

三维运动分析在上肢运动功能障碍中的应用进展

黄馨云¹ 廖欧萍¹ 李阳² 鲁潇莹² 李一瀛² 陶吉明³ 姜淑云² 李璟¹

¹上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院针灸科,上海 200437; ²上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院步态与运动分析中心,上海 200437; ³上海中医药大学附属岳阳中西医结合医院康复医学科,上海 200437

通信作者:李璟, Email: 1971921250@qq.com

【摘要】 上肢运动功能障碍会导致患者生活质量及社会生活能力下降。三维运动分析(3DKA)作为一种客观的、高精度评估手段,近年来越来越多地被应用于上肢运动功能障碍的评估中。本文就 3DKA 在上肢运动功能障碍中的应用优势、应用设计原则以及具体应用进行综述,以期为上肢运动功能障碍的临床研究及康复干预治疗提供新思路。

【关键词】 三维运动分析; 生物力学; 上肢; 运动功能障碍

基金项目:上海市科学技术委员会青年科技英才扬帆计划项目(21YF1443800);上海市卫生健康委员会科研课题青年基金项目(20204Y0313)

Funding: Shanghai Sailing Program of Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (21YF1443800); Science Foundation for Youth of Shanghai Municipal Health Commission, (20204Y0313)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2023.08.015

上肢运动功能障碍会导致患者日常活动能力不同程度地下降,甚至生活自理困难。对于运动功能的准确测定及评估,是为这类患者制定合理诊疗策略的先决条件。目前,临床上主要依靠量表及查体对上肢运动功能进行测定,虽然这些测评方法已被广泛验证和应用,但依旧受到观察者主观经验的强烈影响,观察者往往在测评过程中更侧重于评价某项任务的完成度而非该任务的具体执行方式,从而无法回答功能评价最为基本的问题:患肢是通过代偿措施还是康复本身提高了分值^[1]。

此外,由于人体上肢自由度多且精细动作繁杂,上肢运动具有多样性、复杂性的特点,对上肢整体运动功能的综合评价不应仅停留于对单一关节或肌群评估结果的简单论述^[2]。随着患者对康复需求的不断提高,临床医师及研究人员正迫切需要通过更客观有效的评估手段,采集更为精准的患肢运动功能信息,以便综合评估和临床管理,并以此为据向患者提供进一步干预建议。

三维运动分析(three-dimensional kinematics analysis, 3DKA),是一种高精度的三维动态数字化评估技术。该技术通常先由红外线高速摄像机精准地记录被试体表红外标记物发出的反射信号,再由专业研究人员应用运动分析软件基于所采集的数据对被试相应肢体的运动功能进行综合分析评估^[3-4],既往被广泛应用于步态分析中^[5]。随着近年来大量标准化三维步态分析实验室的建立和科学技术水平的不断进步,3DKA 被越来越多地尝试应用于上肢运动功能障碍的客观量化评估中^[5],以帮助判断患肢的代偿及康复情况^[1]。本文就 3DKA 在上肢运动功能障碍中的应用研究现状及前景作一综述,以期为上肢运动功能障碍的临床研究及康复干预治疗提供新的思路。

应用优势

3DKA 是目前最常见的运动分析方法之一,可记录非随意

运动及随意运动^[6],还可根据测试及研究目的制定相应目标任务,能较真实地反映患肢运动功能^[1,5,7-9],具有安全、无创、客观、稳定、精准性极高的特点及优势。基于上述特征,3DKA 具有较高的效益比:能大幅减少显示统计显著性所需的受试者数量^[10],帮助节约研究的时间及经济成本。此外,3DKA 的被试也基本不受限于年龄因素,不仅可适用于 84 岁的老年患者^[11],亦可应用于婴幼儿^[12]。

与目前其它常用的上肢运动分析方法及设备相比,3DKA 的具体应用优势如下:①3DKA 可以提供传统二维单关节运动范围测量和临床观测分析所无法提供的详尽数据^[7-8],如躯体代偿情况、运动平顺度、关节内在关联性等,从而帮助临床医师、康复师及科研人员更完整、全面地了解某种疾病状态下的患肢运动学特征和运动策略^[8],为群体康复治疗策略的优化以及个体精准康复治疗的方案制订提供客观依据,最大程度地提高医疗效益;②由于康复机器人受限于机身有限的自由度,其可采集的运动学参数较少,并在评估上肢运动功能的质量方面仍存在一定技术挑战^[13]。相比之下,3DKA 技术较之更为成熟,且可采集并拟合的运动参数较为广泛,因而临床及科研使用价值更高;③虽然便携式穿戴传感器设备可在实验室外连续监测被试的运动功能,但时间及空间误差可能会限制其在某些研究中的使用^[14],且此类设备存在续航及数据干扰问题^[6],而 3DKA 较之则具有可控性、精准性的优势。由此可见,3DKA 优势突出,在上肢运动功能障碍中的应用前景广泛,且具有较高的实用价值。

应用设计原则

3DKA 在上肢运动分析研究设计中应遵循以下应用原则:在明确研究目的及假设的基础上,选择难度适宜的运动目标任务以及恰当的运动学参数,并在研究分析时对这些数据进行合

理的临床解释^[1,7-8]。

一、合理设定目标任务

不同于步态分析具有标准化的目标任务, 上肢 3DKA 可根据研究需要设置相应的目标任务^[5,7], 如为了研究篮球运动的运动学特征, 可以直接设定投篮动作为目标任务^[15]。现有的上肢目标任务大致可分为二维任务(2-dimensional task)、三维任务(3-Dimensional task)和其它任务三类。

1. 二维任务: 适用于上肢中重度运动功能障碍或存在手功能损伤的患者人群, Fugl-Meyer 运动功能量表上肢部分(Fugl-Meyer assessment - upper extremity, FMA-UE) 评分通常 < 30 分^[8]。二维任务涵盖二维指向任务(即明确目标位置的分离运动, 如指鼻动作、开灯动作)以及二维图形绘制任务(如关节环转动动作), 能较好地反映患者日常生活能力及真实运动功能, 并具有良好的临床可操作性^[9,16-17]。

2. 三维任务: 较二维任务更为复杂, 一般涵盖物体操纵任务, 适用于上肢轻中度运动功能障碍且具有抓握能力的被试, 即 FMA-UE 分值 ≥ 30 分且具有一定手指屈伸能力的患者^[8]。喝水动作是三维任务中较经典的目标任务, 最早由 Murphy 教授团队在 2006 年提出并应用^[18], 该任务涵盖伸手、抓取及提拿杯子、喝水和将杯子放回原处四个阶段, 能较好地体现患者日常生活能力。由于对于该任务各阶段的运动学参数测定较为成熟, 可重复性高, 该动作被广泛应用^[7], 并被第二届脑卒中恢复与康复圆桌会议推荐使用^[19]。但该任务构成复杂, 更适用于 FMA-UE 评分 46 分以上的患者人群^[8,20-21]。

3. 其它任务: 包括多重目标任务、游戏任务、追踪特定目标等^[7-8,11]。与前两类任务相比, 其它任务对上肢运动功能要求较高, 更适用于临床评估提示无运动功能障碍或轻度运动功能障碍人群上肢精细功能的评估及测定^[8]。

尽管上肢 3DKA 可选择的目标任务具有多样性的特点^[5], 研究者应考虑到受试者运动功能状态、任务的可完成性及安全性^[7-8,19], 在研究设计时选择难度适宜且符合研究目的的任务。此外, 由于 3DKA 涉及单次任务的重复测量, 研究人员还应关注下列影响因素: ①重复任务后肌肉疲劳所造成的运动可变性^[22], 研究设计时应将重复测量的次数限制在 3~5 次, 以便获得良好的数据可靠性^[23]; ②重复执行目标任务对患肢的运动功能可能存在一定干预效应^[8], 故应避免设计与治疗干预措施相似的目标任务^[8]。

二、按需选择运动学参数

3DKA 在上肢常见的运动学参数主要包含运动范围、运动时间和运动品质三大类。

1. 运动范围: 主要包含躯干及被测各关节的角度变化范围及位移距离^[1,4], 此类参数可帮助研究者理解被试的运动模式及运动策略, 从而判断是否存在代偿^[1,8]。

2. 运动时间: 即运动起始至运动结束的间隔时间, 通常可联合运动品质类参数共同用于评判患肢的运动控制能力^[3]。

3. 运动品质: 常见参数主要包含运动速度(平均速度、峰值速度、角速度、加速度等)、力学参数(力矩、地面反作用力等)、运动单位数(number of movement units, NMU)、标准化综合急动值(normalized integrated jerk, NIJ)、关节内在关联性、任务完成度等^[1,8,20-21], 其中 NMU、NIJ、关节内在关联性 & 任务完成度一般是基于运动范围、时间及速度等参数由试验人员根据相关定

义进行电脑编程拟合获得。NMU 及 NIJ 可反映运动的平顺度, 通常用于判断患肢运动功能的恢复情况^[7-8,16]。

NMU: 一般定义在运动过程中, 若某标记物的切向速度变化幅度最小值和下一个最大值之间超过 2 cm/s, 则标记该峰值为 1 个 NMU, 且相邻 2 个 NMU 之间的间隔至少大于 0.15 s^[24]。

NIJ: 一般根据公式, 通过时域标准化以及达到目标任务的目标位移距离计算得出^[8,16]。

关节内在关联性: 常被用于判断患肢运动的协调性及分离运动的出现, 该值范围为 -1~1; 当值为 0 时, 代表两关节运动完全独立^[25-26]; 较常见的有肩-肘关节伸展角度的关联性。

任务完成度: 主要包括到达路径比、终点误差、任务成功率等指标, 可用于评判动作的精确性及有效性^[8,26]。

由此可见, 上肢 3DKA 可纳入评估的参数较繁杂。因此, 研究者在进行 3DKA 实验时, 应根据研究需要有目的地选择精简、高效且具有临床代表性的运动学指标, 并对所选参数进行综合评估分析^[7-8,16,26]。

具体应用

一、脑卒中后遗症

脑卒中后上肢运动功能障碍是神经康复领域的巨大挑战之一^[27], 上肢运动功能评估是为其制定康复方案的基础^[28], 高精度的评估工具可以为患者带来更为个体化的精准康复方案。近年来, 上肢 3DKA 在脑卒中后遗症中的应用最为广泛。Chen 等^[28]应用 3DKA 研究以脑卒中后轻度上肢运动功能障碍患者作为研究对象, 发现此类患者患肢与健肢相比, 仍存在不同的运动模式及策略, 如: ①使用患肢时, 患者倾向于增加抓取及到达的运动时间比例, 并减少返回阶段的运动时间比例, 提示此类患者中可能仍存在屈肌协同作用, 因此仍有必要的对此类患者进行痉挛管理, 并加强拮抗肌群的训练, 以改善其运动功能; ②即使患肢运动功能已得到较大恢复, 在使用患肢时, 被试仍倾向于减少肩肘的位移, 通过增加躯干位移(即增加代偿)来完成。这提示康复过程中应提高患者使用患肢的意识, 以纠正异常的运动模式。

Hansen 等^[29]使用 3DKA 测量了脑卒中患者在约束诱导运动治疗(constraint-induced movement therapy, CIMT)干预前后执行不同任务中的肩胛骨上旋角度, 结果提示 CIMT 干预时, 并不应该将肩关节功能缺损作为康复治疗的重点。Bustrén 等^[30]在既往研究基础上, 通过 3DKA 进一步验证了脑卒中后病灶侧的肢体功能也存在损伤, 具体表现为运动控制能力及运动平顺度的下降, 即健侧也非完全健康状态; 而随着时间推移, 这种功能损伤可以得到一定恢复。该研究推测, 双侧大脑可能在一定程度上参与控制了单侧上肢运动。总之, 3DKA 在协助研究人员及临床医师判断脑卒中后患肢的运动模式及运动策略方面独具特色, 并由此推动了部分脑卒中后上肢康复理念的更新。

二、脑性瘫痪

如前所述, 3DKA 受年龄限制较小, 可以作为安全、可靠的客观疗效指标被运用于脑瘫患儿的运动障碍评估中^[6]。一项使用 3DKA 评估围产期脑卒中患儿上肢运动学特征的研究纳入了出生仅满 2 个月的儿童作为被试, 该研究结果显示, 3DKA 具有较好的安全性及极高的敏感性, 可以通过运动参数的细微

变化帮助医师和家长提早识别出存在脑瘫高风险的患儿,从而及时给予干预措施以改善患儿预后^[12]。Pons 等^[31]使用 3DKA 测量记录了脑瘫伴脑室周围白质软化致双侧痉挛性瘫痪患儿的上肢运动学特征,具体表现为上臂较长的运动时间、较低的平均速度、腕关节伸展角度增大、肘关节伸展和前臂旋后不充分、目标准确率及稳定性较低以及曲度指数增高;并认为该研究结果可为进一步优化此类患儿的康复治疗方案提供客观依据。Simon 等^[32]应用 3DKA 研究了 CIMT 联合动作观察疗法在脑瘫患儿上肢康复的运动学价值,研究结果提示,CIMT 无论是否联合动作观察疗法均可以改善患儿的峰值速度及轨迹的直线度,并促使躯体旋转角度接近正常范围,而在联合动作观察疗法后可减少运动时间。由此可见,3DKA 可较准确地识别脑瘫患儿的异常运动模式,并可作为评判治疗方法有效性的可靠工具。

三、术前及术后评估

3DKA 可以较客观地提供手术治疗使患者在运动学功能中获益的临床证据。Jariwala 等^[11]首次利用 3DKA 客观量化了肩关节表面置换术术前、术后 4 个月、术后 12 个月多时间节点在不同目标任务中肩关节活动范围的变化趋势,结果显示,3DKA 较临床评估能更敏锐地显示肩关节活动范围在术后增益的证据,并帮助研究者更全面地了解术后肩关节的功能状态。Kodama 等^[9]则以拇指环转动作为目标任务,使用 3DKA 量化腕管综合征患者在腕管松解术后拇指运动功能的恢复,结果显示,与术前相比,术后 1 年拇指各关节活动范围及指尖路径长度均得到明显改善,说明 3DKA 有助于为更好地理解腕管综合征在病程不同阶段所致的手功能障碍提供支持。上述两项研究均认为,3DKA 是评估病情转归的可靠工具,并在术前及术后的评估中均具有较好的应用前景^[9,11]。

四、运动类损伤

3DKA 还可以揭示不同运动导致上肢运动功能损伤及障碍的原因。Linderman 等^[33]以后手翻动作为研究对象,利用 3DKA 记录了整个任务中肩、肘、腕、手的生物力学数据,其中包括关节角度、扭矩、地面反作用力等。该研究结果提示,当肢体第 1 次接触地面时,以肘关节处的伸展力矩显著增加,达到地反作用力的峰值时间更短为特征;当肢体第 2 次接触地面时,则以肩关节外展力矩显著增加为特征。由此,该团队推测,这些特征差异可能是体操类运动导致不同关节或肌肉损伤风险的原因;建议在日后的相关研究中增加 3DKA 的使用,以便对肩部和肘部的应力识别,减轻体操运动所致上肢运动功能障碍的发生概率,也为指导如何在运动损伤后重返体操运动提供新的参考。MacLean 等^[34]使用 3DKA 对比了经验丰富的攀岩者和无经验攀岩者在完成双手攀岩任务中的运动学数据,结果发现,经验丰富的攀岩者所表现出的运动模式更接近于攀岩类灵长动物,即肘关节屈曲及内旋增多、肩肱关节抬高减少。该研究认为,这类模式虽在一定程度上可减轻,但仍无法避免双手攀岩导致疲劳相关骨肌疾病的风险。随着 3DKA 在上肢运动类损伤疾病中的应用日趋增多,将对运动潜在相关的生物力学风险因素了解会越发深入,未来可在此基础上,制定出更为安全有效的运动训练及康复计划。

总结与展望

3DKA 在评估上肢运动功能障碍中的必要性及价值正在被

越来越多的国内外研究者所认可,尤其在观察及评价运动模式方面独具优势。3DKA 在上肢中的应用推动了学界从生物力学角度对上肢运动功能障碍的深入理解,并为精细化的临床管理提供了高质量依据,还促进了上肢运动医学及康复医学的发展。

然而,受限于较昂贵的设备、耗材以及较严苛的实验室条件,上肢 3DKA 目前仍未在我国推广应用。尽管 3DKA 在上肢运动功能的测量至今已发展了 20 年余,但目前仍存在一些课题待以解决:①不同的目标任务设计、不同的实验设备和测量精度限制了各研究之间的可比性;②缺乏从事上肢 3DKA 的专业研究人员制约了该技术的进一步推广;③缺乏有效地建立上肢运动学数据库,这极易导致研究设计的无目的性及研究的重复性^[1];④界定上肢 3DKA 中的最小临床重要性差值(minimal clinically important difference)存在一定困难^[26]。不过,虽然上肢 3DKA 目前存在诸多挑战,但可以预见的是,随着该领域的研究不断深入和广泛应用,在不久的将来,3DKA 可以成为支持和促进上肢康复医学的个体化、精准化发展的重要组成部分。

参 考 文 献

- [1] Mesquita IA, Fonseca PFPD, Pinheiro ARV, et al. Methodological considerations for kinematic analysis of upper limbs in healthy and poststroke adults. Part II: a systematic review of motion capture systems and kinematic metrics [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2019, 26(6): 464-472. DOI:10.1080/10749357.2019.1611221.
- [2] Morales R, Badesa FJ, Garcá A-Aracil N, et al. Pneumatic robotic systems for upper limb rehabilitation [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2011, 49(10): 1145-1156. DOI:10.1007/s11517-011-0814-3.
- [3] Lili L, Sunnerhagen KS, Rekan T, et al. Quantifying an upper extremity everyday task with 3D kinematic analysis in people with spinal cord injury and non-disabled controls [J]. *Front Neurol*, 2021, 12(10): 755790. DOI:10.3389/fneur.2021.755790.
- [4] Alt Murphy M, Murphy S, Persson HC, et al. Kinematic analysis using 3D motion capture of drinking task in people with and without upper-extremity impairments [J]. *J Vis Exp*, 2018, (133): 57228. DOI:10.3791/57228.
- [5] Rau G, Disselhorst-Klug C, Schmidt R. Movement biomechanics goes upwards: from the leg to the arm [J]. *J Biomech*, 2000, 33(10): 1207-1216. DOI:10.1016/S0021-9290(00)00062-2.
- [6] Haberfehlner H, Goudriaan M, Bonouvrié LA, et al. Instrumented assessment of motor function in dyskinetic cerebral palsy: a systematic review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1): 39-45. DOI:10.1186/s12984-020-00658-6.
- [7] Mesquita IA, Pinheiro ARV, Velhote Correia MFP, et al. Methodological considerations for kinematic analysis of upper limbs in healthy and poststroke adults. Part I: a systematic review of sampling and motor tasks [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2019, 26(2): 142-152. DOI:10.1080/10749357.2018.1551953.
- [8] Schwarz A, Kanzler CM, Lamberg O, et al. Systematic review on kinematic assessments of upper limb movements after stroke [J]. *Stroke*, 2019, 50(3): 718-727. DOI:10.1161/STROKEAHA.118.023531.
- [9] Kodama A, Kurumadani H, Tanaka T, et al. Three-dimensional analysis of thumb motion recovery after carpal tunnel release [J]. *J Hand Surg Eur Vol*, 2021, 46(7): 743-748. DOI:10.1177/17531934211014700.

- [10] Reissner L, Fischer G, List R, et al. Minimal detectable difference of the finger and wrist range of motion: comparison of goniometry and 3D motion analysis[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1):173-177. DOI: 10.1186/s13018-019-1177-y.
- [11] Jariwala AC, Kiran M, Hyndman I, et al. Kinematic 3-D motion analysis of shoulder resurfacing hemiarthroplasty-An objective assessment method[J]. *J Biomech*, 2021, 122(1):110454. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2021.110454.
- [12] Mazzarella J, McNally M, Richie D, et al. 3D motion capture may detect spatiotemporal changes in pre-reaching upper extremity movements with and without a real-time constraint condition in infants with perinatal stroke and cerebral palsy: a longitudinal case series[J]. *Sensors*, 2020, 20(24):7312. DOI: 10.3390/s20247312.
- [13] Nordin N, Xie SQ, Wünsche B. Assessment of movement quality in robot-assisted upper limb rehabilitation after stroke: a review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11(9):137. DOI: 10.1186/1743-0003-11-137.
- [14] Niechwiej-Szwedo E, Gonzalez D, Nouredanesh M, et al. Evaluation of the Leap Motion Controller during the performance of visually-guided upper limb movements[J]. *PLoS One*, 2018, 13(3):e0193639. DOI: 10.1371/journal.pone.0193639.
- [15] Vencúrik T, Knjaz D, Rupčić T, et al. Kinematic Analysis of 2-Point and 3-Point Jump Shot of Elite Young Male and Female Basketball Players[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(3):934. DOI: 10.3390/ijerph18030934.
- [16] Chen ZJ, He C, Xia N, et al. Association Between Finger-to-Nose Kinematics and Upper Extremity Motor Function in Subacute Stroke: A Principal Component Analysis[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2021, 9(4):660015. DOI: 10.3389/fbioe.2021.660015.
- [17] Mesquita IA, Fonseca PFPD, Borgonovo-Santos M, et al. Comparison of upper limb kinematics in two activities of daily living with different handling requirements[J]. *Hum Mov Sci*, 2020, 72(8):102632. DOI: 10.1016/j.humov.2020.102632.
- [18] Alt Murphy M, Sunnerhagen KS, Johnels B, et al. Three-dimensional kinematic motion analysis of a daily activity drinking from a glass: a pilot study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2006, 3(8):18. DOI: 10.1186/1743-0003-3-18.
- [19] Kwakkel G, van Wegen E, Burridge JH, et al. Standardized measurement of quality of upper limb movement after stroke: consensus-based core recommendations from the Second Stroke Recovery and Rehabilitation Roundtable[J]. *Int J Stroke*, 2019, 14(8):783-791. DOI: 10.1177/1747493019873519.
- [20] Alt Murphy M, Willén C, Sunnerhagen KS. Movement kinematics during a drinking task are associated with the activity capacity level after stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2012, 26(9):1106-1115. DOI: 10.1177/1545968312448234.
- [21] Alt Murphy M, Willén C, Sunnerhagen KS. Sunnerhagen. Kinematic variables quantifying upper-extremity performance after stroke during reaching and drinking from a glass[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2011, 25(1):71-80. DOI: 10.1177/1545968310370748.
- [22] Savin J, Gaudez C, Gilles MA, et al. Evidence of movement variability patterns during a repetitive pointing task until exhaustion[J]. *Appl Ergon*, 2021, 96(10):103464. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103464.
- [23] Frykberg GE, Grip H, Alt Murphy M. How many trials are needed in kinematic analysis of reach-to-grasp? A study of the drinking task in persons with stroke and non-disabled controls[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):101. DOI: 10.1186/s12984-021-00895-3.
- [24] Alt Murphy M, Willén C, Sunnerhagen KS. Responsiveness of upper extremity kinematic measures and clinical improvement during the first three months after stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2013, 27(9):844-853. DOI: 10.1177/1545968313491008.
- [25] Johansson GM, Grip H, Levin MF, et al. The added value of kinematic evaluation of the timed finger-to-nose test in persons post-stroke[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1):11-15. DOI: 10.1186/s12984-017-0220-7.
- [26] Wagner JM, Rhodes JA, Patten C. Reproducibility and minimal detectable change of three-dimensional kinematic analysis of reaching tasks in people with hemiparesis after stroke[J]. *Phys Ther*, 2008, 88(5):652-663. DOI: 10.2522/ptj.20070255.
- [27] Kerr L, Jewell VD, Jensen L. Stretching and splinting interventions for poststroke spasticity, hand function, and functional tasks: a systematic review[J]. *Am J Occup Ther*, 2020, 74(5):7405205050p1-7405205050p15. DOI: 10.5014/ajot.2020.029454.
- [28] Chen YW, Liao WW, Chen CL, et al. Kinematic descriptions of upper limb function using simulated tasks in activities of daily living after stroke[J]. *Hum Mov Sci*, 2021, 79(10):102834. DOI: 10.1016/j.humov.2021.102834.
- [29] Hansen GM, Svendsen SW, Pedersen AR, et al. Shoulder function after constraint-induced movement therapy assessed with 3D kinematics and clinical and patient reported outcomes: a prospective cohort study[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2021, 58(6):102547. DOI: 10.1016/j.jelekin.2021.102547.
- [30] Bustrén EL, Sunnerhagen KS, Murphy MA. Movement kinematics of the ipsilesional upper extremity in persons with moderate or mild stroke[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2017, 31(4):376-386. DOI: 10.1177/1545968316688798.
- [31] Pons R, Vanezis A, Skouteli H, et al. Upper limb function, kinematic analysis, and dystonia assessment in children with spastic diplegic cerebral palsy and periventricular leukomalacia[J]. *J Child Neurol*, 2017, 32(11):936-941. DOI: 10.1177/0883073817722451.
- [32] Simon-Martinez C, Maillieux L, Jaspers E, et al. Effects of combining constraint-induced movement therapy and action-observation training on upper limb kinematics in children with unilateral cerebral palsy: a randomized controlled trial[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1):10421. DOI: 10.1038/s41598-020-67427-2.
- [33] Linderman SE, Scarborough DM, Oh LS. The Relationship of Shoulder and Elbow Stresses and Upper Limb Contact Order During a Round-off Back Handspring[J]. *PM R*, 2021, 12(1):73-80. DOI: 10.1002/pm-rj.12365.
- [34] MacLean KFE, Dickerson CR. Kinematic and EMC analysis of horizontal bimanual climbing in humans[J]. *J Biomech*, 2019, 92:11-18. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2019.05.023.

(修回日期:2023-07-21)

(本文编辑:汪玲)