

体内水分量を考慮に入れた無拘束膀胱内蓄尿量予測のための モデルの提案

渋江直樹 鎗木崇史 栗原陽介

青山学院大学理工学部経営システム工学科

1. はじめに

近年高齢者の人口増加が社会問題になっている。高齢者人口の増加により病院への通院者や医療費が増加しており日本の保険制度では賄うことができない膨大な医療費がかかることが危惧されている[1]。高齢になるにつれて発症しやすい病気や症状は様々あるがその中でも尿失禁という症状は高齢者に多く見られる症状の一つである[2]。介護施設や在宅介護などでは尿失禁による清掃コストの増加だけでなく介護者の労働量の増加が問題となっている。また当事者は尿失禁をしてしまうことで社会的尊厳や威厳の失墜に繋がる可能性があり、精神的影響が大きいことが問題となっている。現在尿失禁対策として、おむつ、カテーテル、超音波センサなどが用いられている。しかし、おむつ、カテーテルは対処時期が事後となってしまう、当事者の精神的影響を緩和することができない。また超音波センサを用いては、実際の排尿量との誤差が多く生じてしまい、精度は正確とはいえない。渡辺らの先行研究では超音波センサの精度向上を目的とした研究を行い、誤差率を18%から12%に改善している。しかし、測定するにあたり、常に安静状態でいなければならないという強い拘束性が生じてしまうため、当事者は寝た状態で計測することになり、行動が制限されてしまい尿失禁対策の導入には向いていない[3]。よって本研究では尿失禁対策を事前に行え、無拘束で膀胱内蓄尿量を予測するための数理モデルを構築する。

2. 提案手法

2.1 膀胱内蓄尿モデル

膀胱内に尿がどのように蓄積していくのかのモデル構築を行っていく。膀胱内における蓄尿量の推移は血液が腎臓のボーマン囊において原

尿に変換され尿細管を経て原尿が膀胱に蓄尿されていく。この際、膀胱内圧力 P_{out} の変化は、腎臓にかかっている一定の原尿生成圧 P_{in} と P_{out} の圧力差に比例する。

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} = Z \cdot (P_{in}(t) - P_{out}(t)) \quad (1)$$

原尿から尿へと変換される期間は尿が一気に膀胱内に蓄積されるということはないため、どれだけ早く上がっていくのか知ることができる比例係数を Z とする。

一方、体内の水分量により原尿は腎臓から膀胱に移行する過程で体内に再吸収されることが知られている。ここでは、再吸収の過程を簡素化し、排尿から時間 L だけは原尿が膀胱に移行せずすべて再吸収されると仮定する。このことを考慮に入れ、ステップ関数 $u(t)$ を用いて式(1)を展開すると

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} + Z \cdot P_{out}(t) = Z \cdot P_{in}(t) \cdot u(t - L) \quad (2)$$

が得られる。また、膀胱内蓄尿量 V_{out} は膀胱内圧力 P_{out} と比例関係にあると仮定し、比例係数 A を用いると(3)のように表す。

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV_{out}(t)}{dt} \quad (3)$$

これを(2)に代入すること

$$\frac{1}{Z} \cdot \frac{dV_{out}(t)}{dt} + V_{out}(t) = A \cdot P_{in}(t) \cdot u(t - L) \quad (4)$$

この時、 $G = AP_{in}$, $\tau = \frac{1}{Z}$ として(4)の微分方程式を解くと膀胱内蓄尿量 $V_{out}(t)$ を以下の式で表すことができる

$$V_{out}(t) = G[1 - \exp\{-\frac{t-M}{\tau}\}] \cdot u(t - L) \quad (4)$$

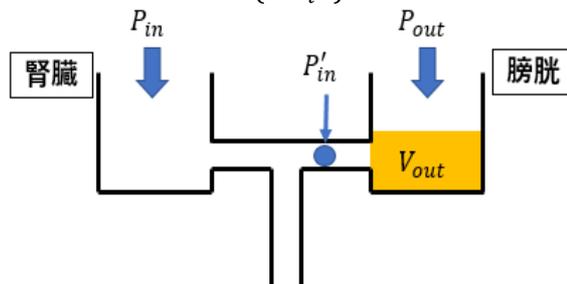


Fig1 膀胱内蓄尿量の生成を表した図

2.2 膀胱内蓄尿量予測

本研究では式(4)に、排尿時に求まる時定数 \hat{Z} 、

A model for unconstrained urinary bladder predictor incorporating total body water
†Naoki Shibue, Takashi Kaburagi, Yosuke Kurihara
‡Aoyama Gakuin University

ゲイン \hat{G} 、むだ時間 \hat{L} を用いて次の排尿時までの膀胱内に尿が蓄積する過程を次のように定義する。

$$\hat{V}_{out}(t) = \hat{G}[1 - \exp\{-\hat{Z}(t - \hat{L})\}] \cdot u(t - \hat{L}) \quad (5)$$

ここで、時定数 \hat{Z} 、ゲイン \hat{G} 、むだ時間 \hat{L} は実際の排尿後の尿の分光し、得られる吸光スペクトルから推定する。推定式は拘束性のある超音波センサから得られる時定数、ゲイン、むだ時間を真値とし、以下の単回帰式で求める。

$$\begin{aligned} \hat{Z} &= \beta_{(\min z, k, 1)} \lambda_{\min z_K} + \beta_{(\min z, k, 0)} \\ \hat{G} &= \beta_{(\min g, k, 1)} \lambda_{\min g_K} + \beta_{(\min g, k, 0)} \\ \hat{L} &= \beta_{(\min m, k, 1)} \lambda_{\min m_K} + \beta_{(\min m, k, 0)} \end{aligned} \quad (6)$$

3. 膀胱内蓄尿量予測実験

本実験では被験者男性1名の6日分の計測を行った。被験者は拘束性のある超音波センサを着用し、実験中の膀胱内に尿が蓄積する過程を計測する。実験中の水分摂取飲料は水に限定する。

得られたパラメータを用いて膀胱内蓄尿量の推定を行い得られた値を予測値 V とする。本実験では計測時に尿の採取をおこない、実の尿量を真値 S と排尿時刻を T_{out} としたときの $V = \hat{V}_{out}(T_{out})$ の誤差率 E を算出し、比較することで評価をおこなう。

$$E = \frac{|V - S|}{S} \cdot 100 \quad (7)$$

誤差率 E を算出した後、超音波センサと実測値の誤差率 E_1 とモデル式から得られる膀胱内蓄尿量の予測値と実測値の誤差率 E_2 の t 検定を行い有意性を判断する。

4. 実験結果

今回の実験で式(6)を求める時に用いた排尿データと吸光スペクトルをFig2,3に示す。Fig4,5は式(6)から得られた予測値 V の膀胱内蓄尿量推移予測データと、その時の吸光スペクトルを示す。今回計測した全24データの超音波センサの平均誤差率は22.3%で提案手法により予測した結果に対する誤差率は16.1%となった。また t 検定を行った結果、5%の有意水準で棄却されたので、有意性があると判断する。

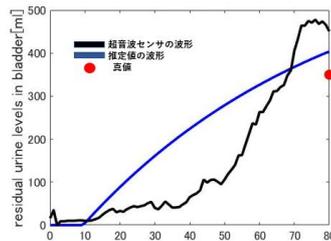


Fig2 単回帰式を求める時に用いた排尿データ

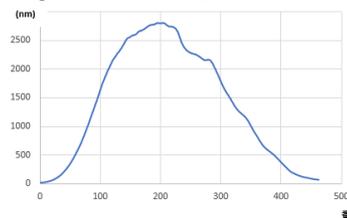


Fig3 単回帰式を求める時に用いた吸光スペクトル

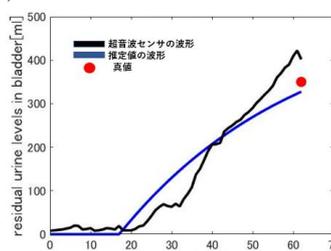


Fig4 膀胱内蓄尿量推移予測データ

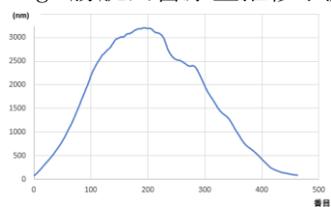


Fig5 膀胱内蓄尿量推移予測に用いた吸光スペクトル

5. 考察

今回の実験の結果は超音波センサで算出した数値の誤差率よりも、モデル式で算出した予測値の誤差率の方が良い結果を表した。しかし、推定値の中には非常に高い誤差率を示した予測値があった。これは超音波センサから得られたむだ時間と実験から求めたむだ時間 \hat{L} の誤差が大きかったため排尿後に得られた尿の吸光スペクトルから正しく膀胱内蓄尿量推移を計測できなかったと考えられる。

参考文献

[1]総務省統計局: 高齢者の人口, (2012)
 [2]厚生労働省:平成26年度 国民医療費の概況, (2014)
 [3]渡辺 隼, 経腹的3次元超音波センサによる膀胱容量の経時的計測, Jpn J Med Ultrasonics, 41 (3), 367-373, 2014.
 [4]武藤盛恭, 鍋木崇史, 栗原陽介, 膀胱内蓄尿量予測モデルの構築および超音波計測における誤差補正法の開発, IPSJ SIG Technical Report, 2017