

# 基于高密度肌电电势图的正常吞咽过程可视化研究

朱明星 于滨 方鹏 李光林

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

**摘要** 从体表采集吞咽肌群的肌电信号可以为吞咽功能评估、吞咽障碍诊断及康复治疗提供重要的电生理信息。目前利用体表肌电信号针对吞咽生理的临床研究通常只采用了少量电极(2~4个),难以从空间分布角度进行分析。为此,本文提出一种高密度肌电技术,通过颈前区域覆盖的电极阵列,同步采集96通道肌电信号进行分析。通过分析连续时间窗口内96通道的均方根值,建立一系列动态二维肌电电势图,实现了吞咽肌电信息的可视化。本研究招募了5名正常受试者参与实验,研究表明:正常受试者的动态肌电电势图模型可以反映正常吞咽过程中相关肌群的电生理活动的分布。这些初步结果验证了本方法可以为吞咽肌群活动提供可靠的动态描述信息,也可以作为吞咽障碍临床评估的辅助手段。

**关键词** 吞咽障碍; 高密度肌电; 肌电电势图

## Visualization of Muscle Activities of Normal Swallowing Using High-Density Surface Electromyography Maps

ZHU Ming-xing YU Bin FANG Peng LI Guang-lin

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** This study aims to develop a new approach to visualize the global myoelectric activities related to normal swallowing in human. The high-density surface electromyography (sEMG) signals were recorded by a two-dimensional (2D) 96-electrodes array on the neck region while subjects were performing specified swallowing tasks. The root mean square (RMS) of the sEMG signals was calculated for the 96 channels to construct 2D sEMG maps of the muscle activities. Along the swallowing process, a series of 2D color sEMG maps were concatenated as a dynamic topographical video of swallowing. The dynamic high-density sEMG maps provided the spatial and temporal properties of the electrical muscle activity and presented the muscle contraction coordination which was closely related to the swallowing function. The experimental results of this pilot study from five normal subjects show that their sEMG maps represent the consistent patterns in the distribution of muscle activities along with a swallowing process. This might suggest that the dynamic swallowing sEMG maps would be a noninvasive means for visualizing swallowing process and evaluating swallowing function.

**Keywords** swallowing disorders; high-density surface electromyography (sEMG); sEMG maps

## 1 引言

吞咽是人类维持生命最基本的生理活动之一,正

常情况下,人们每天吞咽大约600次。吞咽动作的完成是一个复杂的生理过程,需要大脑、神经及口腔、喉部和食道肌肉等协同工作来实现。正常的吞咽功能可以保证咽下的食物能有效而单向地通过食道流入胃

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(#61203209)。

**作者简介:** 朱明星, 研究助理, 研究方向为肌电信号采集与分析; 于滨, 研究助理, 研究方向为生物医学信号处理; 方鹏, 副研究员, 研究方向为多功能假肢控制和应用于康复领域的传感技术; 李光林, 研究员, 研究方向为神经康复工程、生物医学信号处理、生物医学仪器等, E-mail: gl.li@siat.ac.cn。

中,同时避免进入到鼻腔或者呼吸道中。然而,一旦吞咽有关的中枢部位或神经受损,会导致不同吞咽阶段的神经控制和肌肉协调出现问题,从而引起吞咽障碍<sup>[1]</sup>。

吞咽障碍是脑中风、帕金森、脑外伤、鼻咽癌化疗、小儿自闭症等多种常见疾病的并发症,在老年人群中尤为普遍。据统计,美国约有1500万人口患有吞咽困难或与吞咽困难相关的疾病。吞咽障碍的患者无法正常进食,吞咽时会发生咳嗽、噎呛,严重时甚至会引起食物误吸入气管导致吸入性肺炎而丧生,平时只能靠植入食管直接将食物推入胃中的方式来维持日常的基本生活。因此,正确的理解正常吞咽过程中相关肌肉的活动和肌群协调性对吞咽障碍的识别和治疗具有很重要的意义。

目前,在临床上常用的吞咽评估手段主要有以下几种<sup>[2]</sup>:X线荧光透视检查(VFSS)、吞咽光纤内窥镜检查(FESS)<sup>[3]</sup>咽部测压仪和超声成像等。X线荧光透视是通过在X射线下观察钡餐食团在口咽结构中的移动来得到吞咽过程的病症信息。光纤内窥镜检查主要以观察咽部解剖学结构的方式来检查咽部结构是否发生病变。而咽喉部测压法<sup>[4]</sup>能够评估在咽喉期时食管内压力变化过程。因为吞咽过程涉及多块肌肉的协调活动,而以上方法都只能提供一些吞咽肌肉活动的推理性信息。因此,为了观察吞咽过程的肌肉活动,我们采用的目前最广泛使用的表面肌电法(sEMG)在体表无创检测肌肉活动。

虽然表面肌电信号被用于观察吞咽过程的肌肉活动已经有数十年,但大多数研究都只针对单个肌肉或几个肌肉对<sup>[5]</sup>。这些研究通常是利用肌电幅值信息来评估吞咽的过程或识别吞咽事件。因为正常的吞咽过程涉及下颌舌骨肌、二腹肌等26块肌肉的参与协调<sup>[8]</sup>,因此有限的通道(3~5通道)无法提供吞咽过程完整的肌电信息。为了获取尽可能多的吞咽肌电信号,本文采用了高密度电极阵列来同步捕获吞咽相关肌群多通道表面肌电信号,以便能获得足够的吞咽肌肉活动信息。

高密度肌电技术<sup>[9]</sup>主要是指利用二维阵列形式的多通道表面肌电电极,覆盖在大范围体表区域,同步采集较大面积的多肌群肌电信号<sup>[9]</sup>,通过对信号进行空间维度的分析,来获得体表肌电信号的空间分布信息<sup>[10]</sup>。这种新的肌电采集分析方法已经被广泛应用于神经康复领域,包括神经肌肉紊乱的诊断<sup>[11]</sup>、肌肉功能的评价<sup>[12]</sup>、以及运动医学<sup>[13]</sup>。据了解,目前还没

有利用高密度肌电针对吞咽过程的研究。

综上所述,本文提出了一种基于高密度肌电信号的吞咽肌肉动态运动的可视化方法,可以用于吞咽功能的评估、吞咽障碍的筛选以及吞咽康复训练的评价。我们将高密度肌电电极以二维阵列的形式覆盖于下颌和颈部肌肉表面,同步采集吞咽过程中96通道的肌电信号。通过对96通道肌电信号进行处理分析,构建吞咽过程的动态肌电电势图。动态肌电电势图能够直观的反应出吞咽过程中相关肌群肌电活动的空间分布变化情况,从而体现出吞咽过程的肌肉运动和肌群协调性,可以作为吞咽功能和吞咽障碍的评价指标之一。

## 2 实验方法

本文招募了5名具有正常吞咽功能的受试者参与了实验。根据受试者自身吞咽状况,在实验人员的指导下完成干吞或吞不同容量的水等动作,在此过程中,利用TMSi-128多通道肌电采集系统(TMSi,荷兰),实时采集正常及异常吞咽情况下咽喉部吞咽肌电信号,获得高密度的动态吞咽肌电信息。

### 2.1 实验对象的选择

实验招募5名吞咽功能正常的受试者参与实验,其中包括2名女性、3名男性,年龄在23到28岁之间。这五名受试者均吞咽状况良好、无吞咽障碍病史,语言功能以及其他与吞咽相关器官功能状况良好、无相关病史,确认为医学上吞咽健康;同时无意障碍及明显的认知和视觉障碍,对测试和训练要求明确理解。本实验方案通过了中国科学院深圳先进技术研究院伦理委员会许可并与每个受试者均签订了知情同意书。

### 2.2 表面肌电信号的采集

实验将表面肌电电极排列成等间距的二维阵列,覆盖于受试者颈前肌群(主要覆盖下颌肌群和舌骨下肌群),实现高密度肌电信号的采集。电极阵列的分布如图1所示,包含96个表面肌电电极,呈16×6矩阵排列,相邻电极横、纵中心间距均约为10mm。参考电极放置在右手腕部。在实验前,每个受试者的皮肤均用酒精擦拭,每个电极表面涂抹导电膏,以保证电极与皮肤的良好导电性。本实验采用TMSi-128多通道肌电采集系统(TMSi,荷兰)同步采集96通道的肌电信号,设置采样频率为1000Hz,带通滤波通频带为10~750Hz。

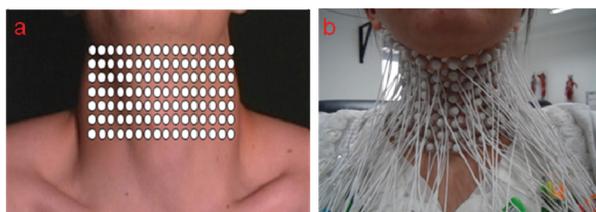


图1 电极分布示意图

### 2.3 吞咽实验过程

在实验过程中, 受试者正坐于试验台前, 上半身保持竖直, 头部保持正直, 听从实验人员指示完成不同吞咽实验测试。首先, 在受试者平静无任何吞咽动作状态下采集表面肌电信号。然后, 受试者配合实验人员, 完成以下三种吞咽测试: 干吞(正常吞咽唾液)、一口常规吞咽(5 mL 清水)、一口过量吞咽(15 mL 清水), 每种测试重复三次。在吞咽清水的测试中, 实验人员将定量的清水用小勺喂至受试者口前, 受试者听到指令后喝下并含在口中, 直到再次听到实验人员“吞”的口令后, 完成吞咽动作。在吞咽期间, 受试者应尽量避免头部面部的转动。

### 2.4 数据处理分析

在本文的高密度肌电分析处理中, 原始肌电信号首先经过均一化和滤波等预处理。因为颈前部采集的肌电信号中会混入较为强烈的心电信号干扰, 因此我们采用独立成分分析(ICA)的方法滤除心电信号和 50 Hz 工频干扰。在时间域, 我们将整个吞咽过程分成 20 个连续的时间窗, 每个时间窗为 100 ms。在每个时间窗口, 计算 96 个通道的肌电数据的均方根(RMS), 均方根值反映了每个时间窗口内肌电信号能量的平均值。在空间域, 每个时间窗内的 96 个通道的均方根值按照实际电极通道的位置被重新排布成一个二维  $16 \times 6$  的矩阵。为了可视化显示, 我们将每一个  $16 \times 6$  的均方根矩阵进行三次样条插值处理, 将其扩展到  $1500 \times 500$  阵列数据用来构建二维伪彩色电势图。我们通过电势图来表示体表肌电信号的分布, 电势图的每个像素的颜色都可以视为对应实际体表的肌电能量值, 肌电能量越强, 像素点颜色越趋近于红色。每一个时间窗的 96 个通道的肌电数据的均方根通过上述计算得到一个伪彩色图像, 将这些伪彩色图像连接成序列, 最后形成吞咽过程的动态肌电电势图, 能反应出正常吞咽过程中受试者前颈部吞咽肌群活动的动态分布信息。

## 3 实验结果

本文利用多通道电极阵列(96 个)同步采集吞咽过程中吞咽肌群的表面肌电信息, 通过处理得到肌电能量动态电势图, 观察吞咽过程中吞咽肌群协同工作下的动态运动。

### 3.1 吞咽过程中的动态肌电电势图

在本研究中, 我们利用宽度为 100 ms 的移动窗口逐一计算 96 个通道肌电均方根值, 通过窗口的移动得到 20 个连续的肌电均方根电势图, 对应于吞咽过程的 20 个连续的关键帧。图 2 所示为一名受试者吞咽 15 mL 清水过程的典型肌电电势图。我们使用 20 帧中所有通道的最大值对数据进行均一化处理。如图 2 所示, 动态肌电电势图可以反映吞咽过程的动态信息, 呈现出吞咽相关肌群收缩协调性。在吞咽实验的早期, 受试者将水含在口中, 肌电电势图(1~4 帧)的中心呈现高强度区域。当受试者真正开始吞咽动作后, 肌电电势图上的高亮区域分成左右对称的两个区域(5~16 帧), 高亮区域随着吞咽过程自顶向下移动, 强度也逐渐增强, 在第 10 帧的电势图中达到能量的峰值。随着食团的向下移动, 肌电活动的强度逐渐减弱, 在第 20 帧完全消失。这种典型的动态肌电分布模型也在其他四名受试者的试验中得到验证。

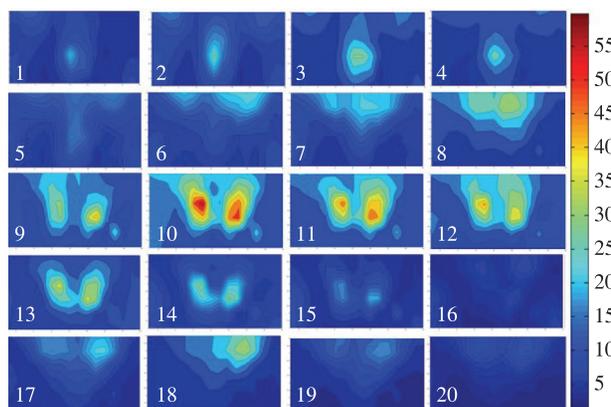


图2 吞咽 15 mL 清水时肌电电势图

### 3.2 不同吞咽动作下动态肌电电势图的对比

本研究对不同吞咽测试的动态肌电电势图模型进行了对比, 针对同一个受试者, 动态电势图在 5 mL 吞水实验和 15 mL 吞水试验的比较中没有体现明显差异, 但两种吞水实验都和干吞(吞咽唾液)实验有显著差异。

如图 3 所示, 5 mL 吞水实验的肌电电势图和图 2

所示的 15 mL 吞水试验的电势图具有相似的动态变化过程。在吞咽实验开始阶段,受试者将水含在口中,这个含水的动作在电势图中表现为中心位置的高强度(2~3 帧)。实际吞咽动作开始后,肌电活动分为左右对称的两部分,开始由图像上边缘向下移动,停留图像中心位置达到最大值后,活动区域慢慢缩小,强度也减弱直到消失。

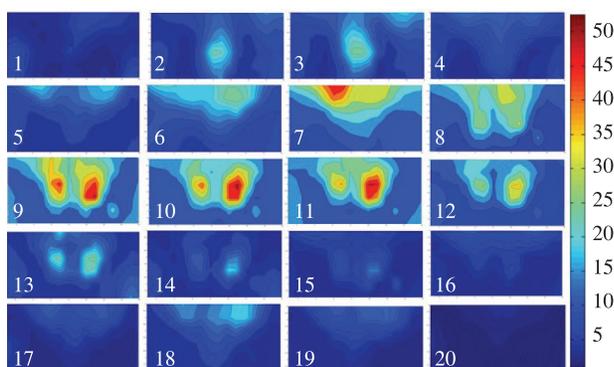


图3 吞咽 5 mL 清水时肌电电势图

干吞测试的动态肌电电势图和吞水测试体现出显著差异。如图 4 所示,由于受试者干吞过程(自然吞咽唾液)不需要将水含在口中,所以在电势图上没有出现类似图 3 中 2~3 帧所表现出的中心高强度区域。由于唾液相比于清水具有更高的粘稠度,所以吞咽时间上表现的更长,如图 4 所示,肌电活动持续到第 20 帧才完全消失。

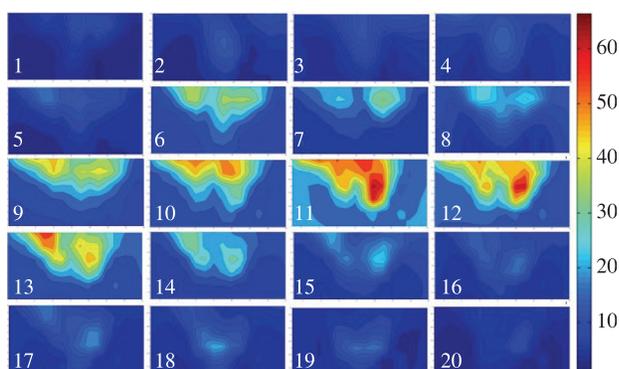


图4 干吞时肌电电势图

## 4 讨论

吞咽过程中吞咽肌群主动或被动收缩产生的神经肌肉活动信号与吞咽功能有着较强的电生理相关性。因此利用表面肌电信号研究吞咽功能以及吞咽障碍得到了科研人员和临床医生的广泛关注<sup>[5]</sup>。相比于传统的 X 线荧光透视检查或内窥镜检查等方法,表面肌电法具有无创、无辐射、测量简单等优点<sup>[14]</sup>。近

年来,基于表面肌电的吞咽生理的研究发展迅速,但仍然存在一些局限。目前基于肌电的吞咽功能研究主要是利用少量电极(2~6 个),捕获的有限通道的肌电信息难以反映出吞咽过程中复杂的肌电动态分布信息。本文创新引入了高密度肌电采集设备用于吞咽领域的研究,通过建立动态肌电电势图方法,实现吞咽过程相关肌群电生理活动的可视化。本文的主要目的是利用高密度肌电技术,通过建立吞咽过程的动态肌电电势图,实现吞咽过程的可视化及对吞咽肌肉功能的直观评价。

从本文的研究结果可以看出,高密度肌电电势图能够提供吞咽过程肌电信号空间分布信息,如图 2 至图 4 所示。与目前针对单个肌肉或肌群的研究不同<sup>[15]</sup>,本文通过高密度肌电方法对吞咽肌群之间协调性和肌电分布情况进行研究。采用电势图的方法是为了确定吞咽肌肉电信号分布的动态变化轮廓。文中采用均方根值来描述肌肉的活动能量,将均方根值赋值给电势图中空间坐标的色彩值,将信息可视化处理。单个电势图只能描述静态的吞咽肌群收缩情况,通过将吞咽各时期产生的一系列静态肌电电势图连接在一起,形成整个吞咽过程动态变化图,从而可以更直观地评估吞咽过程肌群收缩状况。综上所述,高密度表面肌电阵列电极的应用能够对吞咽过程中颈部吞咽肌肉功能进行直观的观察和综合的评价。

本研究得到的动态肌电电势图提供吞咽动力学信息,并与 Koichiro<sup>[16]</sup>等人提出的吞咽的生理生物学规律相一致。在真实的吞咽过程中,在吞咽初期通过提升软腭来将食物推至口咽部腭舌弓,同时颏下肌肉开始收缩,反映在电势图上则是肌电活动集中在电势图上边沿,如图 2 中第 5 帧到第 7 帧。接着当咽反射阶段到来时,食物进入食管,舌骨下肌转为活动状态,对应电势图中大量肌电活动集中于中心位置,如图 2 中第 9 帧到 13 帧。颏下肌肉的活跃一般发生在吞咽初期,而舌骨下肌的活跃期一般发生在吞咽结束。

## 5 结论

本文将高密度肌电技术应用于吞咽生理的研究中,动态肌电电势图可以完整地描述吞咽过程中肌群活动分布的连续变化。这种方法优点在于能够将吞咽时肌肉收缩协调性以及表面肌电信号分布变化规律对应到二维平面上的色彩分布变化,直观地反映出吞咽肌肉活动的动态变化。经初步研究,我们

相信, 在未来的临床应用上, 动态肌电电势图可以作为一种吞咽功能评估、吞咽障碍筛查和吞咽康复评价的有效工具。

### 参 考 文 献

- [1] Coriolano M das G WS, Belo L R, Carneiro D, et al. Swallowing in patients with parkinson's disease: a surface electromyography study [J]. *Dysphagia*, 2012, 27: 550-555.
- [2] 窦祖林, 兰月, 万桂芳, 等. 神经性吞咽障碍的康复治疗及其进展 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2006, 28: 788-791.
- [3] Langmore S, Schatz S, Olson N. Endoscopic and videofluoroscopic evaluations of swallowing and aspiration [J]. *The Annals of Otolaryngology, Rhinology, and Laryngology*, 1991, 100(8): 678-681.
- [4] Hila A, Castell J A, Castell D O. Pharyngeal and upper esophageal sphincter manometry in the evaluation of dysphagia [J]. *Journal of Clinical Gastroenterology*, 2001, 33: 355-361.
- [5] Perlman A, Palmer P, McCulloch T, et al. Electromyographic activity from human laryngeal, pharyngeal, and submental muscles during swallowing [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1999, 86(5):1663-1669.
- [6] Gupta V, Reddy N P, Canilang E P. Surface EMG measurements at the throat during dry and wet swallowing [J]. *Dysphagia*, 1996, 11 (6): 173-179.
- [7] Vaiman M, Segal S, Eviatar E. Surface electromyographic studies of swallowing in normal children, age 4-12 years [J]. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 2004, 68(1): 65-73.
- [8] Gleeson D C L. Oropharyngeal swallowing and aging: a review [J]. *Journal of Communication Disorders*, 1999, 32: 373-396.
- [9] Merletti R, Botter A, Cescon C, et al. Advances in surface EMG: recent progress in clinical research applications [J]. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, 2010, 38(4): 347-379.
- [10] Hu Y, Siu S H F, Mak J N F, et al. Lumbar muscle electromyographic dynamic topography during flexion-extension [J]. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 2010, 20: 246-255.
- [11] Hogrel J Y. Clinical applications of surface electromyography in neuromuscular disorders [J]. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 2005, 35(2): 59-71.
- [12] Roy S H, Luca C J De, EmLey M, et al. Spectral electromyographic assessment of back muscles in patients with low back pain undergoing rehabilitation [J]. *Spine*, 1995, 20: 38-38.
- [13] Clarys J P, Cabri J. Electromyography and the study of sports movements: a review [J]. *Journal of Sports Sciences*, 1993, 11: 379-448.
- [14] Vaiman M, Eviatar E, Segal S. Evaluation of normal deglutition with the help of rectified surface electromyography records [J]. *Dysphagia*, 2004, 19: 125-132.
- [15] Wheeler K M, Chiara T, Sapienza C M. Surface electromyographic activity of the submental muscles during swallow and expiratory pressure threshold training tasks [J]. *Dysphagia*, 2007, 22: 108-116.
- [16] Matsuo K, Palmer J B. Anatomy and physiology of feeding and swallowing: normal and abnormal [J]. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, 2008, 19:691-707.