

基于X光吞咽视频的舌运动轨迹仿真研究

吴越¹, 钱善华¹, 邓大建², 王志勇³

1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 驻重庆地区第五军代室, 重庆 巴南 400054; 3. 福建医科大学第一附属医院, 福建 福州 350005

【摘要】为提高吞咽障碍患者的食物吞咽质量, 须深入研究口腔环境下食物吞咽的舌运动规律; 基于口腔吞咽的X-光运动视频, 通过提取特征图像开展舌吞咽运动的规律研究, 采用3种不同的方法开展舌运动轨迹方程的仿真研究。结果表明, 舌运动是由舌根点和运动点组成, 即舌根点轨迹类似于椭圆, 而舌运动点的轨迹类似于往复运动的直线; 多元非线性曲线快速拟合法、Lsqnonlin优化5次多项式函数和BP神经网络法3种方法的拟合方程的轨迹跟原始轨迹的相关系数分别为0.85、0.87和0.91, 发现神经网络模型更适用于天然舌运动轨迹的研究, 这将为功能食品研发和吞咽仿生装置设计提供技术参考。

【关键词】食物吞咽; 舌根点; 轨迹方程; 神经网络

【中图分类号】R318; Q811

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)09-1130-08

Tongue motion trajectory simulation based on the X-ray video of swallowing angiography

WU Yue¹, QIAN Shanhua¹, DENG Dajian², WANG Zhiyong³

1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. The Fifth Military Commission Office in Chongqing District, Ba'nán 400054, China; 3. The First Affiliated Hospital of Fujian Medical University, Fuzhou 350005, China

Abstract: To improve the quality of swallowing for the patients with dysphagia, it is necessary to analyze the tongue motions during swallowing. Based on the X-ray video of swallowing angiography, the characteristic images are extracted for analyzing the tongue motions during swallowing. Herein 3 different methods are used to investigate the tongue motion trajectory equation. The results indicated that the tongue motions are composed of tongue root point and several motor points. The motion of tongue root point is approximate to an ellipse, while those of tongue motor points are similar to reciprocating straight lines. The correlation coefficients between original trajectory and the simulated trajectories obtained by the fitting equations of 3 methods, namely multiple nonlinear curve-fitting method, Lsqnonlin optimization of 5 level polynomial function and back-propagation neural network method, were 0.85, 0.87 and 0.91, respectively. The neural network model is found to be more suitable for the simulation of tongue motion trajectory. These results will provide valuable technical reference for the development of functional food and swallowing device *in vitro*.

Keywords: food swallowing; tongue root point; trajectory equation; neural network

前言

吞咽困难已成为老年人、中风及食道病患者的

常见病症, 致使患者无法完成食物口腔吞咽动作并在进食时可能发生呛咳、窒息等风险。针对患者的吞咽困难, 通过肌肉康复训练, 改善食物的材质特性且施以相对安全的食物, 是解决吞咽困难患者饮食的重要辅助手段之一。为了研发合适的功能食物, 理解口腔环境下食物流动规律, 特别是食物在口腔环境下舌运动对食物流动的影响规律, 极为重要^[1-3]。但鉴于人体吞咽系统结构的复杂性, 尤其是口腔吞咽食物时的舌运动特性, 难以获取吞咽时食物流动等相关数据, 阻碍食物材质对口腔吞咽过程影响的研究以及体外仿生吞咽装置的开发^[4-5]。因此, 深入研究舌在吞咽食物时的运

【收稿日期】2020-03-26

【基金项目】国家自然科学基金(51775244); 江苏省自然科学基金(BK20161134); 中国博士后科学基金(2018T110439); 江苏省研究生科研与实践创新计划(SJCX19_0785)

【作者简介】吴越, 研究生, 研究方向: 仿生结构设计, E-mail: wuyue130622@126.com

【通信作者】钱善华, 博士(后), 副教授, 研究方向: 仿生机机械设计, E-mail: qianjnw@126.com.cn

动规律并采用合适的数学模型模拟人体吞咽动作,这将对吞咽障碍患者的功能食品的研发提供重要的技术参考。

目前,国内外学者针对吞咽仿真、仿生吞咽装置设计和功能食品研发等问题开展一系列卓有成效的研究。如 Redfearn 等^[6]开发一套食物吞咽模拟装置,即通过橡胶材料的变形来促进食物软管内流动,以实现人体吞咽动作的仿真,但未能很好地体现舌头运动规律。与此同时,很多学者采用各种理论模型来研究舌/上颌间隙变化与粘度、密度、摩擦力之间的关系^[7],其中两圆平面挤压是较为经典的舌/上颌简化模型^[8-12]。此外,雀巢公司还为吞咽困难患者开发了一批功能性食品^[13-14]。然而,这些工作并没有能完全理解食物在口腔环境下的吞咽过程,尤其是舌运动对吞咽的影响。

因此,本研究以真实食物吞咽的X射线视频为基础,采用图像分析软件对吞咽视频进行处理,分析在食物吞咽时的舌运动规律,并利用拟合分析软件(如 1stOpt 软件“快速公式拟合”、MATLAB 最小二乘优化法以及神经网络模型)对舌运动进行分析,揭示舌在吞咽食物时的运动规律,为吞咽困难患者功能性食品的开发以及体外模拟吞咽装置设计提供重要的技术参考。

1 舌运动特征点的提取

基于福州医科大学第一附属医院提供的正常人口腔吞咽X光的造影视频(该视频为与福州医科大学第一附属医院联合研究所得),如图1所示。其吞咽过程为食物进入口腔并通过会厌到达食道口。该视频制式为每秒25帧,吞咽持续时间约为1.8s,则整个吞咽过程是由45张图片组成,并采用Photoshop软件逐帧提取吞咽视频图片。最后,选择每个样本较为清晰且间隔时间近似相等的14张图片作为原始数据,利用犀牛软件及MATLAB软件提取舌头上各点坐标来探究其运动规律。

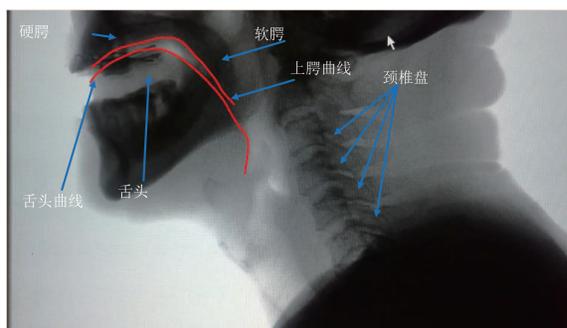


图1 口腔及颈部结构图

Fig.1 Structure of oral cavity and cervical vertebra

首先,基于Photoshop软件逐帧提取的45张吞咽图片,选择14张间隔时间近似相等的图片作为整个吞咽过程,吞咽时刻定义为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{12}, t_{13}$ 及 t_{14} 。其次,利用犀牛 Rhinoceros 三维建模软件对舌头的外部轮廓线进行描绘,并将每张图片的舌头曲线分为等距离的20个点,从舌根点开始到舌尖点,分别为 $C_0, C_1, C_2, \dots, C_{17}, C_{18}, C_{19}$ 。最后,以颈椎参考点 O 点、舌根点 C_0 分别为绝对坐标系及相对坐标系原点,采用MATLAB自制GUI程序依次提取曲线上舌点坐标,得到随时间变化舌点的绝对运动及相对运动坐标,如图2所示。人体生理解剖学表明人舌的尺寸约为 $100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ ^[15],基于视频提取的吞咽图片,像素点为 $1\,003 \times 565$,大小约为 $301\text{ mm} \times 170\text{ mm}$,根据提取坐标系刻度线10cm大小对应像素点为100个,其像素点对应距离为30mm,换算比例约为3:1,则提取的特征点坐标约为实际大小的3倍。

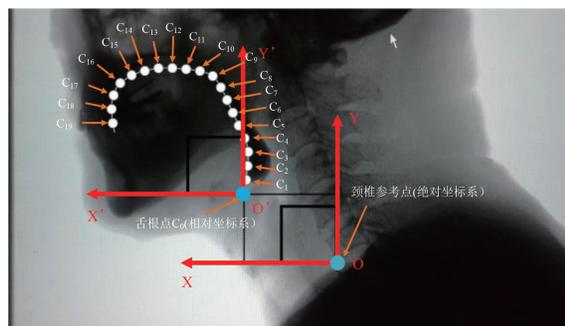


图2 舌头上各点以及绝对与相对坐标系

Fig.2 The points on the tongue and the absolute and relative coordinate systems

然而,由于志愿者在吞咽食物时无法将自己的头部固定,图3a所示为 $t_1=0\text{ s}$ 时刻下,下颚与相对参考系X坐标轴的夹角为 3° ,图3b所示为 $t_{14}=1.8\text{ s}$ 时刻下,下颚与相对参考系X坐标轴的夹角为 30° ,因此需对所提取的舌各点的运动规律进行角度修正,不时刻的调整角度如表1所示。

调整角度是基于 $X'-Y'$ 相对参考坐标系,其坐标原点为舌根点坐标。因此,舌上各点不同时刻的相对运动坐标,经过调整后获得正确的相对于舌根点的相对运动规律。在绝对参考坐标系上,舌根点的坐标无需调整,其余各点不同时刻的绝对运动坐标为调整后的相对运动坐标与舌根点的绝对运动坐标之和。

2 舌的运动规律研究

2.1 不同吞咽时刻下舌运动规律

基于调整后的舌运动坐标,能够获得不同时刻下

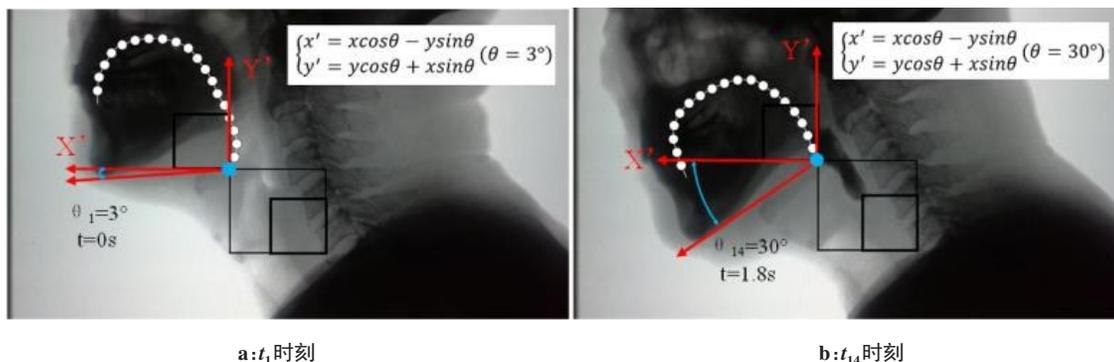


图3 不同吞咽时刻与调整角度的舌轨迹

Fig.3 Tongue trajectory at different swallowing time and adjusted angles

表1 不同吞咽时刻的调整角度
Tab.1 Variation of adjusted angles at different swallowing time

吞咽时间/s	调整角度/°
0	3
0.138	0
0.276	3
0.414	5
0.552	6
0.690	7
0.828	13
0.966	13
1.104	13
1.242	18
1.380	16
1.518	28
1.656	31
1.794	30

舌头吞咽曲线。图4为吞咽时刻0、0.414、1.104、1.242、1.518和1.794 s时的吞咽曲线；由于提取坐标时相对坐标系和绝对参考坐标系的X轴水平向左，故图示X轴均是水平向左。可以发现在吞咽食物时，舌绕其舌根点的上下转动使食物更好地经过会厌进入食道。在图4a中的吞咽时间0~1.104 s时，发现随着时间的增加，逐步往下转动的舌运动能够促进食物与舌头及上颚的充分接触。而图4b中的吞咽时间1.242~1.794 s时，随着时间的变化往上转动的舌运动产生使食物进入咽部和食道的压力，有助于食物的吞咽。

2.2 舌根点与舌运动点的规律

将天然人舌曲线上20个点分为两部分，分别称为舌根点C₀以及舌运动点C₁-C₁₉。舌根点C₀随吞咽时间变化的运动轨迹如图5所示。发现该点的运动轨迹近似于椭圆，其运动规律是先下后上，符合不同时刻的运动曲线变化。该类椭圆的运动轨迹可利用合适的机构实现，如凸轮-连杆机构、平面连杆机构等^[16]。此类机构可根据已知输出的运动轨迹，通过计算逆向推导其机构各杆长等参数，获得合适的机构来复现舌根点的运动轨

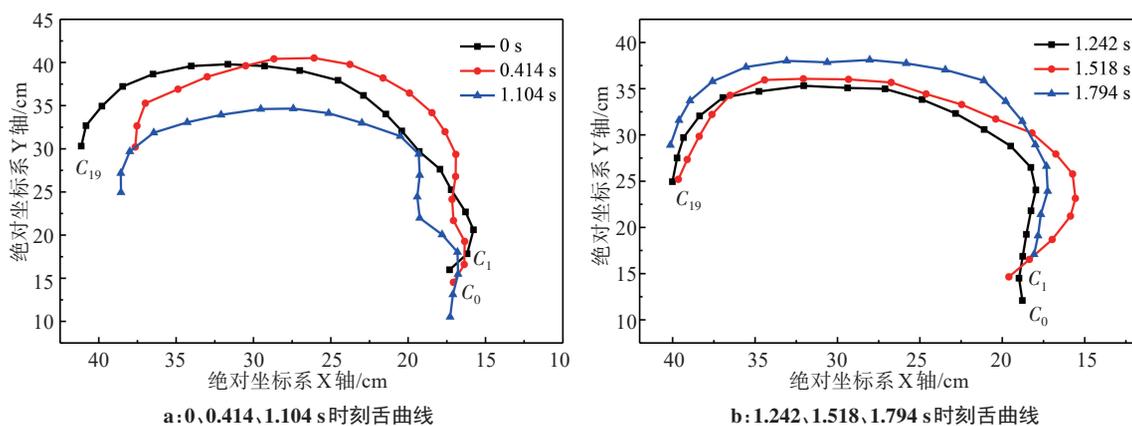


图4 不同吞咽时刻的舌头曲线

Fig.4 Tongue trajectory at different swallowing time

迹。同时,每个人的舌大小及舌运动存在一定的差异性,连杆机构还可以通过增加或者减少杆长来调整以适应不同人群的舌根点轨迹。

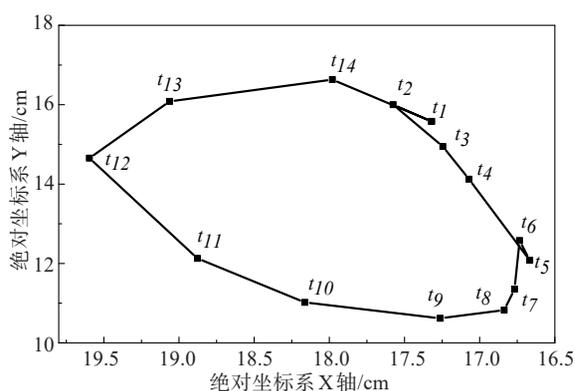


图5 舌根点的运动轨迹

Fig.5 Tongue root point (C_0) trajectory

对于舌运动点 C_1-C_{10} 来说,其运动规律较为复杂,但仍可观察到,其随时间变化的运动轨迹可近似于往复直线运动,故通过MATLAB软件对轨迹进行线性拟合,如图6所示,发现能够获得较高的相关系数,平均相关系数约为0.97,且 C_1-C_{19} 各点拟合的直线斜率呈现先下降后上升的趋势变化。运动点的类往复直线运动可采用齿轮-齿条机构实现,改变齿轮速度和齿条斜率使之适应不同运动点的运动轨迹以及不同人群的舌运动。

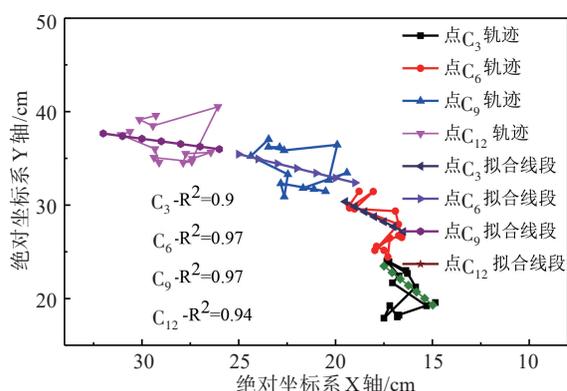


图6 舌运动点轨迹及拟合线段

Fig.6 Trajectories of tongue motor points and fitting lines

3 舌运动的仿真研究

舌运动的轨迹模型对理解舌运动及其仿真设计具有重要的意义,基于提取的舌运动特征点,采用3种不同的拟合方法对舌运动轨迹开展数学建模研究,探究舌模型的最佳拟合方程。为更好地检验轨迹方程的合理性,舌运动曲线共14个时刻的曲线即

14组数据;在拟合时,只取11组数据进行拟合分析,另3组间隔较为均匀的数据用来检验轨迹方程的准确性,故3组检验数据为第4、8、12组数据,对应时刻分别为0.414、0.966、1.518 s。

3.1 多元非线性曲线快速拟合的舌运动轨迹仿真

1stOpt软件界面简洁,处理数据速度快,在非线形回归、曲线拟合等方面处于领先地位^[17]。在不清楚拟合方程的前提下,通过该软件的“快速公式拟合搜索”功能对数据进行预处理,得到相关度较高的拟合方程,并将该拟合方程进行编程处理,最终获得拟合方程的最佳参数。

舌曲线上每点位置都是由对应的时刻以及其坐标确定,因此将时间 t 与 X 坐标作为输入, Y 坐标作为输出,具体处理过程如下:首先,在软件内导入数据并使用“快速公式拟合搜索”功能寻找最佳拟合方程,方程如下:

$$y = f(t,x) = p_1 + p_2 \times t + p_3 \times t^2 + p_4 \times t^3 + p_5 \times t^4 + p_6 \times t^5 + p_7 \times \ln(x) + p_8 \times (\ln(x))^2 + p_9 \times (\ln(x))^3 + p_{10} \times (\ln(x))^4 + p_{11} \times (\ln(x))^5 \quad (1)$$

其中, $p_1, p_2, p_3, \dots, p_9, p_{10}$ 及 p_{11} 为拟合方程各项系数, x 为舌运动轨迹各点的 X 坐标, t 为吞咽时刻, y 为舌运动轨迹各点的 Y 坐标。其次,编程输入拟合方程式,采用“麦夸特法”与“通用全局优化法”对数据进行拟合分析。最后,获得最佳参数的轨迹方程以及各参数值,如表2所示。通过MATLAB软件的CORRcoef函数计算该方程与原始数据的相关系数为0.847,其相关度较高。

基于拟合得到的轨迹方程,利用3组检验数据对

表2 拟合方程的拟合参数

Tab.2 Fitting parameters of the fitting equation

方程参数	值
p_1	232
p_2	-5.071 5
p_3	2.363 8
p_4	-0.464 7
p_5	0.037 28
p_6	-0.001 03
p_7	212
p_8	-569.577 4
p_9	324.231 9
p_{10}	-71.429 6
p_{11}	5.450 6

其进行检验,其对比结果如图7所示, t_4 、 t_8 、 t_{12} 时刻对应的轨迹方程相关系数分别为0.876 5、0.915 7和0.741 4,平均相关系数约为0.844 5。由图7可知,在 t_4 、 t_8 时刻的相似度较高,舌前部拟合度较高,但在舌

根处附近由于舌曲线特征点切线斜率正负变化,导致拟合时出现失真的问题,尤其是 t_{12} 时刻。因此,该方法下拟合的相关系数波动较大,与真实舌运动规律有一定的差别。

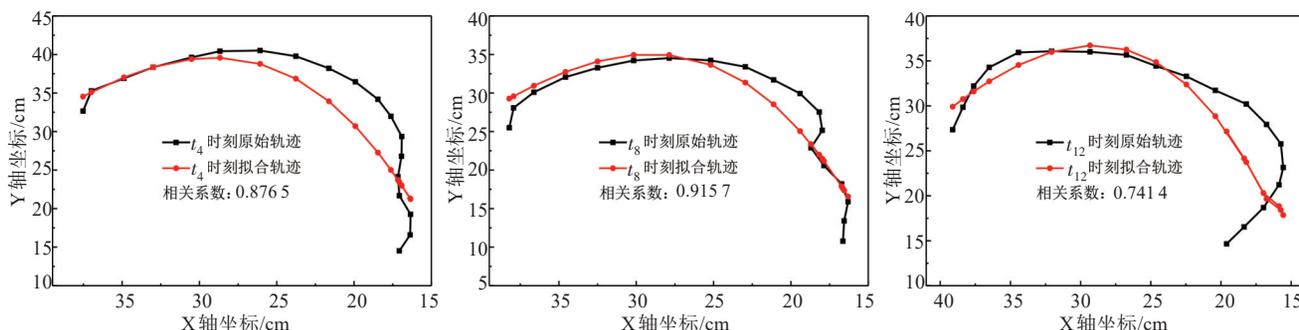


图7 不同时刻的原始轨迹和拟合轨迹的对比图

Fig.7 Tongue original trajectory and fitted trajectory at different swallowing time

3.2 Lsqnonlin 优化的5次多项式函数拟合的舌运动轨迹仿真

MATLAB软件的通用性好且在数据处理方面功能强大^[18],故采用MATLAB拟合工具箱“Curve Fitting Tool”对原始数据进行初步拟合,将时间 t 定义为拟合函数X轴坐标,X轴坐标定义为拟合函数Y轴坐标,Y轴坐标定义为拟合函数Z轴坐标,并使用5次多项式拟合对数据进行拟合,拟合函数如式(2)所示:

$$y = f(t, x) = p_{00} + p_{10} \times t + p_{01} \times x + p_{20} \times t^2 + p_{11} \times tx + p_{02} \times x^2 + p_{30} \times t^3 + p_{21} \times t^2x + p_{12} \times tx^2 + p_{03} \times x^3 + p_{40} \times t^4 + p_{31} \times t^3x + p_{22} \times t^2x^2 + p_{13} \times tx^3 + p_{04} \times x^4 + p_{50} \times t^5 + p_{41} \times t^4x + p_{32} \times t^3x^2 + p_{23} \times t^2x^3 + p_{14} \times tx^4 + p_{05} \times x^5 \quad (2)$$

其中, p_{00} 、 p_{10} 、 p_{01} 、 \dots 、 p_{23} 、 p_{14} 及 p_{05} 为拟合方程各项系数, x 为舌运动轨迹各点的X坐标, t 为吞咽时刻, y 为舌运动轨迹各点的Y坐标,则运行结果如图8所示。

本研究发现5次多项式方程拟合的相关系数为0.799,相似度较高。因此,利用该函数对方程中各参数进行优化。MATLAB软件中Lsqnonlin函数能够用于拟合非线性函数的系数,其处理方法为最小二

乘法原理,使得函数的均方误差最小。它被用于式(2)的系数进行优化研究,其优化结果如图9所示,整体相关系数为0.865 7,较未优化前的相关系数提升0.06。基于新拟合的轨迹方程,利用3组检验数据进行检验。检验结果发现, t_4 、 t_8 和 t_{12} 时刻对应的相关系数为0.909 6、0.919 3和0.789 2,平均相关系数约为0.872 7,与MATLAB拟合工具箱的5次多项式轨迹方程的拟合结果有较大的提升,但对于 t_{12} 时刻,其相关系数稍微有点低。

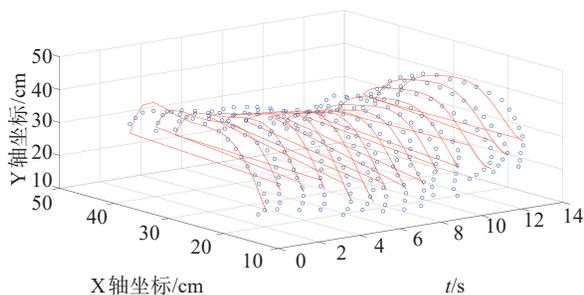


图9 Lsqnonlin优化5次多项式函数的舌运动轨迹图

Fig.9 Tongue motion trajectory obtained by Lsqnonlin optimization of 5 level polynomial function

3.3 BP神经网络拟合的舌运动轨迹仿真

在神经网络运用中,BP神经网络是目前应用最广泛的神经网络模型之一^[19-22]。BP网络是一种按误差逆传播算法训练的多层前馈网络,能够学习和存储大量的输入-输出模式映射关系,而无需事先揭示或者描述这种映射关系的数学方程,符合拟合舌运动模型的要求。BP网络不仅可以通过程序算法来设计,也可以通过MATLAB软件中神经网络工具箱进行设计。

本研究采用的神经网络拟合模型为3层结构模

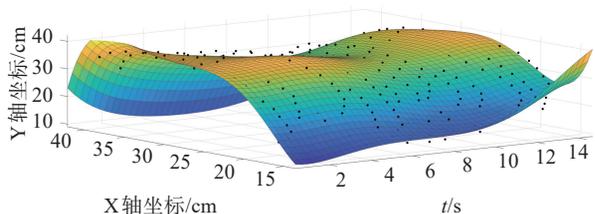


图8 5次多项式函数拟合的舌运动轨迹图

Fig.8 Tongue motion trajectory obtained by 5 level polynomial function

型,即输入层-隐含层-输出层,舌运动模型的神经网络将时间 t 与 X 轴坐标两个参数作为输入层, Y 轴坐标作为输出层,隐含层节点数目根据经验公式:

$$l = \sqrt{m + n} + a \quad (3)$$

其中, l 为隐含层节点数目; m 为输入层节点数目, n 为输出层节点数目, a 为 1~10 之间的调节常数。由此可知,隐含层数目约为 3~12 个。样本数据为 11 个时刻的原始数据,其余 3 个时刻作为检验神经网络模型的检验数据,其具体的拟合过程如下:首先在 MATLAB 中构建 BP 神经网络模型,设置输入层节点函数为 $tansig$ 函数,输出层节点函数为 $purelin$ 函数,隐含层数目为 3~12;其次,输入 11 个时刻的样本数据并设置相应的权值与阈值,步长为 0.01,迭代次数为 10 000 次,并对样本进行训练;最后,将 3 组检验数据代入训练模型,并验证其有效性。

训练后发现,如图 10 所示,随隐含层层数的增加,其误差呈现先下降后上升的趋势,相关系数呈现先上升后下降的趋势,由此可知,在隐含层数为 10,输入层节点函数为 $tansig$ 函数时,误差最小,其相关系数最高。在对于 11 组原始数据来说,拟合的轨迹方程和原

始轨迹的相关系数高达 0.914,远高于其他两种拟合方法,主要原因为 BP 神经网络的自适应性、学习能力及泛化能力较强;对于 3 组检验结果来说,对应的相关系数分别为 0.902、0.935 和 0.791,其平均相关系数为 0.876,而整体相关系数为 0.91,如图 11 所示。

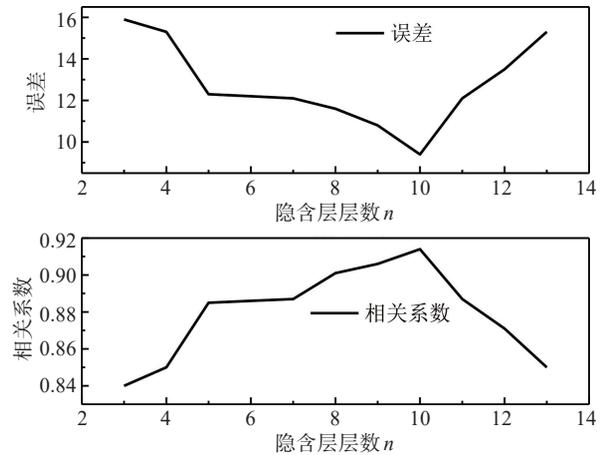


图 10 不同迭代次数下神经网络模型的误差与相关系数对比图
Fig.10 Errors and correlation coefficients of neural network model at different iterations

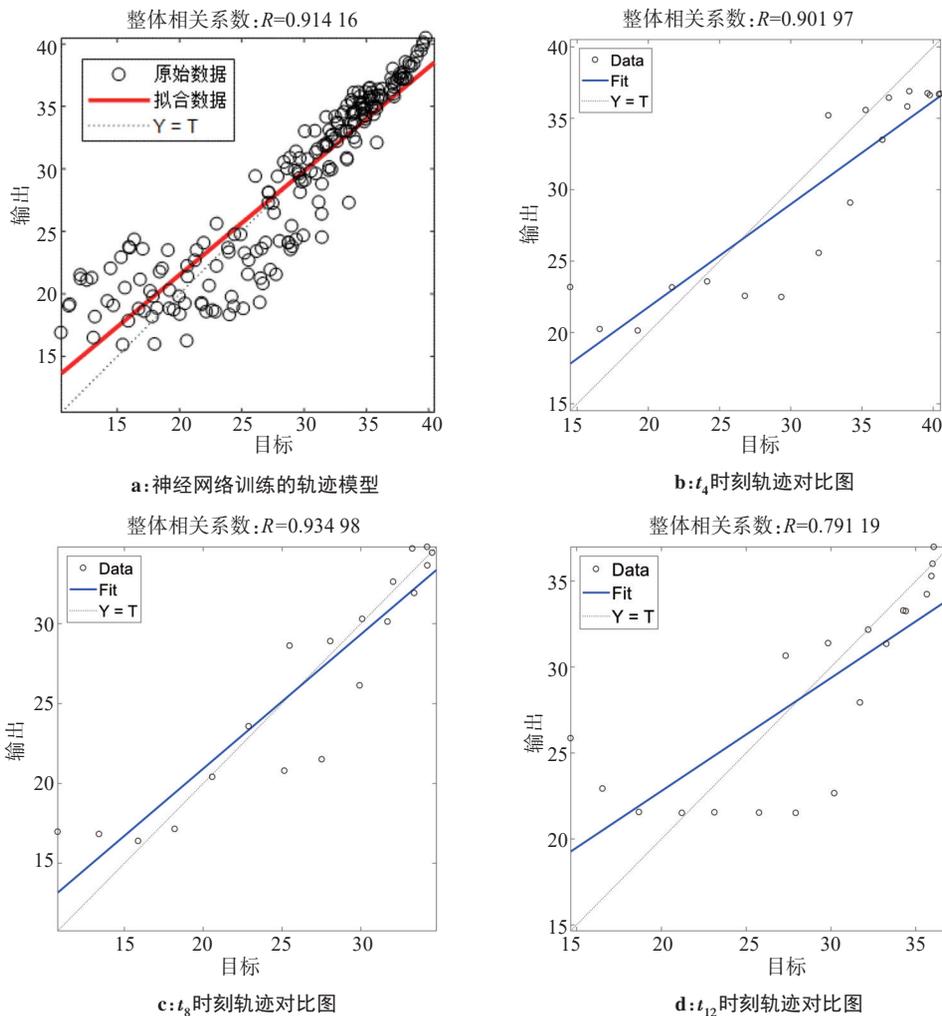


图 11 不同时刻下神经网络模型的轨迹方程和原始轨迹的对比图

Fig.11 Comparison of the original trajectory and the trajectory equation obtained by neural network model at different swallowing time

采用3种方法获得舌运动的轨迹方程,其结果表明这3种拟合方法的整体相关系数均超过0.8,具有一定的参考价值。其次,3种拟合方法中神经网络模型的相关系数最高,检验数据的相关系数也是最高,如表3所示。对于3种方法,主要的失真均靠近舌根点,其主要原因是靠近舌根点附近的舌部分对于X坐标来说,有两个不同的Y坐标。对于 t_{12} 时刻,其相关系数均不是很高,均未超过0.8,但就整体性而言,该时刻较低的相关系数对整个舌运动轨迹模型的影响是比较低的,其结果基本是在可接受的范围内。因此,与其他两种方法相比,神经网络模型更适用于舌运动轨迹的模型研究。

表3 3种方法的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of 3 different methods

方法	11组数据 相关系数	3组检验数据 相关系数	整体相关 系数
1stOpt	0.847 0	0.844 5	0.85
MATLAB 优化	0.865 7	0.872 7	0.87
神经网络	0.914 2	0.877 0	0.91

现利用神经网络模型,对舌运动曲线进行任意时刻及任意位置的预测判断。选取各时刻点的中间时刻点,对其进行位置预测,发现该模型均可较好地预测舌运动轨迹。图12为0到0.138 s中间时刻0.069 s的舌轨迹的预测图,发现0.069 s所预测的舌运动轨迹介于0与0.138 s,且该轨迹曲线与两个时刻的交错点也大致分布在同一位置。此外,对任意相邻舌运动点间的中点位置也进行了预测,图13为在0 s时刻时任意相邻两点间的中点位置预测轨迹图,发现在预测轨迹与原始轨迹的相关系数高达0.982,各点位置也基本均在中点位置上。因此,在任意时刻以及任意位置,神经网络模型所预测的舌运动轨迹曲线较为准确,这表明该模型能够适用舌运动规律的深入研究,也为以时刻为基准的非线性曲线拟合提供参考。

4 结论

(1)舌运动是舌根点和舌运动点组成,舌根点的运动轨迹类似于椭圆,而舌运动点的运动轨迹近似于直线运动;(2)多元非线性曲线快速拟合法、Lsqnonlin优化5次多项式函数和BP神经网络法能够拟合天然舌运动的轨迹方程,其对应的相关系数分别为0.85、0.87和0.91;(3)与其他两种方法相比,BP神经网络模型更适用于研究天然舌吞咽的运动特

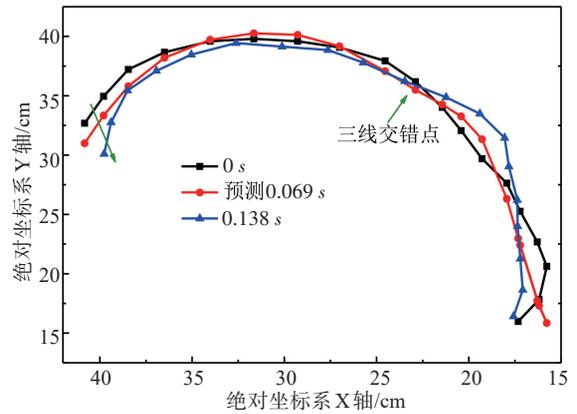


图12 0、0.138 s时刻舌运动轨迹图及模型预测0.069 s时刻舌运动轨迹图

Fig.12 Forecast tongue motion trajectory of the neural network model at 0.069 s and the original tongue motion trajectory at 0 s and 0.138 s

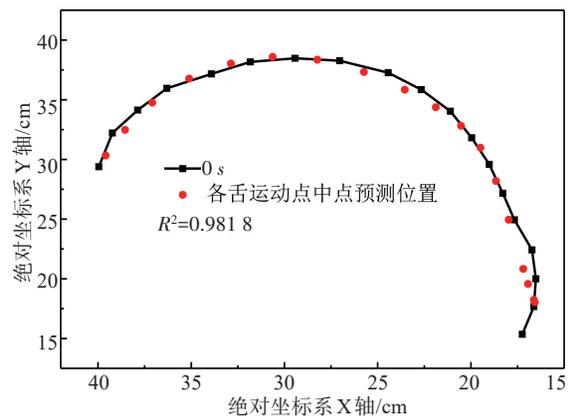


图13 0 s时刻原始舌运动轨迹图及模型预测相邻两运动点中点的舌运动轨迹图

Fig.13 Original tongue motion trajectory at 0 s and the forecast middle-point trajectory of two adjacent motor points

性,且能够较好地预测未知吞咽时刻以及位置的舌运动轨迹,这将为功能食品研发和仿生吞咽设计提供参考。

【参考文献】

- [1] JACK F R, GIBBON F. Electropalatography in the study of tongue movement during eating and swallowing (a novel procedure for measuring texture-related behaviour) [J]. Int J Food Sci Tech, 2010, 30(4): 415-423.
- [2] 陈艳秋, 谢华, 陈敏, 等. 膳食质地改变在老年吞咽功能障碍患者中的应用[J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(21): 198-200. CHEN Y Q, XIE H, CHEN M, et al. Application of dietary texture changes in elderly patients with swallowing dysfunction [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2017, 37(21): 198-200.
- [3] MENG Y, RAO M A, DATTA A K. Computer simulation of the pharyngeal bolus transport of Newtonian and non-Newtonian fluids [J]. Food Bioprod Process, 2005, 83(4): 297-305.
- [4] FUJITA S, DANG J, SUZUKI N, et al. A computational tongue model and its clinical application [J]. Oral Sci Int, 2007, 4(2): 97-109.

- [5] NICOSIA M A. Theoretical estimation of shear rate during the oral phase of swallowing: effect of partial slip[J]. *J Texture Stud*, 2013, 44(2): 132-139.
- [6] REDFEARN A G, HANSON B. A mechanical simulator of tongue-palate compression to investigate the oral flow of non-Newtonian fluids[J]. *IEEE-ASME Trans Mech*, 2018, 23(2): 958-965.
- [7] NICOSIA M A, ROBBINS J A. The fluid mechanics of bolus ejection from the oral cavity[J]. *J Biomech*, 2001, 34(12): 1537-1544.
- [8] WANG C Y. The squeezing of a fluid between two plates[J]. *J Appl Mech*, 1976, 43(4): 579-583.
- [9] KOKINI J L, KADANE J B, CUSSLER E L. Liquid texture perceived in the mouth1[J]. *J Texture Stud*, 1977, 8(2): 195-218.
- [10] RASHIDI M M, SIDDIQUI A M, RASTEGARI M T. Analytical solution of squeezing flow between two circular plates[J]. *Int J Comput Methods Eng Sci Mech*, 2012, 13(5): 342-349.
- [11] QAYYUM M, KHAN H, RAHIM M T. A novel approach to approximate unsteady squeezing flow through porous medium[J]. *J Prime Res Math*, 2016, 12: 91-109.
- [12] KHAN O, QAYYUM M, KHAN H, et al. Improved analysis for squeezing of Newtonian material between two circular plates[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2017, 5703291: 1-9.
- [13] BERBIG A, ENGELMAN J, BOPANITA A. 在吞咽困难患者中促进安全吞咽的粘性稀薄液体: CN108902914A(中国)[P]. 2018-11-30.
BERBIG A, ENGELMAN J, BOPANITA A. Viscous thin liquid that promotes safe swallowing in patients with dysphagia: CN108902914A(China)[P]. 2018-11-30.
- [14] BERBIG A, ENGELMAN J, BOPANITA A. 促进食物团块安全吞咽的拉伸粘度: CN107853678A(中国)[P]. 2018-03-30.
BERBIG A, ENGELMAN J, BOPANITA A. Extensional viscosity to promote safe swallowing of food pellets: CN107853678A (China)[P]. 2018-03-30.
- [15] KAJEE Y, PELTERET J P, REDDY B D. The biomechanics of the human tongue[J]. *Int J Numer Meth Bio*, 2013, 29(4): 492-514.
- [16] 范元勋, 梁医, 张龙. 机械原理与机械设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 167-217.
FAN Y X, LIANG Y, ZHANG L. Mechanical principle and mechanical design[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 167-217.
- [17] 董恰. 基于1stOpt的二级圆柱齿轮减速器优化设计[J]. *机械传动*, 2012, 36(7): 69-71.
DONG Q. Optimization design of two-stage cylindrical gear reducer based on 1stOpt[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, 36(7): 69-71.
- [18] 王贵财, 张建华, 李永锋. MATLAB从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019: 150-182.
WANG G C, ZHANG J H, LI Y F. Mastering MATLAB[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2019: 150-182.
- [19] 都明宇, 王志恒, 荀一, 等. 多模式人手动作分类识别方法[J]. *中国机械工程*, 2019, 30(12): 1474-1479.
DU M Y, WANG Z H, XUN Y, et al. Classification and identification of multi-pattern of hand actions [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(12): 1474-1479.
- [20] 钟婷婷, 张迪, 陈真诚, 等. 基于BP神经网络的胰岛素评价预测模型[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(11): 1318-1323.
ZHONG T T, ZHANG D, CHEN Z C, et al. Insulin evaluation and prediction model based on back-propagation neural network [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2018, 35(11): 1318-1323.
- [21] 刘冰, 郭海霞. MATLAB神经网络超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 159-193.
LIU B, GUO H X. MATLAB neural network super learning manual [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2014: 159-193.
- [22] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. MATLAB神经网络30个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010: 1-36.
SHI F, WANG X C, YU L, et al. MATLAB neural network 30 cases [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010: 1-36.

(编辑:陈丽霞)