

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

武藤盛恭^{†1} 鏑木崇史^{†2} 栗原陽介^{†2}

概要: 近年,尿失禁の対策として超音波センサが注目されている. しかし,超音波センサは膀胱内尿量を連続的に測定することが可能だが, 身体の動きなどにより数値に誤差が生じやすく測定精度はまだ確実なものではない. また,現在の時刻までの膀胱内の蓄尿量の推移しか計測することが出来ないため,介護者は常にチェックをする必要がある. もし,膀胱内における蓄尿量の予測を高精度に行うことが可能になれば,適切なタイミングでの排泄介助が可能となり,介護者の負担軽減や要介護者のQOL向上にも繋がる. よって本研究では,超音波センサの誤差補正法および超音波センサを用いた膀胱内蓄尿量予測モデルを提案する.

キーワード: 尿失禁,超音波センサ

1. はじめに

近年,高齢者人口の増加が社会問題となっている.[1]高齢者人口の増加により病院への通院者や医療費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. [2]高齢になるにつれて発症率が高くなる病気や症状は様々あるが,その中でも発症人口数が多い尿失禁は介護者への負担,医療費などの問題から特に社会問題として大きな課題となっている.日本でも60歳以上の高齢者の50%以上が尿失禁に悩まされているといわれており,その実数は300万人から400万人ともいわれている.尿失禁が及ぼす影響は多岐に渡り,施設においては衛生環境が悪化,清掃コスト,介護者の労働量の増加があげられる.また介護者に対しても皮膚の炎症,精神疾患の発病,威厳の低下などがあげられる.現在の介護施設においては,介護計画とともにおむつやカテーテルを用いる事により尿失禁対策をおこなっている.しかし,オムツにおいてはコスト面が安価だが,排尿後の対処になってしまい皮膚炎症の原因にもなる.また,着用を嫌がる高齢者も多い.カテーテルにおいては拘束性が非常に強く,尿道口の潰瘍形成,感染症,膀胱が萎縮し機能が廃絶するなどといった危険性がある.

近年,新たな尿失禁対策として超音波センサを使用した膀胱内水位測定[4-7]がおこなわれており,無線周波数識別技術[8]や機械学習法[8]を用いての研究もおこなわれている.しかし,現状,超音波センサによる計測は誤差を多く含み精度は正確とは言えない.デバイスの精度向上を目的とした渡辺らの研究[11]では,探触子を腹部に安定して接着させるための器具を開発し,膀胱容量結果を18%増しに較正することで誤差を12%内に収めている.しかし,この方法では要介護者に対する拘束性が非常に介護現場への導入には向いていない.その為,被介護者に対し拘束性が低く,非侵襲的で健康に危険性のない事前対処が可能である尿失禁対策が求

められている.

よって本研究では,超音波センサの誤差補正法および超音波センサを用いた膀胱内蓄尿量予測モデルを提案する.

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する.

体内に摂取された水分は小腸・大腸から吸収され静脈を通して血液に入る.血液は,個々の細胞への栄養素や酸素の運搬などの働きの他,細胞の活動の結果生じる代謝産物や二酸化炭素,余分な水分を腎臓や排泄機関に輸送する働きを持つ.腎臓に輸送された血液は腎臓内のネフロンを通して原尿へと変換される.原尿は1日に約160L生成され,腎細管から集合管を流れ下る際に水・ナトリウム・カリウム・アミノ酸・ブドウ糖など必要なものが再吸収される.そして,透過しきれなかった不要なものが尿として膀胱に蓄積していく.そのため,膀胱内の尿蓄積の推移は入力した水分が血液に変換されネフロンで原尿に変換されるまでの期間と原尿が尿に変換されるまでの期間の大きく2つに分けることができると考えられる.

この2つの期間において原尿に変換されるまでの期間は膀胱内にはまだ尿が生成されていないため,むだ時間 M として表すことができる.

$$x_1(t) = u(t - M) \quad [1]$$

[1]のステップ関数は $u(t)$ とする.

次に,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,以下のような微分方程式で表すことができる.

$$Z \frac{dx(t)}{dt} + x_1(t) = Gu(t) \quad [2]$$

†1 青山学院大学大学院

†2 青山学院大学

以上の二つのモデルが与えられたときにこの微分方程式を解くと膀胱内蓄尿量 $x_1(t)$ を以下の式で表すことができる。

$$x_1(t) = G \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t-M}{Z}\right) \cdot u(t-M) \right\} \quad [3]$$

2.2 超音波センサ誤差補正

超音波センサは膀胱内尿量を連続的に測定することが可能だが、測定精度はまだ確実なものではない。また、身体の動きなどにより数値に誤差が生じやすい。そこで本研究では、超音波センサの誤差補正法を提案する。

まず、超音波センサにより得られた時系列データ $x_{m0}(t)$ から内点法を用いてむだ時間 M_0 、時定数 Z_0 、ゲイン G_0 を求める。その後、時系列データからむだ時間 M_0 を取り除き、内点法で得られた時定数 Z_0 およびゲイン G_0 を用いてカルマン smootherをおこなう。得られた値に先ほど取り除いたむだ時間の時系列データを繋げて内点法をおこなうことで再度、むだ時間 $M_{0|0}$ 、時定数 $Z_{0|0}$ 、ゲイン $G_{0|0}$ を求める。最後に 2.1 で提案したモデル式に得られた値を代入することで、誤差を取り除いた時系列データを求めることができる。

2.3 膀胱内蓄尿量予測

膀胱内蓄尿量予測システムを提案する。尿は血液によって運ばれてきた不要・有害な老廃物の排出のほかに血液量の調整という役割をもつ。体内の水分が不足すると喉の渇きを覚えさせると同時に、下垂体から抗利尿ホルモンが分泌され、ネフロンの上位尿細管～集合管での原尿の再吸収が増加する。それに伴い生成される尿量が減少する。また、逆に体内の水分が過剰になると原尿の再吸収を抑えられることで生成される尿量が増加する。そのため、尿生成量は入力水分量 W_0 のほかに体内水分量 B_0 にも大きく依存すると考えられる。

体内水分量 B_0 および入力水分量 W_0 からむだ時間 M_0 、時定数 Z_0 、ゲイン G_0 の計 3 点の推測値を求める。

$$\begin{aligned} M_0 &= f(B_0, W_0) \\ Z_0 &= g(B_0, W_0) \\ G_0 &= h(B_0, W_0) \end{aligned} \quad [4]$$

得られた値を[3]の提案モデルに代入することで膀胱内蓄尿量の予測をすることができる。

$$x_0(t) = G_0 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t-M_0}{Z_0}\right) \cdot u(t-M_0) \right\} \quad [5]$$

また、その日の体調や環境などの変化により、尿生成量が増加することが考えられるため、1 回目の予測以降は補正をおこなっていく。水分を入力してから排尿をおこなうまでを 1 ブロックとし、前ブロックでの超音波センサから得られた時系列データを提案手法 2.2 を用いて補正をおこないむだ時間 $M_{0|0}$ 、時定数 $Z_{0|0}$ 、ゲイン $G_{0|0}$ の計 3 点を求める。その後、得られた値と前ブロックでの推定値との誤差を求める。

$$\Delta_{m0}M = \frac{M_0}{M_{0|0}}$$

$$\Delta_{m0}Z = \frac{Z_0}{Z_{0|0}}$$

$$\Delta_{m0}G = \frac{G_0}{G_{0|0}} \quad [6]$$

その後、尿蓄積推定をおこなう際に再度、体内水分量 B_1 および入力水分量 W_1 からむだ時間 M_1 、時定数 Z_1 、ゲイン G_1 の計 3 点の推測をおこない、上記で求めた誤差 $\Delta_{m0}M$ 、 $\Delta_{m0}Z$ 、 $\Delta_{m0}G$ を乗じることで補正をおこなっていく。

$$\begin{aligned} M_{1|1} &= M_1 \Delta_{m0}M \\ Z_{1|1} &= Z_1 \Delta_{m0}Z \\ G_{1|1} &= G_1 \Delta_{m0}G \end{aligned} \quad [7]$$

得られた値を[3]の提案モデルに代入することで膀胱内蓄尿量を補正し予測をおこなう。

$$x_{1|1}(t) = G_{1|1} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t-M_{1|1}}{Z_{1|1}}\right) \cdot u(t-M_{1|1}) \right\} \quad [8]$$

3. 実験

3.1 超音波センサ誤差補正実験

超音波センサで計測をおこない提案手法 2.2 を用いて補正をおこなう。計測時に尿の採取をおこない得られた値を真値とし、補正前と補正後の評価をおこなう。評価方法は、排尿タイミングでの時系列データの値と真値の絶対誤差を求め、真値で除算、その後 100 を乗算することで誤差率を算出し、値を比べることでおこなう。

なお、本研究では超音波センサとして膀胱用超音波センサ リリアム α-200 を用いた。



図 1 リリアム大塚

3.2 膀胱内蓄尿量予測実験

本実験ではむだ時間 M 、時定数 Z 、ゲイン G の推定をおこなう際に、体内水分量を被験者の自己申告による喉の渇きから 5 段階のレベルにわけておこなう。重回帰分析の結果から重相関の低いゲインは 400 に固定し、むだ時間および時定数は表 1 の通りに固定しておこなった。

表 1 むだ時間 M,時定数 Z,ゲイン G パラメータ

レベル	喉の状態	むだ時間	時定数	ゲイン
1	喉が凄く乾いている状態	60.8	119.7	400
2	喉が少し乾いている状態	49.6	93.9	400
3	通常状態	38.3	68.0	400
4	喉が潤っている状態	27.1	42.2	400
5	水を飲むのが困難な状態	15.8	16.4	400

得られたパラメータを用いて膀胱内総尿量の推定をおこなっていく.本実験では計測時に尿の採取をおこない,得られた値を真値 S とする.

本実験では以下の式にて誤差率 E を算出し,比較することで評価をおこなう.

$$E = \frac{x_1(t) - S}{S} 100 \quad [9]$$

なお,本実験では被験者を 23 歳男性 1 名,入力する水分量を 300 ml に固定した.

4. 実験結果

4.1 超音波センサ誤差補正実験結果

超音波センサによる実測値と誤差補正をおこなったデータの比較結果を以下に示す.

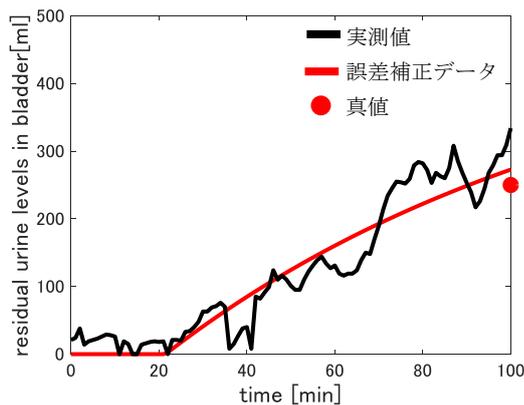


図 2 実測値および誤差補正データ No.1

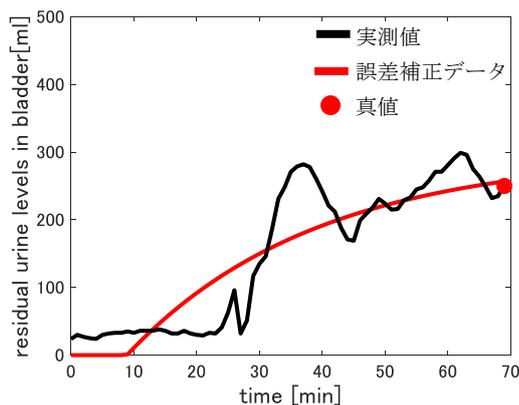


図 3 実測値および誤差補正データ No.2

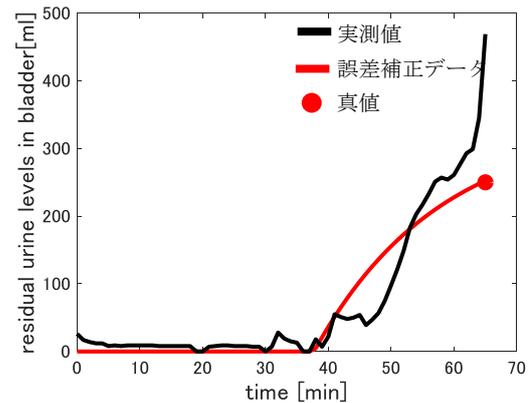


図 4 実測値および誤差補正データ No.3

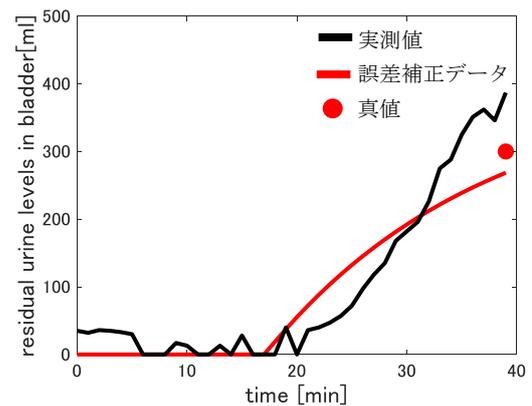


図 5 実測値および誤差補正データ No.4

表 2 実測値および誤差補正データ誤差率まとめ

	超音波センサ補正なし	超音波センサ補正あり
No.1	33.6%	9.1%
No.2	1.2%	2.7%
No.3	87.6%	1.0%
No.4	56.3%	10.5%
No.5	0.2%	10.6%
No.6	29.8%	3.9%
No.7	33.2%	7.6%
No.8	8.3%	49.8%
No.9	23.0%	11.6%
No.10	4.3%	10.6%
No.11	16.3%	4.3%
平均誤差率	26.7%	11.1%

4.1 膀胱内畜尿量予測実験結果

超音波センサによる実測値,推測値の三点を比較し評価をおこなった結果を以下に示す.

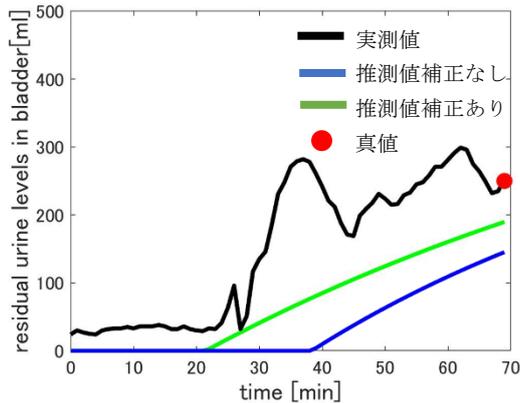


図9 実測値,補正なしの推測値,補正ありの推測値比較
NO.1

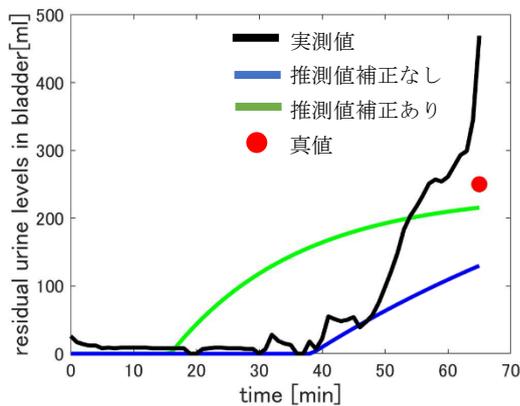


図10 図9 実測値,補正なしの推測値,補正ありの推測値比較 NO.2

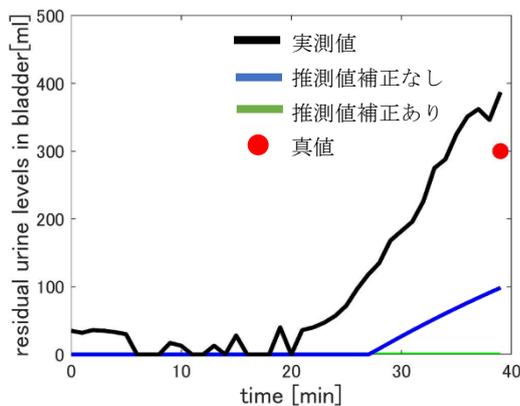


図11 図9 実測値,補正なしの推測値,補正ありの推測値比較 NO.3

表2 実測値, 補正なしの推測値,補正ありの推測値比較

	実測値	推測値補正なし	推測値補正あり
No,1	1.2%	41.9%	24.1%
No,2	87.6%	48.1%	13.8%
No,3	56.3%	67.2%	-

5. 考察

5.1 超音波センサ誤差補正実験結果考察

全体での平均誤差率において先行研究よりも高い精度がみられた.しかし,NO.8において49.8%という非常に誤差が大きい結果が確認された.これは被験者がトイレに移動した際に超音波センサによる計測で大きく値が下がってしまったことが原因だと考えられる.

5.2 体内水分量および飲料によるパラメータ推定評価考察

むだ時間および時定数においては相関関係がみられたが,ゲインにおいては相関が非常に低い結果が得られた.これは飲量による影響が大きいという事が原因だと考えられる.

5.3 膀胱内畜尿量予測実験結果考察

補正ありの推測値においてむだ時間の値が非常に大きくなってしまったという結果が確認された.制約条件をつける必要があると考えられる.

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]H. Chan, "Noninvasive bladder volume measurement." Journal of Neuroscience Nursing, vol. 25, pp. 309-312, 1993.
- [4]Resources in Arizona and the Southwest, Vol 6, 1976.
- [5]Taylor, Francis, "Novel algorithms for reducing bladder volume estimation error caused by scanning positions" in International Journal of Computer Mathematics, Volume 94 Issue 6, June 2017,pp. 1138-1154
- [6]C.C. Liang, T.Y. Wei, S.D. Chang, C.C. Hsieh
- [7]Bladder volume determination: two-dimensional versus three-dimensional transvaginal ultrasound"Taiwan J Obstet Gynecol, 483 (2009), pp. 258-261
- [8]Ghani, K. R., Pilcher, J., Rowland, D., Patel, U., Nassiri, D., & Anson, K. (2008). Portable Ultrasonography and Bladder Volume Accuracy-A Comparative Study Using Three-Dimensional Ultrasonography. Urology, 72(1), 24-28.
- [9]H. Nilsson, J. Sidén and M. Gulliksson, "An incontinence alarm solution utilizing RFID based sensor technology," in IEEE Int. Conf. on RFID-Technologies and Applications, pp. 359-363, 2011.
- [10]P. Fergus et al., "A position paper on predicting the onset of nocturnal enuresis using advanced machine learning," in Int. Conf. on Intelligent Computing, 2015, pp. 689-700.
- [11]渡辺決, 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.