

罰則付き回帰による原尿再吸収モデルパラメータ推定に  
基づく無拘束膀胱内畜尿量予測システム

Method for Predicting Unconstrained Urine Volume Based on Estimating Parameters of  
Model Considered Reabsorbed Primitive Urine by Penalized Regression

広田 卓<sup>†</sup>      山崎 智將<sup>†</sup>      鏑木 崇史<sup>‡</sup>      栗原 陽介<sup>†</sup>  
Taku Hirota   Tomomasa Yamasaki   Takashi Kaburagi   Yosuke Kurihara

## 1. はじめに

世界中で急速に高齢化が加速するに伴って、介護現場における排尿管理が問題となっている。そこで現在、逐次計測を行う超音波センサが注目されている[1]。ところが、介護者が事前にケアプランを作成するためには、あらかじめ膀胱の畜尿量を予測し、被介護者が排尿する時間を知る必要がある。そこで本研究では、腎臓での原尿の生成、再吸収、膀胱への蓄尿という一連の過程を数理モデルで表し、そのモデルのパラメータを推定することで、無拘束に膀胱内畜尿量を予測するシステムを提案する。パラメータは排尿の吸光スペクトルを説明変数とし、回帰分析を用いることで推定する。推定したパラメータをモデルに入力することで膀胱内畜尿量の予測が可能となる。

## 2. 提案手法

### 2.1 原尿再吸収モデル

本研究では、膀胱に尿が蓄積していく様子を数理モデルで表現した原尿再吸収モデルを用いて膀胱内畜尿量 $x(t)$ の予測を行う。

$$x(t) = \begin{cases} K_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right\}, & t \leq T_r \\ K_2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right\} + x(T_r), & t > T_r \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $T_r$ は尿が膀胱に蓄積されるまでの時間を表す。また、 $\tau_1, \tau_2$ は時定数を示し、 $K_1$ は再吸収までに尿が蓄積できる上限量、 $K_2$ は尿が膀胱に蓄積可能な量を示す。つまり、(1)式のパラメータである $T_r, \tau_1, \tau_2, K_1, K_2$ の値を決定することで膀胱内畜尿量の予測が可能となる。

### 2.2 膀胱内畜尿量予測のための信号処理システム

(1)式のパラメータを推定することで、排尿してすぐに膀胱内畜尿量の予測を行うことが可能となる。本研究では、パラメータを推定するために、排尿直後に採取した排尿の吸光スペクトルを説明変数とし、3種類の回帰分析による予測精度を比較する。1つ目は遺伝的アルゴリズムにより偏回帰係数を決定する手法であり、2つ目と3つ目にはそれぞれ罰則付き回帰であるRIDGE回帰とLASSO回帰を用いる。図1は本提案手法における信号処理システムを示し、準備パートと予測パートの二段階に分かれている。

#### 2.2.1 準備パート

準備パートではパラメータを推定するために回帰式の構築を行う。回帰式において、説明変数として排尿直後の吸光スペクトルを使用する。説明変数として扱う吸光スペク

トル $S(\lambda)$ を取得するために、尿の吸光スペクトル $S_u(\lambda)$ を水の吸光スペクトル $S_w(\lambda)$ を基準に正規化する。

$$S(\lambda) = \log_{10} \frac{S_u(\lambda)}{S_w(\lambda)} \quad (2)$$

また、遺伝的アルゴリズムを用いた偏回帰係数決定法では、推定されたパラメータを(1)式に当てはめることで取得した予測畜尿量と実際に超音波センサにより計測した時系列データとの二乗平均平方誤差(RMSE)が小さくなるように偏回帰係数 $\beta$ を決定する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{T_u} \sum_{i=1}^{T_u} (x_u(i) - x(i))^2} \quad (3)$$

ここで、 $T_u$ は排尿時間間隔を示し、 $x_u(i)$ は実際に超音波センサにより計測した畜尿量を表し、また $x(i)$ は(1)式によって予測した畜尿量を表す。一方で、RIDGE回帰とLASSO回帰における偏回帰係数 $\beta$ はパラメータの真値と推定値の誤差が小さくなるように決定される。

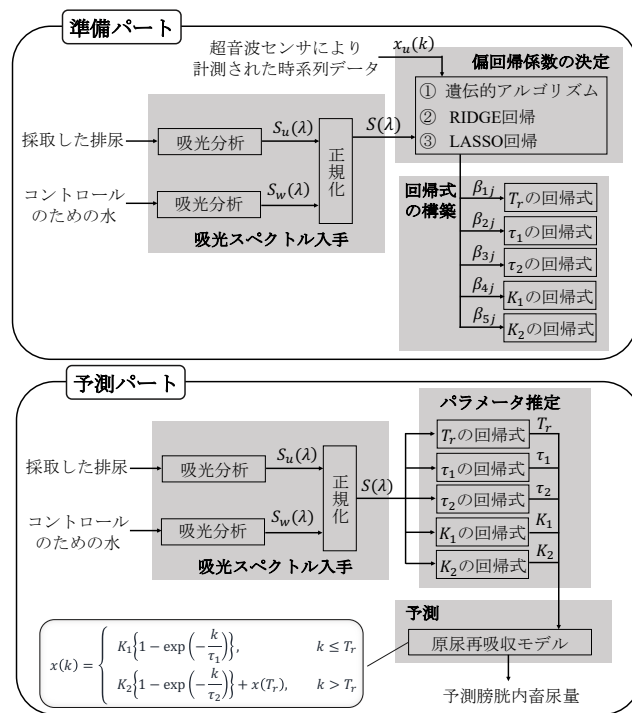


図1 提案手法のための信号処理システム

また、図2には遺伝的アルゴリズムの流れを示す。決められた探索回数終了次第、その時点におけるRMSEが最小の偏回帰係数 $\beta$ を最適解 $\beta$ とする。

<sup>†</sup> 青山学院大学 Aoyama Gakuin University

<sup>‡</sup> 国際基督教大学 International Christian University

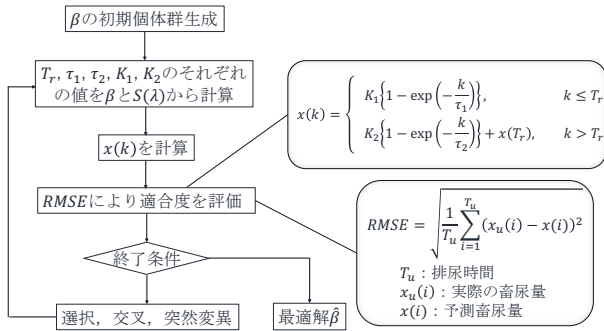


図 2 遺伝的アルゴリズムの流れ

2.2.2 予測パート

準備パートにより構築された回帰式に対して、排尿直後に採取した吸光スペクトル $S(\lambda)$ を入力することで 5 つのパラメータの推定を行う。推定されたパラメータを(1)式に当てはめ、膀胱内蓄尿量を予測する。

3. 検証実験

超音波センサによる時系列データとの誤差に基づき、3 種類の回帰手法の妥当性を評価するため、実験を行った。

3.1 実験設定

本実験では、膀胱内蓄尿量の時系列データを取得するために超音波センサ(株式会社リリアム大塚: リリアム $\alpha$ -200)を使用した。サンプリング間隔は 60s であり、プローブを適切な位置に当てることで計測が可能となる。また、排尿と水の吸光スペクトル $S_u(\lambda)$ ,  $S_w(\lambda)$ をそれぞれ取得するために、ハイパースペクトルカメラ(Resonon Inc.: PikaXC2)を使用した。このカメラは 398.67nm から 1016.78nm までの波長帯で 1.34nm 刻みの画像を取得することができる。取得した画像のピクセルにはそれぞれの波長におけるスペクトルを持っている。そのため、本実験ではそれぞれの波長における吸光スペクトル $S_u(\lambda)$ ,  $S_w(\lambda)$ は画像が持つスペクトルの平均値を使用した。

3.2 データ取得手順

膀胱内蓄尿量の時系列データを取得するために、超音波センサのプローブを身体に装着する。計測中、被検者にはプローブの装着位置が動かないように安静にするようお願いした。また、被検者はいつでも排尿を行うことができ、排尿する度に排尿時間を記録した。ここで、前回の排尿時間から経過した時間を排尿間隔 $T_u$ とした。また、吸光スペクトル $S(\lambda)$ はこのとき採取した排尿から計算される。上記の手順により、超音波センサを用いて取得された時系列データを $x_u(t)$ とする。一連の実験は全ての被検者の同意のもと行われ、20 代男性 3 名から合計 50 データ取得した。

3.3 評価方法

本実験では、取得した 50 データのうち 49 データを回帰式構築のために使用し、残りの 1 データをテストデータとした。提案手法の妥当性を評価するために、予測した膀胱内蓄尿量 $x(t)$ と実際に超音波センサを用いて計測した蓄尿量時系列データ $x_u(t)$ との二乗平均平方誤差(RMSE)を式(3)により計算した。

4. 実験結果

4.1 予測精度の比較

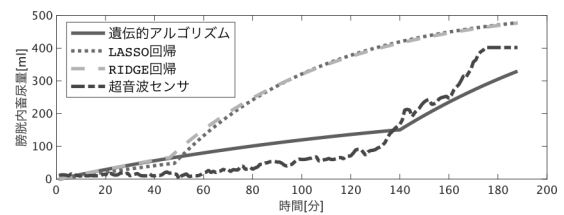
実験の結果、遺伝的アルゴリズムを用いた手法による RMSE の平均値は 73.03ml を示した。ところが、RIDGE 回帰と LASSO 回帰はそれぞれ 97.87ml, 101.26ml であった。以下表 1 に各回帰手法による RMSE の平均値の結果をまとめた。また、t 検定の結果、遺伝的アルゴリズムによる手法の RMSE は有意水準 5% において、他の 2 種の回帰手法による RMSE から統計的有意差が生じた。一方で、RIDGE 回帰と LASSO 回帰については有意差が見られなかった。

表 1 各回帰手法による誤差結果

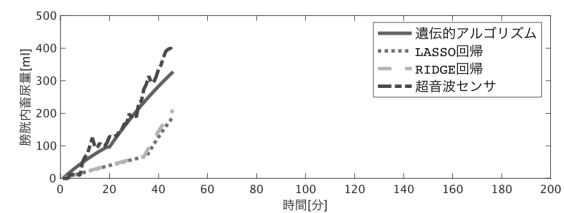
回帰手法	RMSE [ml]
遺伝的アルゴリズム	73.03
RIDGE 回帰	97.87
LASSO 回帰	101.26

4.2 予測蓄尿量の推移

図 3 に 3 種の回帰手法により予測した蓄尿量の推移を示す。図 3(a) に示すグラフは排尿間隔 $T_u$ が 188 分と取得したデータの中で最長であり、対照的に図 3(b) は比較的排尿間隔 $T_u$ の短い(46 分)データを用いたグラフである。それぞれ遺伝的アルゴリズムによる蓄尿量推移は超音波センサの計測データと似たような波形が見られた。また、2 種の罰則付き回帰は図 3 においてほぼ同じ波形を示した。



(a) 排尿間隔が長い場合 ( $T_u = 188$ )



(b) 排尿間隔が短い場合 ( $T_u = 46$ )

図 3 予測蓄尿量の推移

5. むすび

超音波センサを用いて計測した時系列データとの誤差が最小となった手法は 3 種のうち遺伝的アルゴリズムにより偏回帰係数を決定する手法であった。この結果は、遺伝的アルゴリズム中の適合度に予測蓄尿量と時系列データとの差を用いることで最適解を取得できたためと考えられる。超音波センサの計測誤差の補正が今後の展望である。

参考文献

[1] N. K. Kristiansen, J. C. Djurhuus, and H. Nygaard, "Design and Evaluation of an Ultrasound-Based Bladder Volume Monitor", *Medical and Biological Engineering and Computing*, Vol. 42, No. 6, pp. 762-769 (2004).