

基于 Lognormal 函数的脉搏波数学建模

赵海, 窦圣昶, 李大舟, 陈星池

(东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 对健康的日常监测, 时间长, 数据量大. 为了简化数据量, 分析了现有的使用 2~4 个高斯函数拟合脉搏波的脉搏波数学建模方法, 在此基础上, 提出了 Lognormal 函数模型的数学建模方法. 使用 4 个 Lognormal 函数对脉搏波的一个周期进行拟合建模, 以脉搏波的生理特性为基础调整 4 个 Lognormal 函数的起始时间点, 并对其性能进行了分析对比. 结果表明, 与现有方法相比, Lognormal 函数模型不仅有更高的拟合精确度, 而且有更优的计算复杂度, 更适合以日常健康监测为目的的体域网健康大数据应用.

关 键 词: 脉搏波; 健康大数据; Lognormal 模型; 函数拟合; 健康监测

中图分类号: TP 274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)02-0169-05

Mathematical Modeling of Pulse Wave Based on Lognormal Function

ZHAO Hai, DOU Sheng-chang, LI Da-zhou, CHEN Xing-chi

(School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DOU Sheng-chang, E-mail: doushengc@qq.com)

Abstract: Daily monitoring health status needs long time, so the amount of health data is massive. In order to simplify the data, the existing mathematical methods of modeling pulse wave were analyzed which use two to four Gauss function to fit the pulse wave. Then, the mathematical modeling method of pulse wave based on Lognormal function was presented. A cycle of pulse wave was modeled by using four Lognormal functions. The starting time points of the four Lognormal functions were adjusted based on the physiological characteristics of the pulse wave, and the performance of the model was analyzed and compared with the existing methods. The results show that, compared with the existing methods, the Lognormal function model not only has a higher fitting accuracy, but also has better computational complexity, thus being more suitable for the big data application to daily health monitor in the body area network.

Key words: pulse wave; health big data; Lognormal model; function fitting; health monitoring

在大众需求日益多样化的今天, 人们自身的健康问题日益引起关注. 结合快速发展的物联网以及信息技术的发展, 以日常人体生理状态监测为目标的健康大数据成为新的研究热点, 与其相关的日常健康数据的采集、存储、传输与分析, 吸引了越来越多的企业和研究机构投身到该领域.

由于日常生活监测数据的大数据特性, 在不严重影响数据质量的前提下的数据建模、简化成为该领域的一个研究点. 本文在分析了现有的脉搏波数学建模方法后, 提出用 Lognormal 函数模

型实现对脉搏波的建模, 并对其性能进行了分析对比.

1 脉搏波建模的结构设计

作为人体重要的生理信号, 脉搏波是由心脏收缩向动脉射血产生, 脉搏波中不仅包含左心室射血产生的“主波峰”, 同时包含由于血管分岔等原因引起的反射波. 脉搏波的形成机制决定了其有多个波峰和长拖尾的波形特征^[1-2].

收稿日期: 2014-11-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH82F04).

作者简介: 赵海(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

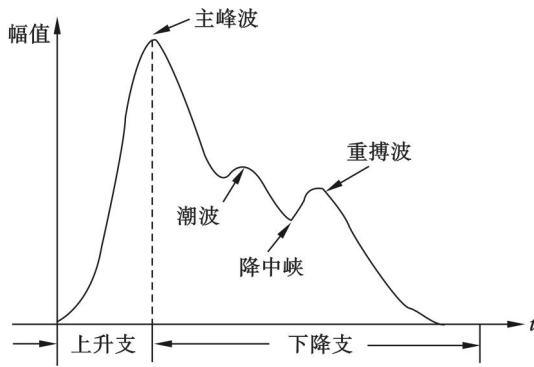


图 1 典型的脉搏波波形
Fig. 1 Typical pulse waveform

脉搏波的波形特性由其波峰的高度与位置,以及脉搏波周期长度决定.为了在不严重影响脉搏波波形特征的前提下,尽量减少脉搏波存储、传输中的数据量,学界提出对脉搏波进行数学建模,以减少数据量^[3].现有的建模方法多使用高斯函数对脉搏波进行拟合,将大量的脉搏波数据简化至几个高斯函数的参数^[4-5],从而在不严重影响脉搏波波形特性的情况下减少数据量.

鉴于高斯函数的对称性及脉搏波长拖尾的生理与波形特性,使用高斯函数的拟合结果有较大

误差.因此本文用 Lognormal 函数模型对脉搏波建模.

在 Lognormal 函数模型中,用 3 个 Lognormal 脉冲函数拟合 3 个波峰,同时,为了较好体现脉搏波的长拖尾特性,模型中增加第 4 个 Lognormal 脉冲函数,以达到较好的整体拟合效果.因此,在 Lognormal 函数模型中,针对脉搏波中的“主峰波”、“潮波”、“重搏波”以及长拖尾部分,使用“主峰脉冲”(P)、“潮脉冲”(T)、“重搏脉冲”(D)和“拖尾脉冲”(C)4 个 Lognormal 脉冲波进行拟合.

由脉搏波的生理形成机制可知,脉搏波是由左心室射血形成的主波与由此引起的反射波叠加而成的混合波,因此,各个拟合脉冲波的起始时间点有先后顺序;在 Lognormal 函数模型中,将各拟合脉冲的起始位置进行差异处理,以符合脉搏波生理机制,提高拟合精度.

各波峰形成诱因的先后顺序决定了 4 个 Lognormal 脉冲函数的起始时刻,因此,脉搏波可以看成是一个分段函数.分别以 t_s^P , t_s^T , t_s^D 和 t_s^C 表示 4 个脉冲函数的起始时刻,则脉搏波 $\tilde{X}(t)$ 可以表示为一个分段函数:

$$\tilde{X}(t) = \begin{cases} W_P(t - t_s^P), & t_s^P = 0, t_s^P < t < t_s^T; \\ W_P(t - t_s^P) + W_T(t - t_s^T), & t_s^T \leq t < t_s^D; \\ W_P(t - t_s^P) + W_T(t - t_s^T) + W_D(t - t_s^D), & t_s^D \leq t < t_s^C; \\ W_P(t - t_s^P) + W_T(t - t_s^T) + W_D(t - t_s^D) + W_C(t - t_s^C), & t_s^C \leq t \leq t_{\text{end}}. \end{cases} \quad (1)$$

$0 = t_s^P < t_s^T < t_s^D < t_s^C < t_{\text{end}}.$

式中: $W_P(t)$, $W_T(t)$, $W_D(t)$ 和 $W_C(t)$ 分别为“主峰脉冲”、“潮脉冲”、“重搏脉冲”和“拖尾脉冲”的函数表示; t_{end} 为脉冲函数结束时刻.

2 模型实现

为降低模型中参数的计算复杂度,将单次的多函数拟合简化为多次的单函数拟合;因此,模型的实现包括了模型参数的确定、单步拟合算法、单步拟合基础上的多次拟合.

2.1 模型参数确定

本文选用 Lognormal 函数作为脉冲函数表达式.在左心室开始射血,血液进入动脉中时,脉搏波的主峰波就已产生,因此, t_s^P 为起始的零时刻,即 $t_s^P = 0$.左心室射血结束时,脉搏波达到主波峰,之后主峰波逐渐降低,当血液在血管中流动引起的潮波产生后,脉搏波下降的趋势减缓,直至变

为再次上升,即脉搏波的潮波峰;因此,潮脉冲出现的时刻 t_s^T 应该是脉搏波第一个下降最快的时刻,即脉搏波的二阶导数第一次由负到正的零点.同理,可以确定 t_s^D 和 t_s^C 的值.

2.2 单步拟合算法

为简化拟合算法的复杂度,将单个多函数拟合简化为 4 个单函数拟合,即进行 4 次 Lognormal 函数拟合.由于在 $[t_s^P, t_s^T]$ 时间段内仅有主峰脉冲函数 $W_P(t)$,因此,在该时间段内的拟合仅需一个 Lognormal 函数的拟合,将脉搏波与拟合结果作差后即可进行后续的多次拟合.

单个 Lognormal 函数拟合即寻找 Lognormal 函数的 3 个参数的最优值,此为非线性最小二乘的寻优问题.实验中选择用于解决该问题的 Levenberg - Marquardt(LM)方法来求解.

2.3 逐次拟合算法

本文提出的 Lognormal 函数模型逐次使用

“主峰脉冲”、“潮脉冲”、“重搏脉冲”和“拖尾脉冲”4 个 Lognormal 脉冲波对脉搏波进行拟合, 每个脉冲的拟合即是一次单步拟合算法的应用。

拟合过程由 4 次拟合与 3 次波形差值分解组成, 每步均有各自的拟合误差。在本文的模型中, 首先在预处理阶段将脉搏波平移到原点, 并通过二次差分的方法计算出 4 个 Lognormal 脉冲函数

的起始时刻。在后续过程中, 上一次拟合的输入波形与拟合结果的差值即为下一次拟合的输入波形。拟合过程如图 2 所示。

逐次 Lognormal 脉冲函数拟合的过程与结果如图 3 所示, 其中 $X(t)$ 为预处理后的脉搏波, $M(t)$ 是脉冲拟合后的剩余波形。由图中纵坐标的变化可知, 4 次拟合后的误差相对于脉搏波已经足够小。

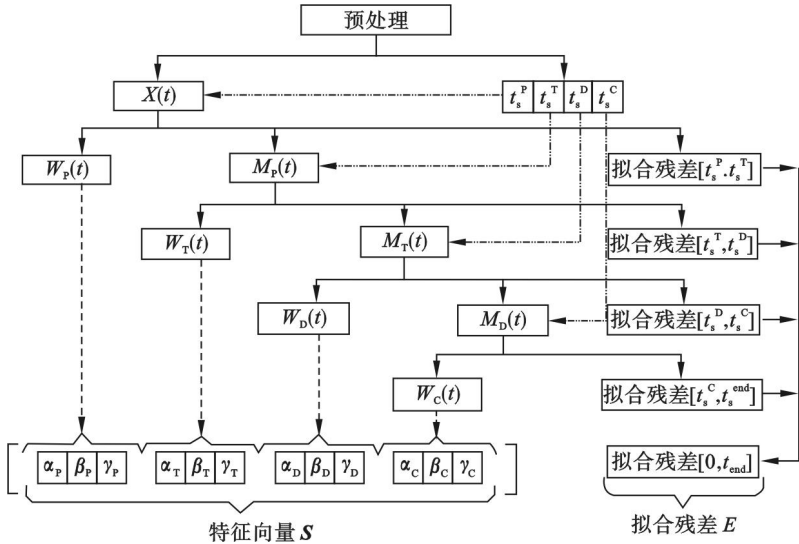


图 2 Lognormal 函数模型中 4 次单个 Lognormal 函数拟合步骤
Fig. 2 Four times curve fitting of single Lognormal function in the Lognormal function model

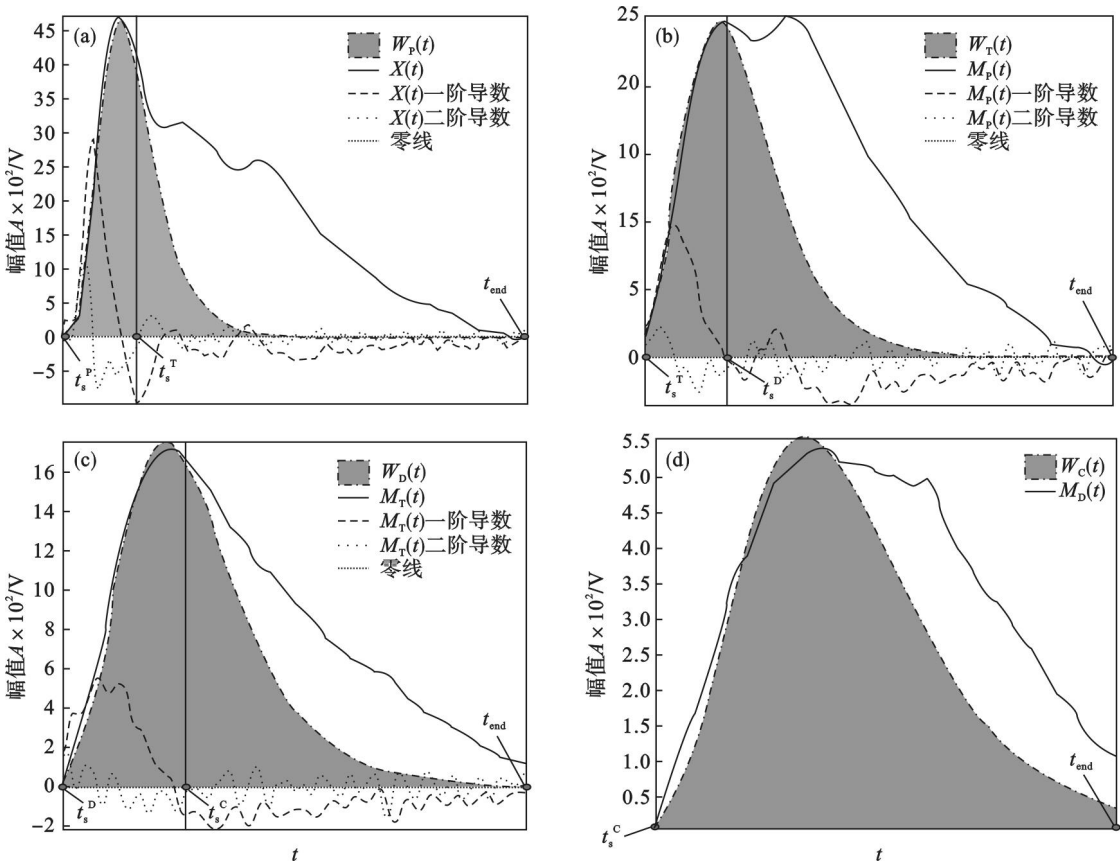


图 3 逐次拟合结果
Fig. 3 Successive fitting results
(a) —主峰脉冲拟合; (b) —潮脉冲拟合; (c) —重搏脉冲拟合; (d) —拖尾脉冲拟合。

4 次拟合后的整体结果如图 4 所示.

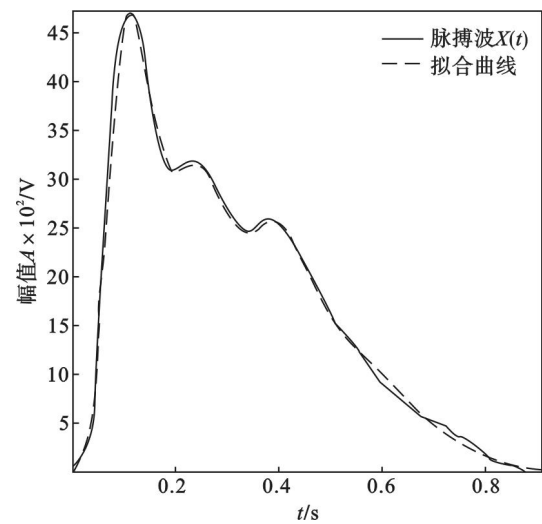


图 4 整体拟合结果
Fig. 4 Overall fitting results

通过拟合,将包含大量数据的脉搏波简化成一个 12 维的向量 S ,该向量由 4 个 Lognormal 函数的参数组合而成,即 $S = [\alpha_P, \beta_P, \gamma_P, \alpha_T, \beta_T, \gamma_T, \alpha_D, \beta_D, \gamma_D, \alpha_C, \beta_C, \gamma_C]$,该拟合结果保存了原始脉搏波中的波峰、周期等主要的生理特性,在减少数据量的同时保持了脉搏波的基本波形与特征.

3 性能评估

用本文的 Lognormal 函数模型对开放的脉搏波数据库中的波形数据进行建模,采用通用的指标对 Lognormal 函数模型的性能进行了分析,并与现有的其他模型进行了对比,以评估该模型的性能.

3.1 数据源

采用 MIMIC - II (multiparameter intelligent monitoring in intensive care)数据库^[6]中脉搏波信号对 Lognormal 函数模型进行评估,该数据库是由麻省理工学院(MIT)、飞利浦医疗系统,以及以色列狄肯尼斯医学中心联合开发的开放式数据库.

3.2 评价指标

本文采用 5 个指标^[7]进行性能评估:均方根误差 RMSE、模型效率 EF、平均差 MD、整群剩余系数 CRM、最大误差 ME.

3.3 评价结果

用 Lognormal 函数模型对 MIMIC - II 数据库中的 2 360 个脉搏波进行了检验,并将拟合效果与现有的拟合方法^[8-10]进行了对比,结果如表 1 所示.

表 1 4 种脉搏波模型的拟合条件和拟合精度
Table 1 Fitting conditions and precision of four models of pulse wave

拟合条件和精度指标		2 个 Gaussian 函数之和模型	3 个 Gaussian 函数之和模型	4 个 Gaussian 函数之和模型	4 个 Lognormal 函数之和模型
拟合条件	是否局部分段拟合	否	否	否	是
	参数个数	共 6 个参数 一次拟合全部	共 9 个参数 一次拟合全部	共 12 个参数 一次拟合全部	共 12 个参数,分 4 次拟合 一次拟合 3 个参数
拟合精度	平均 RMSE	0.212 0	0.188 2	0.161 2	0.017 9
	平均 EF	0.695 7	0.811 2	0.830 1	0.984 1
	平均 MD	0.371 3	0.092 4	0.099 5	0.006 9
	平均 CRM	0.016 1	0.009 2	0.008 3	0.001 3
	最大 ME	0.186 9	0.182 7	0.183 1	0.179 7

由表 1 可知,用 4 个 Lognormal 函数进行拟合的 Lognormal 函数模型具有一定的整体性能优势,同时,该模型的多次单函数拟合使得计算的复杂度大幅下降,成为可以在实时性要求较高的健康大数据日常采集环境中应用的算法模型.

4 结 论

针对健康大数据应用中日常采集的数据量

大,以及要求较快处理的特性,本文在分析现有脉搏波数学建模方法的优点与不足的基础上,提出了 Lognormal 函数模型,实现对脉搏波的建模.实验结果表明,本文提出的 Lognormal 函数模型能较好地拟合脉搏波,同时满足了在脉搏波数据的存储与传输中,对数据量及计算复杂度等性能的要求.

参考文献:

- [1] 姚泰, 吴博威. 生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2004: 103-107.
(Yao Tai, Wu Bo-wei. Physiology [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2004: 103-107.)
- [2] 徐久强, 蔺弘济, 李哈, 等. 基于心电与脉搏波的血压检测算法的改进[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 33-37.
(Xu Jiu-qiang, Lin Hong-ji, Li Han, et al. Improvement of blood pressure detection algorithm based on ECG and pulse wave [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(1): 33-37.)
- [3] Troxler M, Wilkinson D. An unusual cause of a "double pulse" [J]. EJVES Extra, 2007, 13(5): 72-74.
- [4] Martin-Martinez D, Casaseca-de-la-Higuera P, Martin-Fernandez M, et al. Stochastic modeling of the PPG signal: a synthesis-by-analysis approach with applications [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013, 60(9): 2432-2441.
- [5] He X, Goubran R A, Liu X P. Secondary peak detection of PPG signal for continuous cuffless arterial blood pressure intelligent monitoring in intensive care II (MIMIC-II): a public-access intensive care unit database [J]. Critical Care Medicine, 2011, 39(5): 952-960.
- [6] 周鸿飞, 陈志斌. 评价回归模型拟合效果的数量化方法 [J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(6): 455-458.
(Zhou Hong-fei, Chen Zhi-bin. Quantitative method for fitting effect of regression model [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2001, 32(6): 455-458.)
- [7] Colquhoun D, Dunn L K, McMurry T, et al. The relationship between the area of peripherally-derived pressure volume loops and systemic vascular resistance [J]. Journal of Clinical Monitoring and Computing, 2013, 27(6): 689-696.
- [8] Boon D, van Montfrans G A, Koopman M G, et al. Blood pressure response to uncomplicated hemodialysis: the importance of changes in stroke volume [J]. Nephron Clinical Practice, 2004, 96(3): c82-c87.
- [9] Thiele R H, Durieux M E. Arterial waveform analysis for the anesthesiologist: past, present, and future concepts [J]. Anesthesia & Analgesia, 2011, 113(4): 766-776.
- [10]

(上接第 168 页)

- [2] Russell N F. Complexity of control of Borda count elections [D]. Rochester:Rochester Institute of Technology,2007.
- [3] McLean I, Shephard N. A program to implement the Condorcet and Borda rules in a small- n election[R]. Oxford: Oxford University,2005.
- [4] Hill I D, Wichmann B A, Woodall D R. Algorithm 123, single transferable vote by Meek's method[J]. *Computer Journal*,1987,30(3):277-281.
- [5] Fisher J,Denver D T, Benyon J. Central debates in British politics[M]. Harlow:Longman,2002;12-26.
- [6] Henry M,Robert I. Robert's rules of order[M]. Boston:Da
- [7] Amar A R. Choosing representatives by lottery voting[J]. *Yale Law Journal*,1984,93(7):1283-1308.
- [8] Headlam J W. Election by lot at Athens[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2014;73-99.
- [9] Chen Z, Kalashnikov D V, Mehrotra S. Exploiting context analysis for combining multiple entity resolution systems[C]//Proceedings of SIGMOD International Conference on Management of Data. New York:ACM,2009;207-218.
- [10] Renda M E,Straccia U. Web metasearch;rank vs. score based rank aggregation methods[C]//Proceedings of Symposium on Applied Computing. New York:ACM,2003;841-846.