·综述·

视觉参与运动控制形成理论与实践研究进展

郭佳宝 陈炳霖 朱毅

视觉系统在所有感觉系统中占重要地位,80%以上外界信息感知均是由视觉系统完成[1]。视觉系统将可见光信息构建成机体对周围环境的感知,使生物体具有视知觉功能。视觉作为人类重要的知觉功能,在运动形成及控制中扮演举足轻重的角色,为此本文针对视觉与运动控制形成和重建的关系进行概括总结,并对视觉系统训练的国际研究动态进行探讨,以期找寻康复训练中改善患者运动功能的新思路。

运动控制的形成与重建

机体知觉系统与运动系统相互作用,加上认知在多个水平上对其调控和影响,从而产生运动,如图 1。知觉系统包括躯体感觉、视觉和前庭系统,每种感觉都为运动和姿势控制提供了不同参考框架[2]。躯体感觉系统中的外周感受器,如肌梭、高尔基腱器官等参与控制脊髓反射和脊髓信号输出、调节下行传导指令及通过上行传导通路参与对运动的感知和控制。视觉系统则帮助机体辨识空间中的物体以及探查它们的运动,提供关于躯体在空间中的位置,身体各部分之间的关联以及身体运动信息等;人体前庭系统对头部在空间中的位置及其运动方向突然改变十分敏感。目前躯体感觉及前庭系统在运动控制中的作用已在较多文献中被论证,而视觉作用却很少被理解。这可能与视觉获取及处理容易受人类自身和环境等多种因素(如视力、光线等)影响有关[3]。

在运动形成过程中,机体常会遭遇来自内部或外部的姿势干扰破坏稳定,如迈步起始时抬腿或站在移动公共汽车上,此时机体为了维持身体稳定,中枢神经系统就会启用两种主要调节方式,即前馈和反馈[4]。前馈是一种自上而下的运动控制模式,控制中心根据传入信息输出指令,一次性决定运动系统输出,并且在该过程中不再受反馈信息干扰和修正。前馈能预先激活躯干及四肢肌肉活动,从而使身体重心和压力中心位移最小化,又称预期姿势调节(anticipatory postural adjustments, APAs)。反馈控制是一种自下而上的运动控制模式,通过中枢输出指令控制肌肉运动,相关感受器将有关运动信息再次传回至控制中心,从而指导继续执行初始的运动指令或是进行动作修正。反馈是在姿势干扰后尽量恢复身体重心的一种机制,故又称补偿性姿势调节(compensatory postural adjustments, CPAs)[5]。从理论上讲,一些小的干扰可通过 APAs 进行调整,且因预期肌肉激活,身体重心移动很轻微;但是在实际活动中,仅通过 APAs 参与就能恢复姿势的干扰很少,在这种情况下中枢神经系统会通过反馈信息来使用 CPAs[6]。有研究利用肌电图探讨经外部干扰后 APAs 和 CPAs 对姿势恢复的作用及两者间关系,结果发现 APAs 通过对肌肉预激活以及降低激活阈限等机制调节和控制 CPAs 的快速反应时间和反应强度,如中枢神经系统未能产生 APAs,CPAs 就会大规模启用[7],表现为较大的身体重心和压力中心位移。上述构成了中枢神经系统在机体遭遇突发内部或外部姿势干扰条件时对身体姿势肌肉和动作肌肉产生快速协同反应的基本认知神经控制机制。

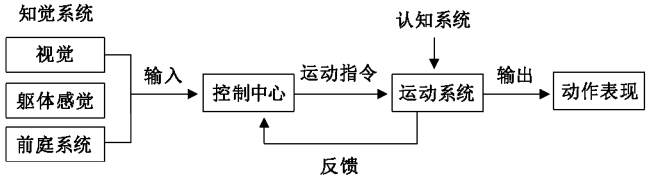

图 1 运动控制的形成与重建

视觉在运动控制中的作用

视觉能以多种途径来协助姿势及运动控制。下面分别从视觉系统的解剖路径、生理联系、病理变化及视觉在运动形成与控制中发挥的作用来具体展开。

一、视觉系统

视觉系统在获取外界信息过程中占有重要地位。首先视网膜上的视杆细胞和视锥细胞完成对外界光信息的获取,经视网膜分层传输和整合,到神经节细胞传入视神经,经视交叉后由视束投射到外侧膝状体(lateral geniculate nucleus, LGN)、上丘及顶盖前区。来自 LGN 的轴突继续投射到视觉皮质,视觉皮质主要包括纹状皮质(视觉第一区,即 V1)和纹外皮质(视觉第二、三、四、五区等,即 V1、V2、V3、V4、V5)。1982 年 Ungerleider 和 Mishkin[8]提出整个皮质信息处理过程由两条平行通路完成,视网膜节细胞有两个主要分支,其中一种与 LGN 大细胞层连接,即腹侧通路,另一条与 LGN 小细胞层连接,即背侧通路,模型见图 2。腹侧通路主要负责对象的识别,并与长期记忆有关;背部通路主要参与处理物体的空间位置信息以及相关的运动控制。两个视觉通路并不是完全独立,各层次之间存在着前向、水平和反馈交互作用,这是视觉信息在高级阶段进行加工、整合的结构基础。LGN 把信息传递给视觉皮质同时,也接受来自皮质及脑干网状结构的信息。视觉皮质对 LGN 进行负反馈调节,从而保持整个视觉系统稳定。此外节细胞的轴突还终止于上丘和顶盖前区;上丘将输出传递至控制眼球运动的脑干,调节顶盖脊髓束颈部和头部反射,进一步处理顶盖脑桥束眼-头控制;顶盖前区则主要参与瞳孔对光反射,是一个重要的视觉反射处理中心[9]。

在躯体感觉系统中,视觉系统障碍因病变区域不同而呈现不同表现。损伤发生在视交叉之前,如眼球光传导装置、视网膜或视神经可引起患侧眼球视野全盲;损伤发生在视交叉,常

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2017.08.021
基金资助:海南自然科学基金面上项目(20168291)
作者单位:200438 上海,上海体育学院(郭佳宝);徐州医科大学(陈炳霖);海南医学院第二附属医院(朱毅)
通信作者:朱毅,Email:zhuyi1010@163.com

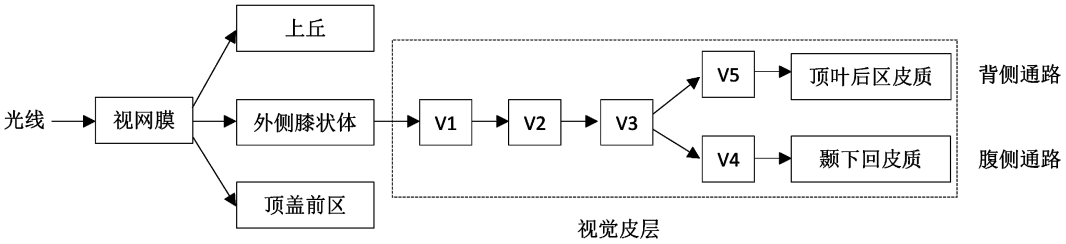

图 2　视觉输入模型

导致双眼视觉丧失;损伤发生在视交叉之后,如损伤发生在视束、外侧膝状体、视辐射或视皮质时可导致双眼病灶对侧视野丧失,即同向性偏盲[10]。此外右半球脑卒中患者常伴有单侧空间忽略,它本质上是一种对损伤对侧空间利用和认知的障碍,但主要以视觉形式表现,因此影响卒中后患者运动功能恢复[11]。

二、视觉在运动形成与控制中的作用

视觉作为知觉系统一部分,参与了运动控制的形成与重建。在运动形成过程中,视觉与躯体感觉、前庭系统一起作为知觉信号输入,经中枢神经系统后输出指令并产生运动。在此过程中,视觉能帮助辨识空间中的物体及其运动,提供身体在空间中的位置、身体各部分之间的联系以及身体动作的信息。运动控制表现为同时拥有产生运动和保持稳定的双重目的,当这种稳定受到干扰而需重建时,视觉可通过参与前馈与反馈帮助身体调节和控制姿势。在前馈控制过程中,快速的视觉扫视运动通常在 80 ms 内完成,而此时躯体感觉和前庭系统感知的信息还来不及反馈[12]。扫视过程可根据干扰刺激大小、高度、速度等物理特征,形成自上而下、相对精准的姿势干扰预测,然后针对身体姿势肌肉和动作肌肉系统的活动作出相对精准控制,姿势性肌肉活动在原发运动肌活动之前发生,以提前代偿运动可能导致的不稳定。但扫视过程会受到运动意图的影响,如兴趣、额外任务奖励以及注意资源占用状态等[13]。不同视觉线索对 APAs 的影响亦不同,视觉线索可来自单眼或双眼,可以是静态或动态。Mohapatra 等[14]通过记录分析 10 例健康受试者在动态、静态及缺乏视觉线索情况下受到外部干扰刺激后其躯干、四肢肌肉的肌电活动及身体压力中心位移,结果发现动态视觉线索能较容易产生 APAs,而静态视觉信息产生的 APAs 明显下降,缺乏视觉线索则无 APAs 产生,提示 APAs 的产生可能与提供视觉线索的质量有关。Mohapatra 等[15]研究还显示当面临外部干扰时,如果有足够的视觉信息能对碰撞时间提供准确预测,就能产生强大的 APAs 来调整姿势;但如果视敏感下降将影响患者对外部干扰来临的预测及 APAs 产生,如视觉功能障碍、光线昏暗等情况。反馈控制的启用发生在原发运动之后,它基于感受器传入信息,目的是使身体进一步稳定。最近有研究显示在突发姿势干扰条件下,视觉能通过中枢前馈控制机制对姿势肌肉和动作肌肉产生影响,可增加动作肌肉和姿势肌肉 APAs 发生率,缩短预激活时间,减少动作肌肉 CPAs 反应强度。这说明视觉可通过改变 APAs 发生率来影响 CPAs 强弱[16]。

视觉系统训练在临床中的应用

基于视觉在运动控制中的重要作用,一些运动功能受损患者可通过强化视觉信息输入训练,增强姿势控制和调节能力,从而帮助其提高运动功能。功能磁共振成像发现带有视觉反馈的功能训练能改变受试者感觉运动皮质活动[17]。目前视觉系统训练在脑卒中、脑瘫、骨关节损伤、帕金森及多发性硬化等疾病治疗中均有运用;镜像疗法、虚拟现实技术及带有视觉反馈的等速及平衡训练在临床康复中较常见。

一、镜像疗法

镜像治疗时通常在患者正前方垂直放置一面镜子,使其看到健侧肢体运动镜像,患者再由上方观察镜中反射的影像将健侧手影像重叠于患肢上,建立一种视错觉。Nojima 等[18]通过经颅磁刺激证实,经镜像治疗后患者患侧上肢运动功能恢复与其主要运动区功能重塑有较大关联。提示镜像疗法改善运动功能的可能机制是健侧上肢的视觉信息不断刺激大脑皮质运动区,影响了运动区的电活动及镜像神经元兴奋性。目前镜像疗法对脑卒中后上肢运动功能的改善作用已得到循证医学证据支持,李欣怡等[19]通过 Meta 分析发现镜像疗法能在一定程度上促进患者上肢及手运动功能恢复及日常生活活动能力提高。此外刘洋等[20]将 40 例偏瘫型脑瘫儿童随机分为试验组及对照组,两组患儿均接受常规康复治疗,试验组在此基础上辅以镜像治疗,治疗 10 周后发现试验组患儿在上肢运动功能、握力、前臂旋后角度及肌肉厚度等方面均明显优于对照组,组间差异具有统计学意义。镜像疗法也被用于骨关节损伤后的运动功能恢复,如有研究将 30 例因关节损伤而造成手部主动关节活动范围受损的患者分为镜像疗法联合传统康复训练组和传统康复训练组,治疗 3 周后发现镜像疗法联合传统康复训练较单纯康复训练对手功能有更显著的改善效果[21]。

二、虚拟现实技术

虚拟现实是由电脑模拟出一个三维虚拟世界,提供视、听、触觉等感官模拟,患者可准确观察模拟空间内任何事物,它是一个集多种感官刺激于一体的沉浸交互式虚拟环境[22]。有研究认为虚拟现实技术改善脑损伤患者运动功能的效果可能与虚拟现实系统提供的视觉等多种感官反馈和运动执行时的动机激发有关,这些感觉信息使中枢神经系统能更好地控制位置和定向[23]。与传统训练方式比较,虚拟现实技术可控制观察者接收的光量,且能精确控制视觉场景里的光空间分布,产生距离和位置上的视觉刺激,因此虚拟现实技术能使视觉刺激更加精准作用于患者[24]。近年来虚拟现实技术被广泛应用于脑卒中患者上、下肢运动功能康复,目前有循证医学证据支持虚拟现实技术对卒中后上肢运动功能改善及日常生活活动能力提高有促进作用,但对下肢运动功能恢复的疗效无确切证据支持[25]。此外,在卒中或脊髓损伤的神经康复中虚拟现实技术常与康复机器人相结合进行训练[26]。Merians 等[27]利用虚拟环

境下的上肢机器人对脑卒中患者进行 8 d 运动训练(包括弹球、敲木槌等上肢运动等),结果发现患者上肢近端稳定性提高,偏瘫侧手功能明显改善。Liao 等[28]也发现虚拟现实技术在改善帕金森病患者步行及平衡功能方面具有明显优势。在脑瘫患儿的研究中则发现利用虚拟现实来诱导运动训练能提高患儿训练中的依从性及治疗效果[29]。

三、其他疗法

除了镜像疗法和虚拟现实技术外,康复临床中还有较多带有视觉训练系统的仪器可以利用。视觉反馈等速训练及视觉反馈平衡训练是两种较常见方式。李圣杰等[30]将 19 例骨关节炎患者及 10 例髌骨骨折保守治疗患者分别随机分为反馈组及对照组,反馈组采用带有视觉反馈功能的 Biodex 等速系统进行治疗,对照组则给予传统肌力能量训练,各组患者均每天治疗 1 次,每周治疗 5 次,治疗 4 周后发现视觉反馈下肌肉能量技术较传统肌肉能量技术能进一步增强股四头肌肌力。徐迪等[31]对踝关节骨折术后患者进行平衡及步行能力研究,试验组给予视觉反馈平衡训练及常规康复训练,对照组采用常规康复训练,经 4 周治疗后发现试验组平衡能力较对照组显著增加;此外带有视觉反馈的平衡训练在脑瘫、帕金森及多发性硬化患者临床随机对照研究中均显示优于常规康复训练[32-34]。

四、视觉功能障碍患者的训练方式

基于视觉在运动形成与控制中的重要作用,对一些存在视觉功能障碍的患者需采取积极治疗。目前主要有三种针对性治疗方案:第一种是补偿,如使用未受损的视觉系统来弥补受损部位功能;第二种是替代,使用环境改造和视觉设备,如棱镜适应技术等,它是一种视觉运动适应技术,佩戴棱镜能使主观中线出现暂时偏移,从而帮助患者将视线偏向忽略侧,已有不少研究证实棱镜适应技术对改善卒中患者空间忽略具有良好效果;第三是通过激活受损部位幸存的神经元来修复丧失的功能,如视觉重建治疗,它是一种以改善同向偏盲患者视野功能为目的的治疗方法。脑损伤后移行区的部分神经细胞存在一定功能,视觉重建治疗就是刺激和恢复这些细胞功能从而扩大视野。Oh 等[35]报道了 3 例卒中后单侧空间忽略患者,每天通过佩戴棱镜将光学角度偏移 15°(每天持续约 12 h),同时配合偏瘫肢体训练,15 周后发现患者单侧空间忽略情况及偏瘫侧肢体运动功能均得到明显改善。随后有学者对 26 篇相关文献进行系统评价,发现棱镜适应技术能有效改善卒中单侧空间忽略患者日常生活能力[36]。1998 年有学者发表了关于视觉重建治疗的临床报道,该研究将视觉重建治疗与计算机程序相结合,首先通过高分辨率视野检测在损害侧视野内找出具有残余视力的部分,然后利用残余视功能重建电脑系统对该部分区域进行重复视觉刺激;38 例脑损伤后视野缺损患者经 6 个月训练后,发现其视觉刺激能力得到明显改善,视野扩大了 4.9–5.8°[37]。此后还出现不少相关研究,其中一项对比研究发现视觉重建联合经颅直流电刺激治疗同向性偏盲优于单纯视觉重建治疗[38]。目前视觉重建治疗对脑损伤后同向偏盲的疗效仍存在争议,缺乏高质量临床随机对照研究来支持其使用[39]。

结语

视觉信息输入及视觉在前馈和反馈中的独特作用影响着人体姿势控制和运动控制,视觉在运动形成及控制中的作用不容忽视。目前视觉系统训练改善运动功能的临床研究在国际上报道较多,镜像疗法和虚拟现实技术均已获得循证医学证据支持;此外运动功能障碍患者若合并有视觉功能障碍可考虑进行视觉功能改善治疗。综上所述,本文初步介绍了视觉参与运动形成和控制的理论及相关研究进展,以期引起国内同行关注及重视,从而更好地指导临床康复工作。

参 考 文 献

[1] Kim S, Jeneson A, van der Horst AS, et al. Memory, visual discrimination performance, and the human hippocampus[J]. J Neurosci, 2011, 31(7): 2624-2629. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5954-10.2011.

[2] Schmidt RA, Lee TD. Motor control and learning: A behavioral emphasis[M]. USA: Human Kinetics, 2005.

[3] Wade MG, Jones G. The role of vision and spatial orientation in the maintenance of posture[J]. Phys Ther, 1997, 77: 619-628. DOI: 10.1093/ptj/77.6.619.

[4] Lennon S. Motor control: theory and practical applications[J]. Physiotherapy, 1996, 82(10): 591-591. DOI: 10.1016/S0031-9406(05)66312-2.

[5] Varghese JP, Merino DM, Beyer KB, et al. Cortical control of anticipatory postural adjustments prior to stepping[J]. Neuroscience, 2016, 313: 99-109. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2015.11.032.

[6] Li X, Aruin AS. The effect of short-term changes in the body mass on anticipatory postural adjustments[J]. Exp Brain Res, 2007, 181(2): 333-346. DOI: 10.1007/s00221-007-0931-2.

[7] Santos MJ, Kanekar N, Aruin AS. The role of anticipatory postural adjustments in compensatory control of posture: 1. Electromyographic analysis[J]. J Electromyogr Kinesiol, 2010, 20(3): 388-397. DOI: 10.1016/j.jelekin.2009.06.006.

[8] Mishkin M, Ungerleider LG. Contribution of striate inputs to the visuospatial functions of parieto-preoccipital cortex in monkeys[J]. Behav Brain Res, 1982, 6(1): 57-77. DOI: 10.1016/0166-4328(82)90081-X.

[9] Frank H. Netter. 奈特人体神经解剖彩色图谱[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2006: 237-240.

[10] Wilson-Pauwels L, Stewart PA, Akesson EJ, et al. 脑神经功能及障碍[M]. 3 版. 北京: 人民卫生出版社, 2012: 20-38.

[11] Kerkhoff G. Neurovisual rehabilitation: recent developments and future directions[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 2000, 68(6): 691-706. DOI: 10.1136/jnnp.68.6.691.

[12] Aruin AS. The organization of anticipatory postural adjustments[J]. J Autom Contr, 2002, 12(1): 31-37. DOI: 10.2298/jac0201031a.

[13] Aruin AS, Latash ML. The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations[J]. Exp Brain Res, 1995, 106(2): 291-300. DOI: 10.1007/BF00241125.

[14] Mohapatra S, Aruin AS. Static and dynamic visual cues in feed-forward postural control[J]. Exp Brain Res, 2013, 224(1): 25-34. DOI: 10.1007/s00221-012-3286-2.

[15] Mohapatra S, Krishnan V, Aruin AS. The effect of decreased visual acuity on control of posture[J]. Clin Neurophysiol, 2012, 123(1): 173-182. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.06.008.

[16] 张芷, 王健. 神经肌肉下意识前馈与反馈控制的知觉线索效应[J]. 心理学报, 2014, 46(1): 50-57. DOI: 10.3724/SP.J.1041.2014.

00050.

[17] Begliomini C, Nelini C, Caria A, et al. Cortical activations in humans grasp-related areas depend on hand used and handedness[J]. PLoS One, 2008, 3(10): e3388. DOI: 10.1371/journal.pone.0003388.

[18] Nojima I, Mima T, Koganemaru S, et al. Human motor plasticity induced by mirror visual feedback[J]. J Neurosci, 2012, 32(4): 1293-1300. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5364-11.2012.

[19] 李欣怡. 镜像疗法治疗脑卒中患者上肢功能障碍效果的 Meta 分析[D]. 吉林大学, 2015.

[20] 刘洋, 李晓捷, 汤敬华, 等. 镜像视觉反馈疗法治疗 20 例偏瘫型脑性瘫痪儿童上肢功能疗效观察[J]. 中国中西医结合儿科学, 2013, 5(2): 162-164. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3865.2013.02.032.

[21] Rostami HR, Arefi A, Tabatabaei S. Effect of mirror therapy on hand function in patients with hand orthopaedic injuries: a randomized controlled trial[J]. Disabil Rehabil, 2013, 35(19): 1647-1651. DOI: 10.3109/09638288.2012.751132.

[22] 王宏图. 虚拟现实技术在脑卒中运动康复中的应用现状[J]. 中国康复理论与实践, 2014, 9(10): 911-915. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2014.10.004.

[23] Corbetta D, Imeri F, Gatti R. Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review[J]. J Physiother, 2015, 61(3): 117-124. DOI: 10.1016/j.jphys.2015.05.017.

[24] Ragan ED, Bowman D, Kopper R, et al. Effects of field of view and visual complexity on virtual reality training effectiveness for a visual scanning task[J]. IIEEE Trans Vis Comput Graph, 2015, 21(7): 794-807. DOI: 10.1109/TVCG.2015.2403312.

[25] Laver K, George S, Thomas S, et al. Virtual reality for stroke rehabilitation: an abridged version of a Cochrane review[J]. Eur J Phys Rehabil Med, 2015, 51(4): 497-506.

[26] Cortés C, Ardanza A, Molina-Rueda F, et al. Upper limb posture estimation in robotic and virtual reality-based rehabilitation[J]. Biomed Res Int, 2014, 2014: 821908. DOI: 10.1155/2014/821908.

[27] Merians AS, Fluet GG, Qiu Q, et al. Robotically facilitated virtual rehabilitation of arm transport integrated with finger movement in persons with hemiparesis[J]. J Neuroeng Rehabil, 2011, 8: 27. DOI: 10.1186/1743-0003-8-27.

[28] Liao YY, Yang YR, Cheng SJ, et al. Virtual reality-based training to improve obstacle-crossing performance and dynamic balance in patients with Parkinson's disease[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2015, 29(7): 567-658. DOI: 10.1177/1545968314562111.

[29] Bryanton C, Bossé J, Brien M, et al. Feasibility, motivation, and selective motor control: virtual reality compared to conventional home exercise in children with cerebral palsy[J]. Cyberpsychol Behav, 2006, 9(2): 123-128. DOI: 10.1089/cpb.2006.9.123.

[30] 李圣节, 王瑞, 李飞, 等. 视觉反馈下离心收缩锻炼治疗跟腱病的疗效观察[J]. 军医进修学院学报, 2016, 37(9): 1-3. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2016.09.015.

[31] 徐迪, 高明霞, 陈安亮, 等. 视觉反馈平衡训练对踝关节骨折术后患者平衡和步行功能的影响[J]. 实用临床医药杂志, 2014, 18(24): 59-60. DOI: 10.7619/jcmp.201424018.

[32] 胡燕丽, 张丽华, 李晓捷, 等. 应用平衡仪训练改善痉挛型双瘫患儿站立能力的疗效观察[J]. 中国中西医结合儿科学, 2010, 2(6): 556-558. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3865.2010.06.037.

[33] van den Heuvel MR, Kwakkel G, Beek PJ, et al. Effects of augmented visual feedback during balance training in Parkinson's disease: A pilot randomized clinical trial[J]. Parkinsonism Relat Disord, 2014, 20(12): 1352-1358. DOI: 10.1016/j.parkreldis.2014.09.022.

[34] Eftekharsadat B, Babaei-Ghazani A, Mohammadzadeh M, et al. Effect of virtual reality-based balance training in multiple sclerosis[J]. Neurol Res, 2015, 37(6): 539-544. DOI: 10.1179/1743132815Y.0000000013.

[35] Oh SI, Kim JK, Park SY. The effects of prism glasses and intensive upper limb exercise on hemineglect, upper limb function, and activities of daily living in stroke patients: a case series[J]. J Phys Ther Sci, 2015, 27(12): 3941-3943. DOI: 10.1589/jpts.27.3941.

[36] Champod AS, Frank RC, Taylor K, et al. The effects of prism adaptation on daily life activities in patients with visuospatial neglect: a systematic review[J]. Neuropsychol Rehabil, 2016, 16: 1-24. DOI: 10.1080/09602011.2016.1182032.

[37] Kasten E, Wust S, Behrens-Baumann W, et al. Computer-based training for the treatment of partial blindness[J]. Nat Med, 1998, 4(9): 1083-1087. DOI: 10.1038/2079.

[38] Plow EB, Obretenova SN, Halko MA, et al. Combining visual rehabilitative training and noninvasive brain stimulation to enhance visual function in patients with hemianopia: a comparative case study[J]. PMR, 2011, 3(9): 825-835. DOI: 10.1016/j.pmrj.2011.05.026.

[39] Miller NR, Subramanian PS. Should visual restoration therapy be used in patients with visual field loss? [J]. J Neuroophthalmol, 2015, 35(3): 319-322. DOI: 10.1097/WNO.0000000000000252.

（修回日期：2017-06-20）
（本文编辑：易　浩）