薬液注入など医師や臨床工学技士による意図的な行為が行われたときを判断し、意図的な行為が行われたときに限定した場合の感度と陽性的中率を調べた。これを図5右に示す。意図的な操作が行われたときに限定すると、感度は60.9%から93.6%へと32.7%上昇し、陽性的中率は75.4%から73.7%へと1.7%低下した。

次に、341の手術例すべてを対象として灌流量の異常パターンを抽出した結果を表1に示す。条件として出現回数が最も多いのはCCCCCであり、出現回数は41,641であった。この表より、CCCCCのパターンが出現したとき、その直後に出現する確率が最も低いのはAであり、その確率は0.00307であることがわかる。同様に、CCCCCの直後にBあるいはEが出現したときも異常として検知される。しかし、CCCCCの直後にCが出現したとき(41,641回中40,193回出現、条件付き確率0.965)と、Dが出現したとき(同539回出現、条件付き確率0.0129)は異常ではないと判断される。同様に、送血圧の異常パターンを抽出した結果を表2に示す。

5. 考察

人工心肺装置は患者の命を預かる装置であるため、人工心肺装置用のスマートアラームには異常の見逃しを防ぐために高い感度が必要とされる。本論文の評価によって、提案手法が感度を大幅に上昇させることが確認できた。

一般に、感度と陽性的中率の間にはトレードオフの関係があり、感度を上昇させると陽性的中率が低下する。提案手法においても、感度が上昇したことによって陽性的中率が低下した。提案手法は、感度を大幅に上昇させたが、陽性的中率の低下はわずかであった。これらのことから、提案手法は従来手法に比べて有効であると考えられる。

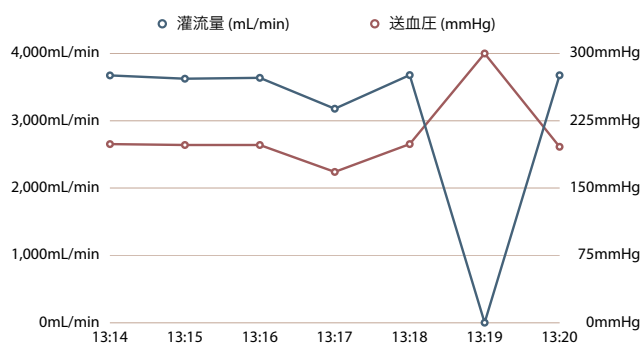


図6 意図的行為(大動脈遮断)が行われたときに見逃した異常の例

また、大動脈遮断や薬液注入など、医師または臨床工学技士が意図的な行為を行ったときには、灌流量や送血圧に変化が生じやすい。提案手法は、このような状況においてより高い感度で異常を検知できる。

提案手法が見逃した異常について調査し、検討したところ、34例の手術中、意図的行為がないときの臨床的異常の見逃しが16回、意図的行為があったときの臨床的異常の見逃しが10回生じていた。意図的行為がないときは、16回中7回に動脈圧が変動しており、4回に肺動脈圧が変動していた。意図的行為があったときは、10回中4回が心筋保護液*1注入時であり、3回が大動脈遮断時であった。例として、ある手術において意図的行為(大動脈遮断)が行われたときの灌流量と送血圧の変化を図6に示す。13:19において、大動脈遮断が行われており、灌流量が一時的に0mL/minとなっている。このときのパターンはCCCDCEであった。CCCDCEのパターンが出現した275回中4回において直後にEが出現しており、その条件付き確率は0.0145であった。

このことから、現在は経験的に0.01に設定されている条件付き確率に対する閾値を変更したときに、感度と陽性的中率がどのように変化するかを調べ、適切な閾値を設定する必要があると考えられる。また、センサーの値がゼロになったときは条件付き出現確率に関わりなく異常として検知するなど、エキスパートが持つ知識をルール化して組み合わせることで見逃しを減らすことができると考えられる。

*1 心停止中の余分な心筋の代謝を抑え、心筋細胞が低酸素状態に陥って障害されるのを防ぐための液体。

表1 灌流量の異常として検知されるパターンとその出現回数, 条件出現回数, 条件付き確率. ただし, 出現回数が0のものを除く.

パターン	出現	条件	確率
DCCCCA	1	395	0.00253
BCCCCA	2	761	0.00263
CBCCCCA	1	348	0.00287
CCCCCA	128	41,641	0.00307
CCCBCA	1	307	0.00326
ACCCCA	1	285	0.00351
BBCCCA	1	222	0.00450
BBCCCB	1	222	0.00450
BBCCCE	1	222	0.00450
CCCCBE	2	401	0.00499
CCCDDA	1	192	0.00521
CCCCDA	3	569	0.00527
CBCCCB	2	348	0.00575
CCBCCE	2	319	0.00627
CCDCCA	2	275	0.00727
CCDCCE	2	275	0.00727
EAAAAD	1	136	0.00735
AABCCA	1	124	0.00806
CCCDEB	1	117	0.00855
CCCCCB	372	41,641	0.00893
CBBCCA	1	111	0.00901
CBBCCB	1	111	0.00901
CBBCCCE	1	111	0.00901
CCCBBA	1	110	0.00909
CCEAAD	1	103	0.00971
CCEAAE	1	103	0.00971
CCDDCA	1	102	0.00980
CCCCCE	409	41,641	0.00982
CEAAAD	1	101	0.00990

表2 送血圧の異常として検知されるパターンとその出現回数, 条件出現回数, 条件付き確率. ただし, 出現回数が0のものを除く.

パターン	出現	条件	確率
CCCCCA	149	39,795	0.00374
CCBCCA	1	266	0.00376
CCBCCE	1	266	0.00376
CCCBCA	1	259	0.00386
CCCBCCE	1	259	0.00386
CCCCCE	195	39,795	0.00490
DDCCCA	1	200	0.005
CCDCCE	2	372	0.00538
DCCCCA	4	564	0.00709
BCCCCA	5	673	0.00743
CCCCCB	314	39,795	0.00789
CCDDCA	1	122	0.00820
CCDDCE	1	122	0.00820
CDDCCA	1	119	0.00840
CDDCCE	1	119	0.00840
CDCCCA	3	353	0.00850
EEEEEC	4	449	0.00891
ACCCCA	1	107	0.00935
ACCCCB	1	107	0.00935
CCCDDA	2	212	0.00943
CCCCDA	6	631	0.00951
CCCCDB	6	631	0.00951

6. まとめ

本論文では, 人工心肺装置用スマートアラームのための異常検知の手法について述べ, 本手法の有効性を臨床工学技士の立場から感度(再現率)と陽性的中率(精度, 適合率)を尺度として評価した. 341の手術例から34の手術例を無作為抽出して評価した結果, 本手法は, 陽性的中率をあまり下げることなく感度を大きく上げられることを確認した.

人工心肺装置は患者の命を預かる重要な医療機器であるため, 異常の見逃しをできる限りなくす, すなわち, 異常検知の感度をできる限り上げることが望ましい. この点において, 提案手法は有効であると言える.

今後は, 動脈圧など患者の状態をセンシングしたログに対する異常検知を組み合わせることによってさらに感度を上昇させることや, 現在は経験的に決めている異常検知の閾値を見直すことによって感度と陽性的中率のバランスを取ること, エキスパートの知見をルール化して組み合わせることなどが課題である.

参考文献

- [1] 上田裕一編: 最新人工心肺理論と実際, 第4版, 名古屋大学出版会, 2011
- [2] 安野誠: 人工心肺の安全装置の進歩, クリニカルエンジニアリング, Vol. 23, No. 9, 2012年9月号, pp. 859-868, 2012
- [3] 山西健司編: データマイニングによる異常検知, 第2版, 共立出版, 2010
- [4] 野田貴紀, 松井藤五郎, 児玉泰: 時系列マイニングを用いた人工心肺装置の異常検知. 第3回データ指向構成マイニングとシミュレーション研究会(SIG-DOCMAS), 2012
- [5] 今福涼太, 田中将之, 泉喬太, 長瀬瞬, 松井藤五郎, 児玉泰: 人工心肺装置における複数の時系列パターンに基づく異常検知. 電子情報通信学会パターン認識とメディア理解研究会, IEICE-PRMU-177, 信学技報, Vol. 113, No. 493, pp. 55-60, 2014
- [6] 人工心肺装置の標準的接続方法およびそれに応じた安全教育等に関するガイドライン, 日本心臓血管外科学会, 日本胸部外科学会, 日本人工臓器学会, 日本体外循環技術医学学会, 日本医療器材工業会, pp. 3-5, 2007
- [7] 南淵明宏, 茨城保: 実践人工心肺, 第1版, 医学書院, 2002
- [8] 医用電気機器-第1-8部: 基礎安全及び基本性能に関する一般要求事項-副通則: 医用電気機器及び医用電気システムのアラームシステムに関する一般要求事項, 試験方法及び適用指針, JIS T 60601-1-8:2012 (IEC 60601-1-8:2006), 日本規格協会, 2012