

文章编号: 1004-7220(2023)01-0065-06

颈椎整骨手法的运动学与动力学研究

童美萍^{1,2}, 王辉昊^{1,2}, 詹红生^{1,2}, 潘富伟^{1,2}, 王逸松^{1,2}, 王玉鹏^{1,2}

(1. 上海中医药大学附属曙光医院 石氏伤科医学中心, 上海 201203; 2. 上海市中医药研究院 骨伤科研究所, 上海 201203)

摘要:目的 同步采集和分析两种颈椎整骨手法的运动学与动力学参数, 归纳其生物力学特征。方法 由1位高年资医师对10位健康受试者完成颈椎定位定向扳法和颈椎侧屈手法操作, 施术者粘贴荧光标志球用于捕捉手法动作, 并用压力触感手套和无线表面肌电系统采集并分析动力学参数和表面肌电信号。结果 上臂肌肉是颈椎整骨手法的主发力肌, 其中肱二头肌的贡献率最高。颈椎定位定向扳法的运动幅度、速度、扳动作用力和时间都大于颈椎侧屈手法。颈椎定位定向扳法中施术者各肌肉的积分肌电值(integrate electromyography, iEMG)和均方根值(root mean square, RMS)都大于颈椎侧屈手法。结论 颈椎整骨手法运动幅度、三维活动角度、扳动瞬间的载荷强度和速度, 具备高速、低幅和力强的特点, 体现出中医学中关于“寸劲”的生物力学特征。研究结果可以为进一步规范手法教学、训练以及提升临床安全性提供参考。

关键词: 颈椎整骨手法; 颈椎; 运动学; 动力学; 表面肌电

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.01.009

Kinematic and Dynamic Study on Traditional Chinese Cervical Manipulation

TONG Meiping^{1,2}, WANG Huihao^{1,2}, ZHAN Hongsheng^{1,2}, PAN Fuwei^{1,2}, WANG Yisong^{1,2}, WANG Yupeng^{1,2}

(1. Shi's Center of Orthopedics and Traumatology, Shuguang Hospital Affiliated to Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China; 2. Shanghai Institute of Traumatology, Shanghai Academy of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China)

Abstract: **Objective** To simultaneously collect and analyze the kinematic and dynamic parameters for two techniques of traditional Chinese cervical manipulation (TCCM), and quantitatively describe its biomechanical characteristics. **Methods** A senior practitioner completed the TCCM (positioning and directional rotation pulling, lateral flexion, respectively) on 10 healthy subjects, and the fluorescent marker balls were pasted on the operator to capture manipulation movements. The dynamic parameters and the surface electromyography (sEMG) signals were collected by pressure-sensitive gloves and wireless sEMG acquisition system. **Results** The upper arm muscle was the main force muscle during TCCM, and biceps brachii had the highest contribution rate. The range of motion (ROM), speed, pulling force, and time during cervical spine positioning and directional rotation pulling were all greater than those during cervical spine lateral flexion. The integrate electromyography (iEMG) and root mean square (RMS) for each muscle of the operator during cervical spine positioning and directional rotation pulling were higher than those during cervical spine lateral flexion. **Conclusions** The overall ROM, three-

收稿日期: 2022-05-03; 修回日期: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(81973871), 上海市慢性筋骨病临床医学研究中心(20MC1920600), 上海申康医院发展中心临床三年行动计划项目(SHDC2020CR1051B)

通信作者: 王辉昊, 副研究员, E-mail: huihaowang@126.com

dimensional (3D) motion angle, load intensity and time during CCTM have the characteristics of high speed, low amplitude and strong force, reflecting the biomechanical characteristics of ‘cunjin’ (one-inch punch) in traditional Chinese medicine. This study provides references for further standardizing manual teaching and training and improving clinical safety.

Key words: traditional Chinese cervical manipulation (TCCM); cervical spine; kinematics; dynamics; surface electromyography (sEMG)

颈椎病是骨伤科常见疾病之一,80%~90% 颈椎病在非手术疗法中获得良好的疗效,而中医整骨手法占据了重要地位^[1-2]。基于逆向工程学原理和运动生物力学测算等方法的发展,本课题组开展了一系列在体研究,归纳手法的运动学与动力学特征和规律^[3-4]。然而,手法操作的共性生物力学要素尚未形成共识,如何进一步总结其核心机制仍是中医手法研究的方向之一。

本研究通过三维运动捕捉与分析系统、触感手套和无线表面肌电 (surface electromyography, sEMG) 采集系统,同步采集并分析两种颈椎整骨手法的运动学与动力学参数,归纳整骨手法的共性生物力学要素,为进一步规范手法教学和训练,以及提升临床安全性提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

邀请上海市名中医詹红生教授(上海石氏伤科第5代学术传承人、全国名老中医药专家传承工作室导师),招募10位健康志愿者。本研究通过中国注册临床试验委员会伦理审查。所有受试者签署知情同意书。

1.2 颈椎整骨手法

作为具有150余年历史的国家级非物质文化遗产的上海石氏伤科,在学习和吸取其他流派手法经验后,逐步发展出特色鲜明的颈椎整骨手法^[5]。前期研究表明,整骨手法可以调整脊柱关节位置、增加椎间孔间隙和降低椎间盘压力,对存在“筋出槽骨错缝”的颈型、神经根型和椎动脉型颈椎病具有良好效果^[6-8]。

詹红生教授对受试者依次实施定位定向扳法和颈椎侧屈手法(见图1)。所有受试者均为健康志愿者,两种手法的间隔时间10s,产生的人体软组织蠕变基本可忽略,不影响对相关数据的采集和分析。



(a) 颈椎定位定向扳法 (b) 颈椎侧屈手法

图1 颈椎整骨手法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of traditional Chinese cervical manipulation (a) Cervical spinal positioning and directional pulling, (b) Cervical spinal lateral flexion

以向右侧为例,定位定向扳法具体操作步骤如下:①受试者取坐位,脖颈自然放松,施术者位于其右后方,以按法、揉法等松解软组织;②让受试者低头10°左右,再使之向右旋转至最大限度;③施术者右臂托住受试者左侧下颌,左手拇指顶住受试者椎棘突偏歪侧后外侧缘;④嘱受试者放松,确定受试者颈椎旋转至极限位后锁定;⑤施术者借腰部发力,肘部做一个瞬间、小幅度的旋提动作;⑥受试者头部恢复中立位。

右侧颈椎侧屈手法具体操作步骤如下:①受试者取坐位,脖颈自然放松,施术者位于受试者右侧;②施术者右手扶在受试者头部,左手拇指指面顶按颈椎棘突;③让受试者头部前屈,再使之向右侧屈曲至最大限度;④保持一定的牵引力,待受试者放松,双手瞬间向对侧做一个有控制、稍大幅度的瞬间扳动;⑤受试者头部恢复中立位。

1.3 主要实验设备

采用Vicon 612(Oxford公司,英国)三维步态分析捕捉系统,10台数字动作捕捉镜头,最高频率100Hz;触感手套(PPS触觉传感器有限公司,美国),双手套采样频率24Hz,软件版本为Chameleon 1.12.5.35;

无线 sEMG 采集系统 (Delsys 公司, 美国), 分辨率 16 bit, 采样率 4 kHz; Visual 3D 三维步态分析软件 (C-Motion 公司, 美国)。

1.4 实验过程

实验正式开始前, 先进行场地校准、固定荧光标志球和 sEMG 传感器, 施术者带上压力触感手套, 在场地中自然站立, 双臂展开进行系统标定。

1.4.1 固定标志点和 sEMG 传感器 施术者穿上紧身衣后, 在其身体关键部位贴上标志点, 共安置 79 个, 固定位置如下: 头部 4 点、左右脸颊各 1 点、左右肩峰各 1 点、后颈部 (C7) 1 点、胸部 1 点、左右前臂外侧各 4 点、左右肘关节内外侧各 1 点、左右上臂外侧各 4 点、左右腕关节内外侧各 1 点、左右髂前上棘各 1 点、左右髂后上棘各 1 点、左右股骨大转子各 1 点、腰部 (L5) 1 点、盆部 6 点、左右大腿股骨外侧各 4 点、左右膝关节内外侧各 1 点、左右小腿腓骨外侧各 4 点、左右踝关节内外侧各 1 点、左右足跟各 1 点、左右足背各 3 点 (第 1、2、5 跖骨头)。

将 sEMG 传感器置于施术者的左右胸大肌、左右三角中束、左右肱三头肌、左右肱二头肌、左右背阔肌, 共计 5 组。

1.4.2 正式实验 准备工作完成后, 施术者对受试者依次进行两种颈椎整骨手法, 试验过程中及结束后, 受试者无不适症状。

1.5 数据处理

通过三维动作捕捉系统捕捉施术者在手法操作时身上所有标志点的空间位置变换, 由 Vicon Nexus 1.8.5 软件对捕捉到的信息进行数字化处理。数据存储后, 利用 Visual 3D 三维步态分析软件建立手法操作模型, 并获取运动学与动力学数据, 包括位移、速度、角度、角速度等, 绘制变化曲线图, 计算得到运动轨迹。

使用压力触感手套实时采集手法操作过程中的压力, 数据通过蓝牙传输到 Chameleon 1.12.5.35 软件中进行动态显示和记录。数据保存后获取手法的力-时间曲线图, 提取手法操作阶段的预载荷、载荷峰值和扳动时间。

利用 Delsys 无线 sEMG 采集系统在体同步采集手法操作过程中肌肉的 sEMG 信号, 数据由 Vicon Nexus 1.8.5 软件获取存储。通过 Visual 3D 软件导

出原始肌电数据, 运用 Matlab 软件对数据进行预处理和特征值提取, 包括积分肌电值 (integrate electromyography, iEMG) 和均方根值 (root mean square, RMS), 计算肌肉贡献率。

2 结果

2.1 受试者基本资料

招募 10 位健康受试者, 4 女 6 男。年龄 22 ~ 26 岁, 平均 (24 ± 1.53) 岁; 身高 157 ~ 179 cm, 平均 (169.71 ± 9.96) cm; 体重 46 ~ 77 kg, 平均 (62.86 ± 13.47) kg; 颈围 29 ~ 38 cm, 平均 (32.96 ± 3.25) cm; 颈长 (8 ~ 13) cm, 平均 (11.29 ± 1.73) cm; 坐高 86 ~ 141 cm, 平均 (125.43 ± 18.14) cm; 身体质量指数 (body mass index, BMI) 18.7 ~ 25.2 kg/m², 平均 (21.57 ± 2.36) kg/m²。

2.2 三维模型建立

在正式动作捕捉前, 采集 1 段至少 5 s 的静态校准文件即标志点的系统标定, 用于导入 Visual 3D 软件中进行人体骨骼模型建立。建模完成后, 导入动态的动作捕捉文件进行运动学和动力学分析。

2.3 关节运动轨迹

右侧颈椎定位定向扳法, 获取施术者右侧的肩、肘、腕、膝和踝关节的三维运动轨迹。结果显示, 在手法操作过程中, 所有关节具有相同趋势的运动轨迹。在动作发力前, 5 个关节的活动位移都只在小范围内变化, 而在发力瞬间, 关节位移出现明显增幅, 尤以右肘关节位移变化最显著, 其合速度为 (46.73 ± 27.44) mm/s (见图 2)。

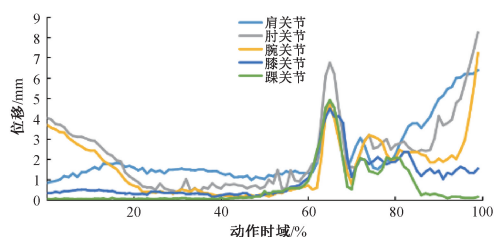


图 2 定位定向扳法施术者右侧关节位移-时间曲线

Fig. 2 Displacement-time curve of the operator's right joint during cervical positioning and directional rotation pulling

注: 动作时域是指每个动作时间在动作的总时域位置中所占的百分比。

在三维活动角度方面,肩、肘、膝和踝关节的离散程度均较小,相较而言,肩关节和肘关节的三维活动角度的离散度稍明显,踝关节最小,基本保持在1条平行直线上(见图3)。在扳动瞬间,右肘关节活动幅度最大(见表1)。

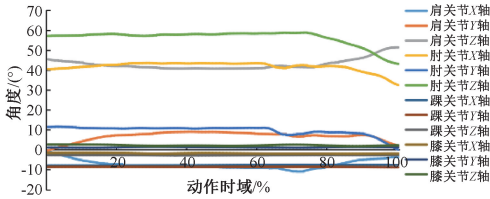


图3 定位定向扳法施术者右侧关节三维角度-时间曲线

Fig. 3 Three-dimensional angle-time curve of the operator's right joint during cervical positioning and directional rotation pulling

表1 定位定向扳法施术者右侧肘关节三维运动角度、角速度、角加速度

Tab. 1 Three-dimensional motion angle, angular velocity, and angular acceleration of the operator's right elbow joint in the cervical spine positioning and directional rotation pulling technique

参数	屈伸(X轴)	侧弯(Y轴)	旋转(Z轴)
角度/(°)	41.48±7.24	9.20±4.92	58.51±15.89
最大角速度/ [(°)·s ⁻¹]	36.07±11.39	-36.88±14.30	-6.31±3.54
角加速度/ [(°)·s ⁻²]	-212.52±63.80	-110.23±79.31	272.26±79.44

注:数值中的正负号只代表运动方向;X轴(横轴)屈曲为正;Y轴(纵轴)外展为正;Z轴(矢状轴)外旋为正。

右侧颈椎侧屈手法,获取施术者右侧的肩、肘、腕、膝和踝关节的三维运动轨迹。结果显示,该手法的整体运动幅度都较小,肘关节和腕关节具有相同趋势的运动轨迹,肩、膝和踝关节的位移幅度不明显(见图4)。在扳动瞬间,右腕关节和右肘关节的合速度值最高,分别为(11.48±3.78)、(10.63±

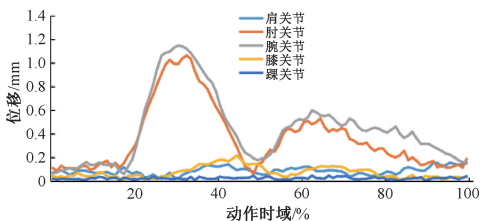


图4 颈椎侧屈手法施术者右侧关节位移-时间曲线

Fig. 4 Displacement-time curve of the operator's right joint during cervical lateral flexion

3.51) mm/s。肩、肘、膝和踝关节的三维运动角度也无显著幅度变化,基本保持平行,离散程度微小(见图5)。扳动瞬间,肘关节的三维运动角度、角速度、角加速度最大(见表2)。

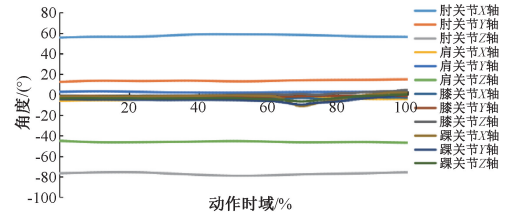


图5 颈椎侧屈手法施术者右侧关节三维角度-时间曲线

Fig. 5 Three-dimensional angle-time curve of the operator's right joint during cervical lateral flexion

表2 颈椎侧屈手法施术者右侧肘关节三维运动角度、角速度、角加速度

Tab. 2 Three-dimensional motion angle, angular velocity, and angular acceleration of the operator's right elbow joint in cervical lateral flexion

参数	屈伸(X轴)	侧弯(Y轴)	旋转(Z轴)
角度/(°)	57.65±15.20	13.59±5.89	-76.75±26.80
最大角速度/ [(°)·s ⁻¹]	14.15±7.57	-32.90±11.67	-15.81±7.18
角加速度/ [(°)·s ⁻²]	2.09±0.48	-3.37±1.52	-0.64±0.15

2.4 接触压力和 sEMG

结果显示,颈椎定位定向扳法的右手掌心的载荷峰值为9.25 kg,左手拇指的载荷峰值为2.36 kg,右手掌心的扳动时间短于左手拇指;颈椎侧屈手法的右手掌心的载荷峰值为1.72 kg,左手拇指的载荷峰值为1.32 kg,右手掌心与左手拇指的扳动时间一致(见表3)。

表3 两种手法动力学参数

Tab. 3 Dynamic parameters of two manipulations

手法	部位	预载荷/kg	载荷峰值/kg	扳动时间/ms
定位定	右手掌心	7.61±2.72	9.25±3.91	200±86
向扳法	左手拇指	1.63±0.89	2.36±1.05	225±103
颈椎侧	右手掌心	1.54±0.82	1.72±0.60	84±69
屈手法	左手拇指	1.22±0.70	1.32±0.69	84±56

对 sEMG 信号进行去噪、滤波后,利用时域分析法提取上肢肌肉的 iEMG 和 RMS(见表4),计算得到各肌肉的贡献率。颈椎定位定向扳法中,右侧肱二头肌的贡献率最高,为22.82%;颈椎侧屈手法

中,也是右侧肱二头肌的贡献率最高,为 12.83% (见图 6)。

表 4 两种手法下施术者上肢肌肉 iEMG 和 RMS

Tab.4 iEMG and RMS of the operator's upper limb muscles under two manipulations

肌肉	手法	iEMG/(mV·s)	RMS/mV
胸大肌	左 ①	3.17±1.69	6.03±3.80
	②	0.78±0.23	1.02±0.72
三角肌中束	右 ①	4.56±2.91	6.19±2.61
	②	1.31±0.50	1.73±0.61
	左 ①	6.62±3.85	12.92±6.91
	②	0.98±0.66	1.32±0.74
肱三头肌	右 ①	3.64±1.31	5.16±1.71
	②	1.14±0.61	1.49±0.47
	左 ①	3.94±1.62	6.33±2.70
	②	1.13±0.84	1.41±0.55
肱二头肌	右 ①	6.86±2.49	9.53±3.59
	②	1.39±0.62	1.98±0.66
	左 ①	5.27±2.34	8.11±5.22
	②	1.05±0.76	1.35±0.60
背阔肌	右 ①	12.45±7.31	17.75±8.62
	②	1.45±0.52	1.79±0.58
	左 ①	3.11±1.42	4.86±2.79
	②	1.07±0.22	1.43±0.40
	右 ①	4.93±2.82	6.78±3.80
	②	1.00±0.12	1.35±0.41

注:①、②分别为定位定向扳法和颈椎侧屈手法。

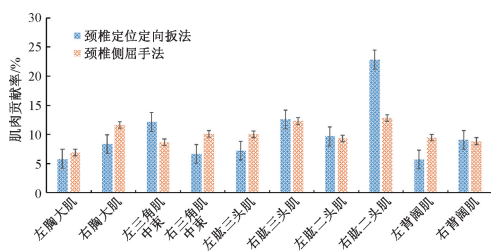


图 6 颈椎整骨手法各肌肉贡献率

Fig.6 Contribution rates of each muscle during Chinese cervical manual therapy

3 结果与讨论

3.1 结果分析

近年来,运动学与动力学仿真技术的不断进步为手法共性生物力学要素开展直观、量化、可重复和规范化研究提供了可靠的方法学保障,如光学式动作捕捉技术、sEMG 信号分析技术和压力感应技术等^[9-10]。临床医师和研究者都希望定性或定量掌握或了解手法的运动规律,以促进手法的推广和传

承^[11]。本文在体同步采集了颈椎整骨手法的运动学和动力学参数。

Dugailly 等^[12]利用运动捕捉系统采集健康受试者在坐位颈椎调整手法下头部相对于 T2 的运动轨迹,获得人体-躯干的三维运动学数据。Zhu 等^[13]应用动作捕捉技术对颈椎旋转牵引手法进行详细的运动学测量和分析。Geyt 等^[14]通过对健康人进行颈椎高速低幅调整手法 (high velocity low amplitude, HVLA) 操作发现,手法施术者之间因临床经验不同而差别较大,在速度方面尤为明显。王傅等^[15]将正骨手法归为 3 类:轴向用力、旋转用力、侧方用力,分析骨折筋伤后的复位手法的力学规律。研究认为,颈椎整骨手法的运动学和动力学数据结果符合轻巧-短促、高速-低幅的运动特征^[16-17]。这些研究结果修正了传统流派传承过程中偏主观性的观点,极大推动了手法力学机制和共性规律研究的进程^[18]。

本文结果显示,两种颈椎整骨手法既有相同之处,又有各自的操作特点。两种手法都表现为瞬间发力,关节的位移-时间短,符合“寸劲”速度特征,即高速;肩、肘、腕、膝 4 个关节具有相同趋势的运动轨迹,三维运动角度的离散程度较小,符合“寸劲”幅度特征,即低幅度。两种手法的上肢关节活动更为灵活,下肢关节更注重稳固性,推测是以下肢关节的稳定来辅助上肢发力。此外,上臂肌肉是手法操作的主要用力肌肉,以肱二头肌贡献率最高,颈椎定位定向扳法尤为明显,体现出“寸劲”力度特征,即扳动力强。这些数据进一步验证了本课题组前期初步的研究结果^[19-20]。

颈椎定位定向扳法的动作幅度和速度均大于颈椎侧屈手法,扳作用力和时间也高于后者。施术者各肌肉的 iEMG 和 RMS 都在 3 以上,彼此之间相差较明显,反映出该手法需要的肌力较大。颈椎侧屈手法各肌肉的 iEMG 和 RMS 均在 2 以下,彼此之间数值接近,表明该手法的发力更平和。上述结果表明,颈椎定位定向扳法在调整关节位置异常时可能更有效彻底,但对颈椎结构异常的患者使用时需谨慎。同时,本文发现,该手法右手掌心的预载荷和载荷峰值明显高于左手,推测原因是施术者为右利手,操作时力量更大。

3.2 研究局限性

本研究的局限性如下:①采用的Vicon三维步态分析系统版本较低,动作捕捉镜头灵敏度有所下降,施术者身上标志点数量较多,偶尔无法识别,数据出现失帧或缺点;②研究对象仅为1位高年资医师和10位健康受试者,所获取的数据结果和结论在推广时需谨慎;③获取的指标未涉及各种影响因素(如受试者性别、年龄、身高、体重等)对手法操作力学参数的影响。

3.3 展望

在后续研究中,一方面将更新实验设备,选用灵敏度更高的采集设备,优化采集技术和方案,竭力提高数据的精确度;另一方面,扩大研究的手法种类(颈椎、胸椎、腰椎等)和受试者样本量(不同年龄、不同阶段的真实临床病例等),同时增加不同年资施术者(低、中、高年资等)之间的对比测试。本研究旨在进一步阐明整骨手法运动学和动力学关键力学要素和共性特征,最终为整骨手法规范化诊疗,以及推动手法教学新模式的发展提供理论支撑。

参考文献:

[1] COHEN SP, HOOTEN WM. Advances in the diagnosis and management of neck pain [J]. *Brit Med J*, 2017, 358(8127): j3221.

[2] BLANPIED PR, GROSS AR, ELLIOTT JM, *et al*. Neck pain: Revision 2017 [J]. *J Orthop Sport Phys*, 2017, 47(7): A1-A83.

[3] 王辉昊, 陈博, 詹红生, 等. 流固耦合分析颈椎生理活动对椎动脉血流动力学的影响[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(6): 511-516.

WANG HH, CHEN B, ZHAN HS, *et al*. Fluid-structure interaction analysis on hemodynamics of vertebral arteries during physiological activities of cervical spine [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(6): 511-516.

[4] DENG Z, WANG K, WANG H, *et al*. A finite element study of traditional Chinese cervical manipulation [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(9): 2308-2317.

[5] 王楠, 唐田, 徐文强, 等. 石氏伤科治疗颈椎病学术思想源流[J]. *中国中医基础医学杂志*, 2020, 26(9): 1247-1250.

[6] 王翔, 詹红生, 张明才, 等. 石氏手法治疗神经根型颈椎病的疗效观察[J]. *中医正骨*, 2015, 27(4): 12-14.

[7] 邓真, 王玉鹏, 熊轶喆, 等. 詹红生教授定位定向旋扳法治疗寰枢关节“骨错缝”经验[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2021,

29(12): 6482-8488.

[8] 张明才, 石印玉, 陈东煜, 等. 椎动脉磁共振血管成像对手法诊治椎动脉型颈椎病的研究[J]. *中国骨伤*, 2013, 26(11): 908-912.

[9] COLYER SL, EVANS M, COSKER DP, *et al*. A review of the evolution of vision-based motion analysis and the integration of advanced computer vision methods towards developing a markerless system [J]. *Sports Med*, 2018, 4(1): 24.

[10] GRANT AD. Gait analysis: Normal and pathological function[J]. *J Am Med Assoc*, 2010, 304(8): 907.

[11] 唐广君, 王宝剑, 李建国, 等. 摇拔戳手法治疗急性外侧踝关节扭伤的运动学量化研究[J]. *医用生物力学*, 2022, 37(1): 143-147.

TANG GJ, WANG BJ, LI JG, *et al*. Quantitative study on kinematics of ankle rotating-traction-poking manipulation for treating acute lateral ankle sprain [J]. *J Med Biomech*, 2022, 37(1): 143-147.

[12] DUGAILLY PM, SOBCZAK S, VAN GEYT B, *et al*. Head-trunk kinematics during high-velocity-low-amplitude manipulation of the cervical spine in asymptomatic subjects: Helical axis computation and anatomic motion modeling [J]. *J Manipulative Physiol Ther*, 2015, 38(6): 416-424.

[13] ZHU L, FENG M, YIN X, *et al*. Kinematics analysis of cervical rotation-traction manipulation measured by a motion capture system [J]. *Evid Based Complement Alternat Med*, 2017: 5293916.

[14] VAN GEYT B, DUGAILLY PM, KLEIN P, *et al*. Assessment of *in vivo* 3D kinematics of cervical spine manipulation: Influence of practitioner expertise and occurrence of cavitation noise [J]. *Musculoskelet Sci Prac*, 2017, 28: 18-24.

[15] 王傅, 陈丽珍, 李义凯, 等. 四种不同方式旋转颈椎所致咔哒声响量化的采集与比较[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2010, 14(43): 8149-8153.

[16] 姜宏, 施杞. 颈椎手法的生物力学研究与探索[J]. *中国中医骨伤科*, 1999, 7(2): 52-54.

[17] 周红海, 苏少亭, 田君明, 等. 四种颈椎正骨手法的技术操作及力学机制探索[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2019, 27(4): 74-76.

[18] 冯敏山, 朱立国. 关于颈椎旋转手法力学参数的研究概述[J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2013, 21(1): 67-69.

[19] 邓真, 王辉昊, 王宽, 等. 石氏伤科颈椎定位旋转扳法的动力学参数在体测量[J]. *中医正骨*, 2018, 30(3): 17-21.

[20] 王辉昊, 张旻, 牛文鑫, 等. 三维运动捕捉技术在颈椎整复手法中肢体运动轨迹的在体研究[J]. *中国骨伤*, 2015, 28(10): 940-944.