

原尿再吸収を考慮した膀胱内蓄尿量モデルの提案

服部慎^{†1} 山崎智将^{†2} 鏑木崇史^{†3} 栗原陽介^{†1}
青山学院大学^{†1} 青山学院大学大学院^{†2} 国際基督教大学^{†3}

1. はじめに

内閣府の平成 26 年の高齢社会白書によれば平成 25 年 (2013 年) の日本の総人口は約 1 億 2730 万人でありその中で 65 歳以上の高齢者は 3190 万人で総人口数の 25.1% が高齢者である。日本は総人口数が減少する中で高齢者の人口が増加していき、さらに生産人口の減少や少子化などの問題を抱えている。また内閣府の報告によれば今後、このような問題はさらに発展していき 2060 年には総人口が 8674 万人と減少していく中で高齢化率は 40% に到達すると推定されている[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尿失禁という症状はその内の一つである。尿失禁とは膀胱に貯留した尿が不随意または無意識のうちに、尿道もしくはそれ以外の部位を通じて外陰部に漏出する状態である。また加齢と共に尿失禁の症状の発症率は増加している。そして尿失禁によって現在、様々な問題が引き起こされている。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。また尿失禁してしまった本人は自身の排尿により下着が蒸れてしまい皮膚の炎症の原因となる可能性があると考えられている。そして尿失禁によって引き起こされる最も大きな影響は尿失禁してしまった当事者の精神的影響である。排泄の援助を受けることは、日常生活の中で最も羞恥心を持ちやすく、自尊心が傷つけられやすいものであり自己嫌悪に陥ることがある。さらに排泄行為での失態は社会的尊厳や威厳の失墜に繋がる可能性があり尿失禁によって与えられる精神的ストレスは大きくうつ病などの精神の病気に繋がるだけでなく当事者の立場に影響を与えることがある。高齢化率の増加が予測される日本ではこのような尿失禁問題がより顕著に表れると考えられる。

在宅介護や介護施設では尿失禁の排尿管理方法において最も用いられているのがおむつである。おむつはコスト面において安価であることに加え簡易的であることが理由で最も用いられている。しかし事後処理による介護スタッフの負担増加や、患者が尿路感染症を引き起こすなどの問題がある。

筆者らのグループではこのような背景に鑑みて、腎臓で原尿が生成され膀胱に蓄尿される過程を表す 1 階の微分方程式をモデルとし、そのモデルをもとに膀胱内の蓄尿量を予測する手法を提案してきた[3]。しかし、従来モデルでは、原尿が

体内に再吸収される過程において、膀胱内に流入する尿の影響を無視していた。そこで、本研究では再吸収中及び再吸収後のそれぞれにおいて、膀胱内の蓄尿量の推移を独立した 1 階の微分方程式で表すモデルを提案する。

2. 提案手法

人体の体重の約 60% は水分で構成されている。体内への水分の入力は、飲用・食事による経口水分補給によっておこなわれる。口から入力された水分は腸内に吸収され血液内へと送られる。反対に体外への出力は主に排尿によっておこなわれている。このような水分の入出力をおこなう中で、腎臓は体内水分量の恒常性の維持に重要な役割を果たしており、その変動は 2% とごくわずかである。血漿中における水分は、腎臓内において糸球体からボーマン嚢へと血圧で押し出され濾過する事で原尿へと変換される。生成される原尿量は 1 日に約 900~1000ml であり、筋原性の自動調節により血圧が多少変動しても一定に生成される。生成された原尿はその後、尿細管から集合管を通り膀胱内に流入する。また、体内水分量の恒常性の維持の為に、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。体内の水分量が不足すると再吸収を増加し、逆に水分量が過剰になると再吸収を抑えることで体内水分量を適正值に保つ。

以上の事を踏まえたうえで、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おこなう。図 1 に本研究で用いる膀胱内蓄尿量モデル図を示す。

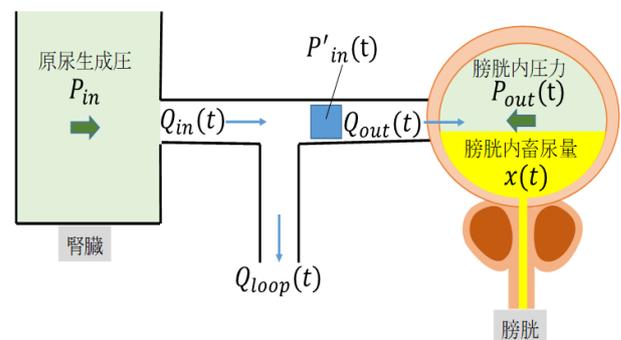


図 1 膀胱内蓄尿量モデル図

How to Prepare Your National Convention of IPSJ Reports in MS-Word
†1 SHIN HATTORI, Aoyama Gakuin University.
†2 TOMOMASA YAMASAKI, Aoyama Gakuin University

†3 TAKASHI KABURAGI, International Christian University
†1 YOSUKE KURIHARA, Aoyama Gakuin University.

原尿が生成される際に掛かる一定の圧を原尿生成圧 P_{in} [Pa]とした時, 図 1 で表される腎臓から膀胱への経路内にある $P'_{in}(t)$ における圧は, P_{in} が一定である為ステップ関数 $u(t)$ を用いて以下の式で表す事が出来る.

$$P'_{in}(t) = P_{in} \cdot u(t) \quad (2.1)$$

本研究では,原尿生成圧と膀胱内圧 $P_{out}(t)$ [Pa]の差によって尿が膀胱内に押し出されると考えた.その際,尿が一気に膀胱内に蓄積されるということはないため,比例係数 Z を与える事で膀胱内圧力は以下の式で表す事が出来る.

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} = Z \cdot (P_{in} \cdot u(t) - P_{out}(t)) \quad (2.2)$$

膀胱内に流入する尿量 $Q_{out}(t)$ [ml]は,生成された原尿量 $Q_{in}(t)$ [ml]から再吸収量 $Q_{loop}(t)$ [ml]をひいた値であり,

$$Q_{out}(t) = Q_{in}(t) - Q_{loop}(t) \quad (2.3)$$

膀胱内蓄尿量 $x(t)$ は,流入した尿量が蓄積した値の為,以下の式で表す事が出来る.

$$\begin{aligned} x(t) &= \int^t (Q_{in} - Q_{loop})dt \\ &= \int^t Q_{out}(t)dt \end{aligned} \quad (2.4)$$

また,排尿後に体内水分量が適正值になるまでの間は,原尿が膀胱に移行する過程で再吸収されると考えられる.本研究では,原尿が再吸収される過程においても少量の尿は膀胱内に流入すると考える.そこで再吸収中および再吸収後のそれぞれにおいて膀胱内蓄尿量モデル $x(t)$ を表す.体内水分量が十分になり再吸収が終わる時間を λ とし,再吸収量 $Q_{loop}(t)$ を(2.5)式で表す.

$$Q_{loop}(t) = \begin{cases} Q_{1loop} & t \leq \lambda \\ Q_{2loop} & t > \lambda \end{cases} \quad (2.5)$$

以上の(2.5)式の事を踏まえると,尿量は以下のような式で表せる.

$$Q_{out}(t) = \begin{cases} Q_{1in} & t \leq \lambda \\ Q_{2in} & t > \lambda \end{cases} \quad (2.6)$$

つまり,膀胱内蓄尿量は再吸収が終了する時間 λ を考えると以下のような事が言える.

$$x(t) = \begin{cases} \int Q_{1in}dt & t \leq \lambda \\ \int Q_{2in}dt & t > \lambda \end{cases} \quad (2.7)$$

また, $P'_{in}(t)$ における圧は

$$P'_{in}(t) = \begin{cases} P_{1in} \cdot u(t) & t \leq \lambda \\ P_{2in} \cdot u(t) & t > \lambda \end{cases} \quad (2.8)$$

原尿生成圧を P'_{in} [Pa]と置き換えて考えると膀胱内圧力は,再吸収中と再吸収後で以下の2式で表す事が出来る.

$$\begin{aligned} \frac{dP_{1out}(t)}{dt} &= Z \cdot (P'_{1in}(t) - P_{1out}(t)) \\ &= Z \cdot \{P_{1in}u(t) - P_{1out}(t)\} & t \leq \lambda \\ \frac{dP_{2out}(t)}{dt} &= Z \cdot (P'_{2in}(t) - P_{2out}(t)) \\ &= Z \cdot \{P_{2in}u(t) - P_{2out}(t)\} & t > \lambda \end{aligned} \quad (2.9)$$

(2.9)式を展開すると

$$\begin{aligned} \frac{dP_{1out}(t)}{dt} + Z \cdot P_{1out}(t) &= Z \cdot P_{1in} \cdot u(t) & t \leq \lambda \\ \frac{dP_{2out}(t)}{dt} + Z \cdot P_{2out}(t) &= Z \cdot P_{2in} \cdot u(t) & t > \lambda \end{aligned} \quad (2.10)$$

また,膀胱内圧力 $P_{out}(t)$ [Pa], は膀胱内蓄尿量 $x(t)$ と比例関係にあると仮定し,単位変換の為に比例係数 A を与えると,

$$P_{out}(t) = Ax(t) \quad (2.11)$$

両辺を微分すると以下の式で表せる.

$$\frac{dP_{out}(t)}{dt} = A \cdot \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.12)$$

(2.10)式に(2.11),(2.12)式を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z} \cdot \frac{dx_1(t)}{dt} + x_1(t) &= \frac{1}{A} \cdot P_{1in} \cdot u(t) & t \leq \lambda \\ \frac{1}{Z} \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + x_2(t) &= \frac{1}{A} \cdot P_{2in} \cdot u(t) & t > \lambda \end{aligned} \quad (2.13)$$

この時,ゲイン $\kappa_1 = \frac{P_{1in}}{A}, \kappa_2 = \frac{P_{2in}}{A}$, 時定数 $\tau_1 = \frac{1}{Z}, \tau_2 = \frac{1}{Z}$ と

して(2.11)の微分方程式を解くと膀胱内蓄尿量モデル $x(t)$ を以下の2式で表すことができる.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \kappa_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \cdot u(t) \right\} & t \leq \lambda \\ x_2(t) &= \kappa_2 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \cdot u(t) \right\} + x_1(\lambda) & t > \lambda \end{aligned} \quad (2.14)$$

本研究では膀胱内蓄尿量モデル(2.14)式に対し,再吸収が終わる時間 λ ,どこまで漸近するかを表すゲイン $\kappa_1 \cdot \kappa_2$, どれだけ早く尿が蓄積するかを表す時定数 $\tau_1 \cdot \tau_2$ の5つのパラメータを推測し,与えることで膀胱内蓄尿量モデル $x(t)$ を表す事が出来る.

最適なパラメータで求めた膀胱内蓄尿量モデル $x(t)$ と超音波センサからの出力信号を比較することで、提案モデルの妥当性について検証する。

3. 実験

3.1 信号処理

図 2 は本実験で用いる超音波センサで得られる出力信号 $y_{j-1|j}(k)$ の時系列を表す図である。 T_j は排尿タイミング、 S_i は排尿から次の排尿までの区間、 $y_{j-1|j}(k)$ は計測した時系列状の観測信号を表す。なお i は観測あるいは観測タイミングの番号を示し、 j はデータ番号を示す。

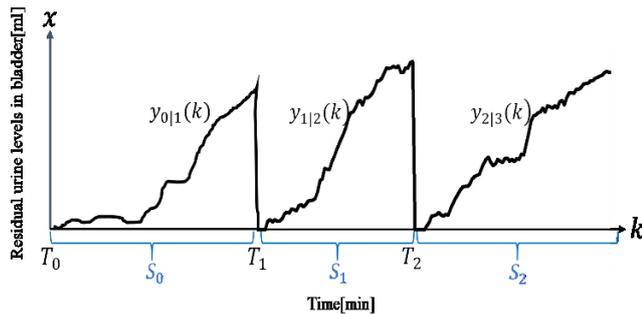


図 2 膀胱内蓄尿量推移

時刻 T_j で超音波センサにより得られる区間 S_i における観測信号 $y_{j-1|j}(k)$ を離散時間 k で以下のように表す。

$$y_{j-1|j}(k) \quad k = 0, 1 \dots T_j \quad (3.1)$$

観測信号 $y_{j-1|j}(k)$ に対して、再吸収が終了する時間 λ_j を決定し、観測信号を再吸収中 $y_{1j-1|j}(k)$ と再吸収後 $y_{2j-1|j}(k)$ に切り分ける。

$$\begin{aligned} y_{1j-1|j}(k) & \quad k = 0, 1 \dots \lambda_j \\ y_{2j-1|j}(k) & \quad k = \lambda_j + 1, \dots T_j \end{aligned} \quad (3.2)$$

時系列データ(3.2)式に対しそれぞれで内点法を適用することでゲイン $\kappa_1 \cdot \kappa_2$ と時定数 $\tau_1 \cdot \tau_2$ を算出することができ、区間 S_i における 5 つのパラメータを推定する事ができ、求めたパラメータによりデータ j におけるモデル $x_j(t)$ が求まる。

3.2 超音波センサによる膀胱内蓄尿量の計測

膀胱用超音波センサ(株式会社リリアム大塚製：リリアム α -200)を用いて膀胱内尿推移の計測をおこなう。リリアム α -200の仕様を表 1 に記す。

表 1 リリアム α -200仕様

一般的名称	膀胱用超音波画像診断装置
販売名	リリアム α -200
医療機器 認証番号	227ADBZX00146000

測定精度	$\pm 15\% + 20\text{mL}$
クラス分類	クラス II
サイズ	測定器本体 120(H) \times 68(W) \times 27(D)mm
基本機能	残尿測定：位置決めモードにより簡単に膀胱内の尿量測定を行う
	排尿タイミングモード：任意に設定した膀胱内尿量で患者さんに通知する
	定時測定モード：連続的尿量測定により蓄尿・排尿状態を把握する
	排尿日誌機能：排尿時にボタンを押すことで排尿日誌の作成が可能
測定原理	貼付型プローブより発する超音波(Aモード)により、膀胱の前壁と後壁間の距離を要素とする指標を用いて、膀胱内に溜まっている尿量を推定する

膀胱用超音波センサは、貼付型のプローブより発する超音波により、膀胱の前壁と後壁間の距離を要素とする指標を用いて膀胱内に溜まっている尿量を推定する。その際に膀胱の前部分に位置する恥骨は超音波を通すことが出来ない為、当ててしまうと上手く計測する事が出来なくなってしまう。その為、恥骨部分を避けて超音波を膀胱に当てる必要がある。

プローブの装着には安定した計測をおこなう為に、仰臥位状態でおこなう。恥骨部分を自身の手で確認し、腹部体表面の恥骨より 1 cm上の位置にプローブを当てる。その後、ディスプレイに表示されるインジケータを確認し、一番下のマスが点灯するように微調整をおこなう。プローブと腹部体表面の間には、リリアムジェル 50 を塗布し、ずれ防止の為に固定用テープを貼り付け、上から固定帯をまくことでプローブを固定する。

3.3 実験環境

実験部屋として、青山学院大学相模原キャンパス O-110 教室を用いる。室温は 27°C に設定し環境変化は起こらないようにする。本実験では過度な動きは起こらないようお願いし、基本的にはメーカーが推奨している計測姿勢である少し後ろのめりの座位状態での計測をする。

3.4 実験手順および被験者

超音波センサで膀胱内尿量を計測するに際し、膀胱内に尿がある程度溜まっていないと膀胱を捉えることが出来ず、インジケータが点灯しない。その為、超音波センサ装着は、尿がある程度溜まっている状態でおこなう。

装着後、トイレで排尿をおこない、その後水分の摂取をする。水分摂取を計測開始とし、尿意を催して排尿をおこなうまでを 1 データとして計測をおこなう。図 3 に本研究の実

手順を示す。なお、本実験では排尿後の飲料を水 300ml に固定し、計測間は水分摂取を禁止とする。

超音波センサとしてリリアム α-200 を用い、サンプリング間隔は 60s とした。被験者は 20 代男性 5 名とし実験を行った。

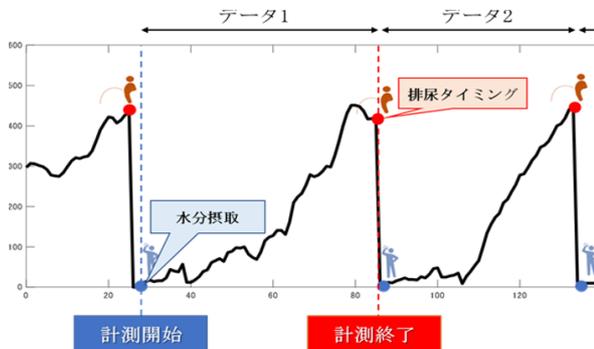


図 3 実験手順

3.5 評価方法

真値を超音波センサから得られる出力信号 $y_{j-1j}(k)$ として、膀胱内蓄尿量モデル $x_j(k)$ との二乗平均平方誤差 (RMSE) を求め、膀胱内蓄尿量モデルが超音波センサによって取得した時系列データについてどれほどフィットしているかを評価する。データ数は計 47 点で従来のモデルとの RMSE の平均と比較することでモデルの妥当性を評価する。

$$RMSE = \frac{1}{Y_j} \sum_{k=0}^{Y_j} \sqrt{\{y_{j-1j}(k) - x_j(k)\}^2}$$

ここで Y_j は超音波センサによって取得した時系列データ $y_{j-1j}(k)$ のデータ点数を示す。従来モデル [3] を適用した場合と膀胱内蓄尿量に関する 2 階の微分方程式をモデルとした場合とで同様に超音波センサとの RMSE を求め、提案モデルと比較する。

4. 実験結果

結果は以下の通りである。黒い線を超音波センサの時系列データ $y_{j-1j}(k)$ 、緑の線を膀胱内蓄尿量モデル $x_j(k)$ として、特に RMSE の値が低くなったデータの結果を図 4、図 5 に示す。

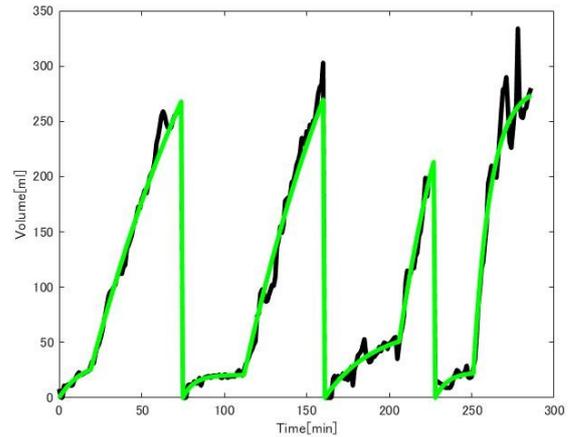


図 4 膀胱内蓄尿量モデル推定結果 1

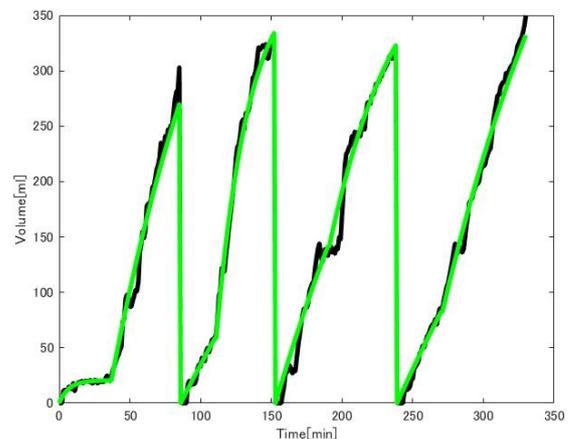


図 5 膀胱内蓄尿量モデル推定結果 2

図 6、図 7 には RMSE の値が高く、誤差が大きい結果になったデータの結果を示す。

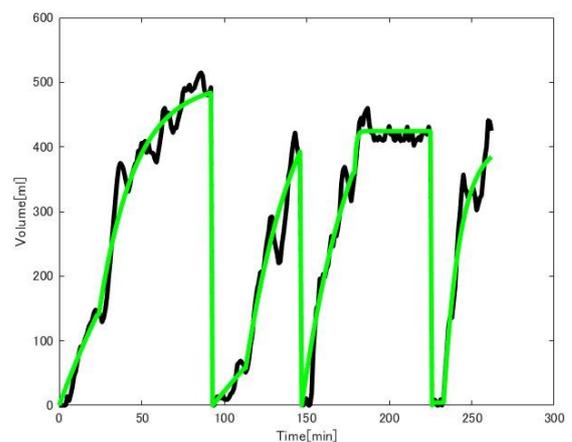


図 6 膀胱内蓄尿量モデル推定結果 3

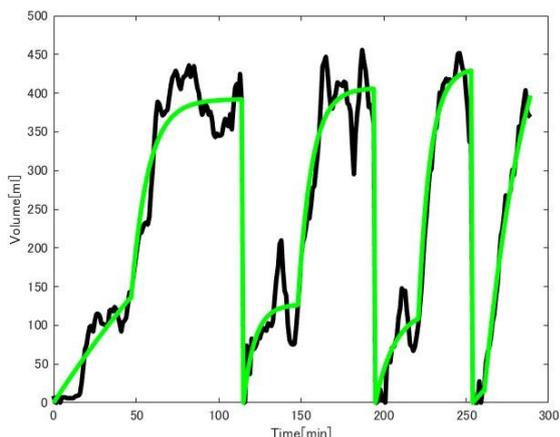
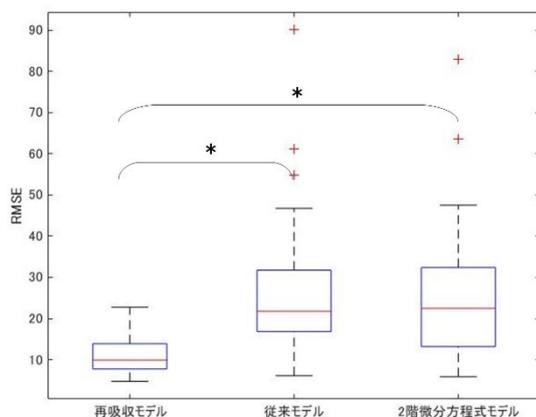


図 7 膀胱内蓄尿量モデル推定結果 4

図 8 には,本研究で提案したモデルと従来のモデルである,再吸収の過程を無視したモデルと 2 階の微分方程式で表したモデルのそれぞれの RMSE をプロットし, 5%水準で多重比較を行った結果を箱ひげ図を示す.表 2 には各モデルの RMSE の値の平均を示す.



*=5%水準

図 9 従来モデルとの比較(RMSE)

表 2 平均 RMSE

提案モデル	従来モデル[3]	2階微分方程式モデル
11.36ml	25.86ml	24.16ml

5. 考察

本研究で提案した,再吸収中と再吸収後のそれぞれにおいて膀胱内の蓄尿量の推移を独立した 1 階の微分方程式で表すモデルが最も低い RMSE の平均値を示し,RMSE のばらつきに関しても著しく小さい結果がみられた.また従来モデルとの間に 5%水準で有意差が見られたことから,従来のモデルに対する優位性も確認された.

従来のモデルでは,再吸収される過程では膀胱内に流入する尿の影響を無視していた.しかし実際の超音波センサの時系列データを見てみると,再吸収されていると考えられる時間の膀胱内蓄尿量は完全に 0 ではなく緩やかに上昇していく傾向がみられた.再吸収中と再吸収後それぞれで独立したモデルを構築することによって,それぞれで変化する膀胱内蓄尿量の上昇の仕方を変えたことがこのような結果になった要因と考えられる.

しかし今回提案したモデルでもいくつかのデータでは誤差が大きい結果がみられた.図 6,図 7 に示すデータを見てみると真値である超音波センサの測定値にばらつきがあり,単調に増加していくような時系列データを描けていない傾向がみられた.このことから超音波センサの測定精度に一定のノイズがあると考えられる.したがって超音波センサで計測する際に生じるノイズをフィルタリングし,ノイズ除去を行ってからパラメータの推定を行うことでより正確な膀胱内蓄尿量モデルを構築できると考えられる.

6. むすび

本研究では,原尿再吸収を考慮した膀胱内蓄尿量モデル提案し,超音波センサの実測値との比較を行った.結果より提案したモデルが最も適当であるとわかった.

今後は,今回用いたモデルをもとに膀胱内の蓄尿量を予測する手法の検証を行っていきたい.

参考文献

- [1] “総務省統計局: 高齢者の人口,(2012)” .
<http://www.stat.go.jp/data/topics/topi721.htm>
- [2] “厚生労働省:平成 26 年度 国民医療費の概況” .
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/k-iryohi/14/>
- [3] 武藤盛恭, 鐺木崇史, 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,IPSI SIG Technical Report,2017
- [4] 渋谷直樹, 鐺木崇史, 栗原陽介,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提案 ,National Convention,2018
- [5] NEIL M. RESNICK,M.D. AND SUBBARAO V. YALLA, M.D. “MANAGEMENT OF URINARY INCONTINENCE IN THE ELDERLY”,THE NEW ENGLAND JOURNAL OF

MEDICINE, vol.313, No.13, pp800-805, Sept, 1985

- [6] 鳥羽研二, 須藤紀子, 長野宏一郎, 江頭正人, 神崎恒一, 秋元雅弘, 橋本正良, 大内尉義, 折茂肇, 弓田清, 原奈津子, 福島康圭,
「薄膜型排尿センサを用いた, 高齢者機能性尿失禁患者の
排尿にともなうQCL改善の試み」, 日本老年医学会雑誌
33巻9号 (681~685)