

文章编号:1004-7220(2012)04-0444-07

视觉反馈人体姿态镇定作用的布朗运动模型分析

裴立力^{1,2,3}, 李洪谊¹, 伏云发^{1,3}

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

2. 山西大学物理电子工程学院, 太原 030006; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: **目的** 探究视觉反馈对人体静止直立姿态的镇定作用及其发生机制。**方法** 考察 12 名青年志愿者在直立(对照)状态和直立并视觉反馈状态下足底压力中心(center of pressure, COP)的变化。利用布朗运动模型对比两种状态下 COP 轨迹的扩散系数、Hurst 指数及临界点特性变化,并通过单因素重复测量方差分析检验其差异显著性。**结果** 视觉反馈状态下:长期区间上,Hurst 指数减小约 1/2,扩散系数减小约 2/3;短期区间上,Hurst 指数与左右方向扩散系数均无显著变化;临界点均方位移仅在前后方向显著增大,时间间隔变化不显著。**结论** 视觉反馈增强了人体姿态闭环控制,但对开环控制及开、闭环控制机制的切换特性影响不大;视觉反馈对人体姿态控制的作用表现出方向差异,前后方向上的视觉反馈作用比左右方向更为明显。

关键词: 姿态控制; 姿态摇摆; 视觉反馈; 足底压力中心; 布朗运动模型

中图分类号: Q 811.211; Q 811.3 文献标志码: A

Analysis on postural stabilization from visual feedback through Brownian motion modeling

PEI Li-li^{1,2,3}, LI Hong-yi¹, FU Yun-fa^{1,3} (1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. College of Physics and Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China 3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: **Objective** To explore postural stabilization of visual feedback to human body and its mechanisms. **Methods** Displacement of the center of pressure (COP) of 12 healthy young adult volunteers were investigated under upright posture with and without visual feedback conditions. The Brownian motion model was employed to compare the differences in diffusion coefficients, Hurst exponents, and critical points of the COP trajectories under the above two conditions, and one-way repeated measures ANOVA was utilized to test the significance of these differences. **Results** Under the visual feedback condition, in long-term time intervals, diffusion coefficients were reduced by about two thirds and Hurst exponents reduced by half; in short-term time intervals, no significant differences were found in diffusion coefficients in the medial-lateral (ML) direction and in Hurst exponents; in addition, the coordinates of the critical points presented no statistically significant differences in the time intervals except for the mean square displacement in the anterior-posterior (AP) direction. **Conclusions** Visual feedback enhances the closed-loop control mechanism of postural control, while it does not have great impact on the open-loop control mechanism and transitional characteristics of the two mechanisms; moreover, the effect of visual feedback on postural control in AP direction is more obvious than that in ML direction.

Key words: Postural control; Postural sway; Visual feedback; Center of pressure (COP); Brownian motion model

收稿日期:2012-03-13; 修回日期:2012-04-19

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(60705021)。

通讯作者:裴立力,讲师,E-mail: peilili@sia.cn。

视觉反馈已逐渐成为前庭疾病康复、脑卒中偏瘫患者与帕金森患者平衡恢复的重要治疗手段^[1-3]。治疗过程中,将由姿态测量仪器测得的足底压力中心(center of pressure, COP)以视觉信号的形式反馈给患者,并要求患者控制自身 COP 跟踪特定线路、按照特定方向或朝向特定目标运动^[4-6],以达到提高患者自身姿态控制能力的目的。

目前,相关研究常以 COP 轨迹统计特性来评价视觉反馈的姿态镇定效果,如考察其方差、位移均方根、姿态摇摆路径长、前后摇摆径及左右摇摆径等^[7-8]。这些统计特性虽可反映出视觉反馈对人体姿态镇定的总体作用效果,但却难以刻画视觉反馈对人体姿态镇定作用的动态过程,掩盖了其姿态镇定的产生机理。

本文采用布朗运动(Brownian motion)模型分析视觉反馈对人体姿态的镇定作用,克服传统统计学方法的上述局限,在短期和长期区间上分析视觉反馈的人体姿态镇定过程,发掘其姿态控制镇定机理;通过对比直立(对照)状态与直立并视觉反馈状态下静止直立人体姿态控制特性的变化,考察视觉反馈对人体姿态开、闭环控制机制的影响。

1 材料和方法

1.1 被试对象

12 名健康青年志愿者参与了姿态实验测试;其中,女性 2 名,男性 10 名。被试对象年龄(26.4 ± 2.6)岁,身高(170.1 ± 6.3) cm,体重(66.2 ± 9.1) kg。所有被试对象均无姿态及与之相关的肌肉、骨骼、神经疾病,并且全体被试对象视力正常或矫正视力正常,无视觉系统相关疾病史。本实验项目由中国科学院沈阳自动化研究所批准,所有被试对象对实验内容均知情同意。

1.2 实验设备

视觉姿态实验在 $2.5 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 封闭实验区进行,实验环境及设备如图 1 所示。视觉场景由固定于天花板的投影仪(Toshiba TDP-T355)投射到悬挂于墙壁的投影屏幕($1.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$);被试对象面对投影屏幕站立在生物力学测力台(Kistler 9286BA)上,测力台与屏幕水平距离 2.2 m。生物力学测力系统通过 NI 数据采集卡(NI PCI-6229)与计算机主机相连,以实现姿态数据 COP 的采集;除姿态数据

采集外,计算机主机还负责实验流程控制、视觉场景生成以及姿态数据存储等。

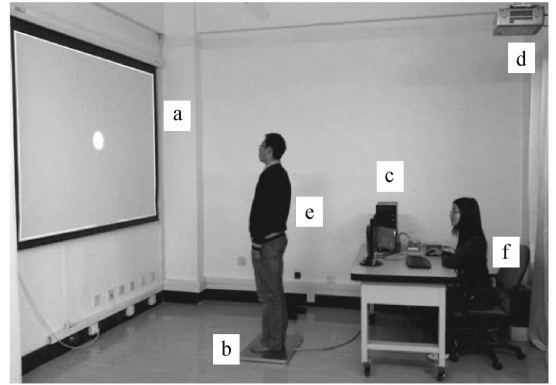


图 1 实验环境及设备示意图

Fig. 1 Schematic representation of experimental environment and apparatus a-投影屏幕,b-测力台,c-主机,d-投影仪,e-被试,f-主试

1.3 视觉条件

对照状态下,视觉场景由 $1.5 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}$ 黑色背景与直径 160 mm 白色目标圆斑(视角范围约为 3.7°)组成,白色圆斑固定于黑色背景之上(见图 2(a));视觉反馈状态下,视觉场景中增加与白色圆斑相同半径的蓝色参考圆环,圆环固定于黑色背景之上,圆斑可随被试对象 COP 变化而运动,参考圆环与目标圆斑构成视觉反馈指示器如图 2(b)所示,指示被试对象当前 COP 位置相对于参考位置的偏移。

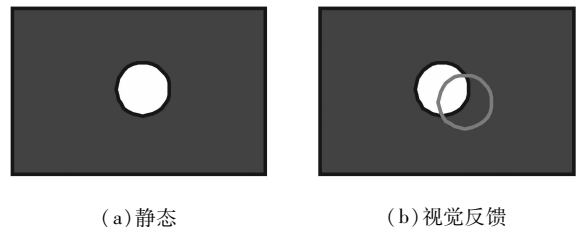


图 2 视觉场景示意图

Fig. 2 Schematic of static and feedback visual scenes

1.4 实验过程与数据记录

被试对象光脚站立在测力台上,双脚分开与肩同宽,双手自然悬垂身体两侧,双眼水平注视投影屏幕上的白色目标圆斑(见图 1)。

对照状态下,要求被试对象尽量保持身体直立静止,双眼始终注视固定目标圆斑。

视觉反馈状态下,测试前5 s,目标圆斑静止,要求被试对象尽量保持身体直立静止,双眼注视固定圆斑;5 s结束时,计算前5 s COP 均值 COP_{ref} 作为参考位置;5 s 结束后,目标圆斑依照被试对象当前 COP 相对于 COP_{ref} 的偏移量运动,目标圆斑的上下、左右运动分别对应于当前 COP 向前或向后、向左或向右偏离参考位置 COP_{ref} ,圆斑运动幅度正比于 COP 相对 COP_{ref} 的偏离量。目标圆斑运动时,要求被试对象利用踝关节调节人体姿态控制目标圆斑,使其尽量与参考圆环重合。

正式测试开始前,被试对象须进行多次练习,以确保其完全领会实验要求,并能够严格执行实验要求开展姿态实验。实验过程中,每一被试对象均需完成10组测试,两种视觉条件各重复5次,测试顺序随机。为避免被试对象疲劳对姿态控制产生影响,每组测试时长设为70 s,每组测试完毕,被试对象坐下休息至少1 min,测试数目过半后,被试对象休息3 min 以上。

实验中,每一测试均全程记录 COP 运动轨迹;数据采集程序基于 LabVIEW 8.5 DAQmx 编写;采样频率设为1 kHz。

1.5 实验数据处理

1.5.1 布朗运动模型 布朗运动位移均方值 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与时间间隔 Δt 之间的线性关系模型由 Einstein 给出:

$$\langle \Delta x^2 \rangle = 2D\Delta t \quad (1)$$

式中: D 为扩散系数(diffusion coefficient)。Mandelbrot 和 Van Ness 扩展了这一模型,描述了分数布朗运动(fractional Brownian motion):

$$\langle \Delta x^2 \rangle \sim \Delta t^{2H} \quad (2)$$

式中: $0 < H < 1$ 为 Hurst 指数。 H 在(0, 1)区间上的取值决定了分数布朗运动的一个重要特性——位移增量的相关特性,该特性可由其与时间无关的相关函数来表示:

$$C = 2(2^{2H-1} - 1) \quad (3)$$

当 $H > 1/2$ 时, $C > 0$, 过去时刻的位移变化会在将来时刻继续,模型体现开环控制特性;当 $H < 1/2$ 时, $C < 0$, 过去时刻与将来时刻的位移变化特性相反,模型体现闭环控制特性;而当 $H = 1/2$ 时,过去时刻特性与将来时刻特性无关,指数关系式(2)转变为式(1)的线性关系,分数布朗运动蜕变为经典布朗运动。

Collins 等^[9]首先将上述布朗运动模型应用于人体姿态数据的分段处理,其后逐渐被推广应用^[10-11]。

1.5.2 基于布朗运动模型的实验数据分析 姿态实验测试完成后,记录到的原始 COP 序列经由截止频率为6 Hz 的4阶 Chebyshev II 型低通滤波器滤波,Chebyshev II 型低通滤波器的通带无纹波特性可有效保护原始 COP 序列低频频段的姿态控制信息。此外,为剔除实验中不确定因素(如姿态控制中的瞬态现象、被试对象对实验结束的预期等)的影响,仅截取 COP 序列中间60 s(第8~68 s)数据作为有效的姿态数据,采用布朗运动模型方法在前后(anterior-posterior, AP)、左右(medial-lateral, ML)方向及位移平面(PL)进行分析,并利用方差分析(ANOVA)检验对照状态与视觉反馈状态下人体姿态控制差异的显著性。

为减少计算量,分析前对姿态数据进行100 Hz 下采样,采样周期 $T = 0.01$ s,对某一固定时间间隔 $\Delta t = kT$,计算位移均方值:

$$\langle \Delta x_i^2 \rangle = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^{N-k} [x_i(n+k) - x_i(n)]^2 \quad (4)$$

式中: $i = AP, ML, PL, N = 6\ 000, k = 1, 2, \dots, 1\ 000$, 相应的 Δt 最小值为0.01 s,最大值为10 s。依据式(4)计算同一被试在每种视觉状态下5次重复实验对应的 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线,并对其进行平均,得到同一被试特定视觉状态下的 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线。

2 结果

2.1 位移均方一时间间隔曲线的两段线性特性

如图3所示,COP 姿态数据处理计算得到的 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线:对照状态与视觉反馈状态下,位移均方值与时间间隔关系曲线均呈现两段线性特性,分别对应短期区间与长期区间,短期区间曲线较陡。该图取自被试对象7在前后方向上 COP 位移序列的处理结果,其他被试对象在各考察方向上的关系曲线均呈现类似特性。对比两种视觉状态下的 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线可知,视觉反馈的引入并未改变该曲线短期与长期区间共存的两段线性特性,但却对各区间上关系曲线的特性产生了影响。

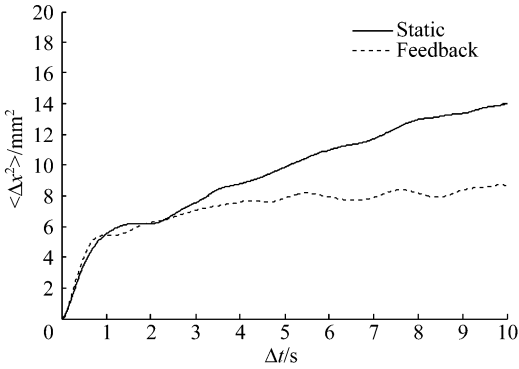
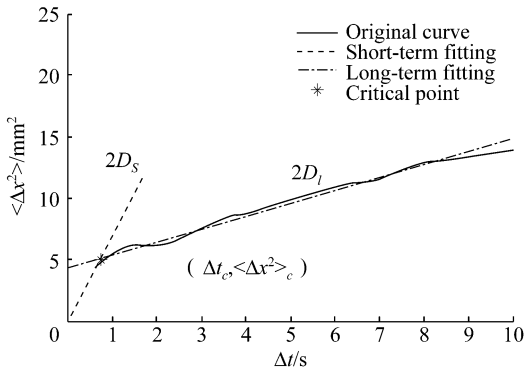
图3 静态与视觉反馈下 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线示例

Fig. 3 Curve of $\langle \Delta x^2 \rangle$ - Δt relation under static and visual feedback conditions

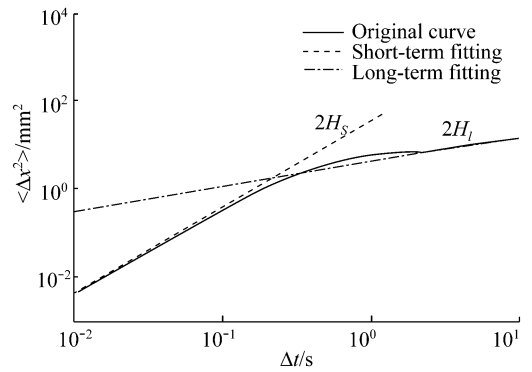
如图4所示,为定量考察各区间关系曲线特性的变化,分别在线性坐标和对数坐标下对 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线进行分段线性拟合,拟合直线斜率的一半即为扩散系数 D 和 Hurst 指数 H 。短期区间与长期区间相应参数分别记为: D_s 、 H_s 和 D_l 、 H_l ; 两拟合直线交点即为临界点 (critical point), 临界点坐标记为 $(\Delta t_c, \langle \Delta x^2 \rangle_c)$ 。

2.2 Hurst 指数特性

如图5所示, Hurst 指数取值的分段特性不因视觉反馈而改变: 两种视觉状态均为短期区间上, $H_s > 1/2$; 长期区间上, $H_l < 1/2$; 且短期区间上, H_s 在 AP、ML 方向及平面 PL 变化均不显著, 基本保持不



(a) 线性坐标、短期与长期区间扩散系数及临界点坐标



(b) 对数坐标及短期与长期区间 Hurst 指数

图4 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 与 Δt 关系曲线姿态参数计算示例

Fig. 4 Calculation of postural parameters for $\langle \Delta x^2 \rangle$ - Δt relationship (a) Linear coordinates, diffusion coefficients of short-term and long-term time intervals, and coordinates of critical point, (b) Logarithmic coordinates and Hurst exponents of short-term and long-term time intervals

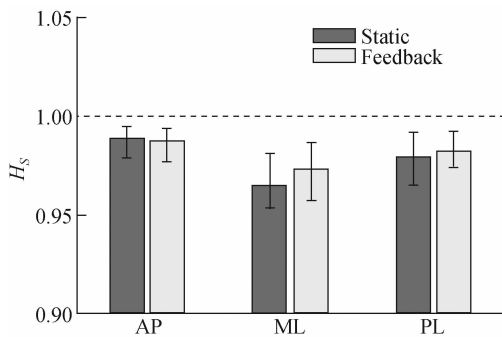
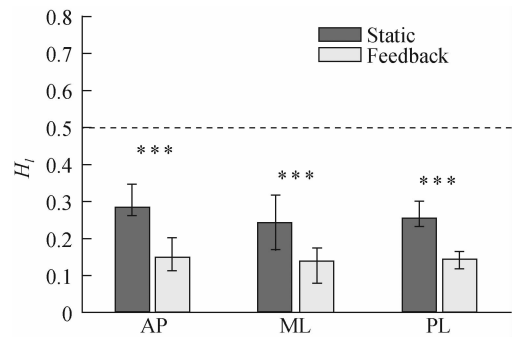
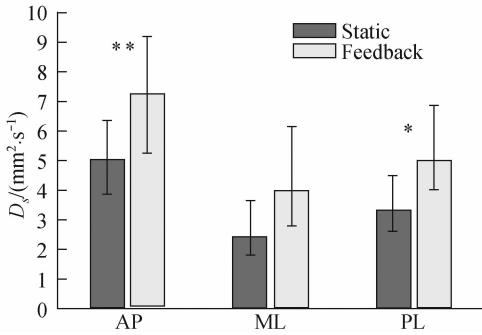
(a) H_s (b) H_l 图5 Hurst 指数对比结果 (***) $P < 0.001$

Fig. 5 Comparison of Hurst exponents

变;但长期区间上,视觉反馈状态下, H_1 在AP、ML方向及平面PL均显著减小将近一半。

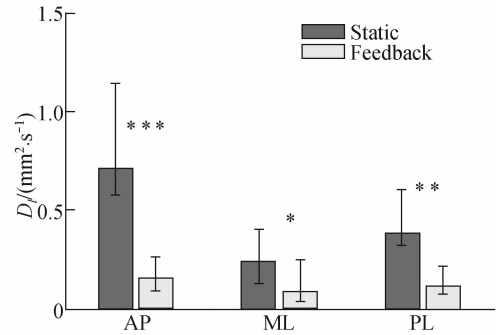
2.3 扩散系数特性

图6给出了两种视觉状态下短期和长期区间上



(a) D_s

扩散系数的变化情况:视觉反馈状态下, D_s 在AP方向及平面PL显著增大,但ML方向无显著变化(见图6(a));而 D_1 在AP、ML方向及平面PL均显著减小(见图6(b))。



(b) D_1

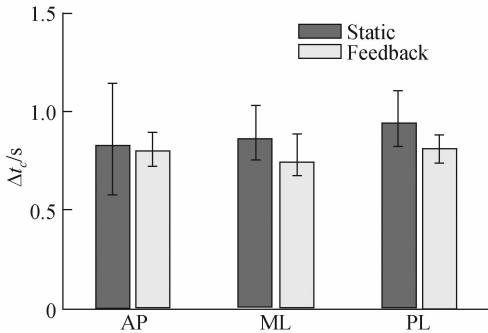
图6 扩散系数对比结果(* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$)

Fig. 6 Comparison of diffusion coefficients

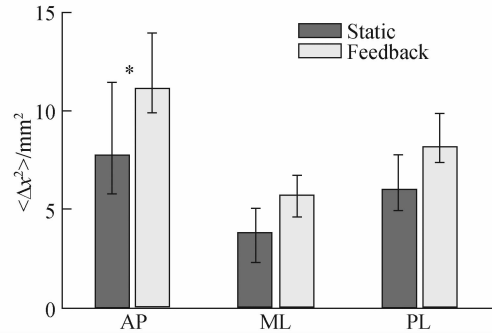
2.4 临界点坐标特性

如图7所示,与对照状态相比,视觉反馈状态下临界点坐标的变化不甚明显: Δt_c 在AP、ML方向及

平面PL均无显著改变,皆保持在1s左右; $\langle \Delta x^2 \rangle_c$ 在ML方向及平面PL上的增大均不显著,仅在AP方向显著变大。



(a) Δt_c



(b) $\langle \Delta x^2 \rangle_c$

图7 临界点坐标对比结果(* $P < 0.05$)

Fig. 7 Comparison of critical point coordinates

3 讨论

3.1 视觉反馈对人体姿态闭环控制的增强作用

Hurst指数与1/2的相对大小,指示了人体姿态控制的开环与闭环控制策略,并且Hurst指数对1/2的偏离程度还反映了开闭环控制的程度,偏离越远,表明控制作用越强。 H_s 在AP、ML方向及平面PL

方向变化均不显著,表明视觉反馈的引入并未显著影响人体姿态控制的开环特性;但视觉反馈却改变了人体姿态闭环控制的程度:视觉反馈状态下, H_1 在AP、ML方向及平面PL均显著减小,对1/2的偏离增大,表明视觉反馈状态下,人体姿态调节的闭环控制作用得到了有效增强。

上述视觉反馈对人体姿态控制的增强作用也可

由扩散系数的变化得到印证。扩散系数描述了人体姿态控制的随机特性,扩散系数越大,随机特性越明显,表明人体对自身姿态的控制作用越弱。视觉反馈状态下, D_1 在AP、ML方向及平面PL均显著减小,人体姿态摇摆的随机特性得到了明显抑制。这与视觉反馈对人体姿态闭环控制的增强作用表现一致:视觉反馈增强了人体姿态的闭环控制,从而减弱了人体姿态摇摆的随机性。

视觉反馈对人体姿态的镇定作用,已在许多相关研究^[12-13]及本文对姿态数据的统计分析中得到证实:视觉反馈使得人体姿态摇摆COP轨迹的统计特性得到一定程度的改善,如均方位移减小与95%置信椭圆面积减少等。本文视觉反馈对人体姿态闭环控制的增强作用,揭示了视觉反馈人体姿态镇定作用可能的产生机制。由姿态测量设备提供的反馈信息提高了人体对自身姿态状况的感知水平,一旦人体姿态发生偏离,偏离信息会被更及时、准确地反馈给姿态控制系统,促使姿态控制系统采用更为快速、有效的控制策略改善其对人体姿态的闭环控制。最终,这种由视觉反馈引起的姿态闭环控制作用的增强,使得人体在产生较大姿态偏离之前,便可恢复自身平衡,从而改善了COP轨迹的统计特性。

3.2 视觉反馈对人体姿态开、闭环控制策略转换特性的影响不显著

临界点标志了人体姿态控制由开环向闭环控制机制的转换。视觉反馈状态与对照状态相比,临界点坐标 Δt_c 在前后、左右方向及平面均无显著变化,保持在1s左右,与Collins等^[14-15]的研究结果一致; $\langle \Delta x^2 \rangle$ 。仅在前后方向显著增大,在左右方向与位移平面上虽有所增大,但变化不显著。这表明人体姿态开、闭环控制机制转换的时间与位移特性受视觉反馈的影响不大,视觉反馈对人体姿态控制的作用更多地体现在对闭环控制特性的影响上。

3.3 视觉反馈作用的方向差异

扩散系数 D_s 与 D_l 及临界点位移 $\langle \Delta x^2 \rangle$ 的实验结果表明,两种视觉状态下人体姿态摇摆特性的改变,在前后方向上比在左右方向上表现得更为明显。关于视觉反馈作用在前后与左右方向上的差异,Rougier等^[16]认为可能是视觉反馈方式与人体日常判定自身姿态摇摆状况的方式不一致引起的。

本文推断,观察到的视觉反馈姿态镇定作用的

方向差异,可能与实验中采用的站立方式及人体自身结构在前后与左右方向的差异有关。一方面,本文采用的两脚分离的双足站立姿态可以在左右方向上为人体静立站姿提供更稳定的支撑,而前后方向稳定性较差,因此在前后方向上,视觉反馈提供的人体姿态摇摆信息更能补偿人体自身感觉系统感知的不足,使得视觉反馈对人体姿态控制的改善作用也越明显;另一方面,人体静止站立状态下,踝关节调节主导了人体对自身姿态的控制,而该关节在前后方向调节能力更强,更能有效利用视觉反馈提供的姿态信息对该方向上的人体姿态摇摆进行有效控制。

4 结论

(1) 视觉反馈未改变人体姿态控制短期区间开环与长期区间闭环两种控制机制共同存在的特性,对人体姿态控制由开环向闭环控制策略转换的时间与位移特性也改变甚微。

(2) 视觉反馈对长期区间的闭环控制有显著的增强作用,使得长期区间COP位移的随机性显著下降,这可能是视觉反馈产生姿态镇定作用的机制。

(3) 视觉反馈的人体姿态控制影响存在方向差异,对前后方向上人体姿态摇摆的影响更为明显,这可能与采用的双足分离站姿和人体结构在前后与左右方向上的差异有关。

参考文献:

- [1] Cakrt O, Chovanec M, Funda T, et al. Exercise with visual feedback improves postural stability after vestibular schwannoma surgery [J]. *Eur Arch Otorhinolaryngol*, 2010, 267(9): 1355-1360.
- [2] Srivastava A, Taly AB, Gupta A, et al. Post-stroke balance training: Role of force platform with visual feedback technique [J]. *J Neurol Sci*, 2009, 287(1-2): 89-93.
- [3] Levy-Tzedek S, Krebs HI, Arle JE, et al. Rhythmic movement in Parkinson's disease: Effects of visual feedback and medication state [J]. *Exp Brain Res*, 2011, 211(2): 277-286.
- [4] Hagedorn DK, Holm E. Effects of traditional physical training and visual computer feedback training in frail elderly patients. A randomized intervention study [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2010, 46(2): 159-168.
- [5] Sayenko DG, Alekhina MI, Masani K, et al. Positive effect

- of balance training with visual feedback on standing balance abilities in people with incomplete spinal cord injury [J]. *Spinal Cord*, 2010, 48(12): 886-893.
- [6] Bisson E, Contant B, Sveistrup H, *et al.* Functional balance and dual-task reaction times in older adults are improved by virtual reality and biofeedback training [J]. *Cyberpsychol Behav*, 2007, 10(1): 16-23.
- [7] Cawsey RP, Chua R, Carpenter MG, *et al.* To what extent can increasing the magnification of visual feedback of the centre of pressure position change the control of quiet standing balance [J]. *Gait Posture*, 2009, 29(2): 280-284.
- [8] Pinsault N, Vuillerme N. The effects of scale display of visual feedback on postural control during quiet standing in healthy elderly subjects [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89: 1772-1774.
- [9] Collins JJ, De Luca CJ. Open-loop and closed-loop control of posture: A random-walk analysis of centre-of-pressure trajectories [J]. *Exp Brain Res*, 1993, 95(2): 308-318.
- [10] Tanaka H, Uetake T, Kuriki S, *et al.* Changes in center-of-pressure dynamics during upright standing related to decreased balance control in young adults: Fractional Brownian motion analysis [J]. *J Hum Ergol*, 2002, 31(1-2): 1-11.
- [11] Rougier PR. What insights can be gained when analyzing the resultant centre of pressure trajectory [J]. *Neurophysiol Clin*, 2008, 38(6): 363-373.
- [12] Halická Z, Lobotková J, Bučková K, *et al.* Age-related effect of visual biofeedback on human balance control [J]. *Act Nerv Super Rediviva*, 2011, 53(1): 67-71.
- [13] Vuillerme N, Bertrand R, Pinsault N. Postural effects of the scaled display of visual foot center of pressure feedback under different somatosensory conditions at the foot and the ankle [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2008, 89(10): 2034-2036.
- [14] Collins JJ, De Luca CJ. Random walking during quiet standing [J]. *Phys Rev Lett*, 1994, 73(5): 764-767.
- [15] Collins JJ, De Luca CJ. The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms [J]. *Exp Brain Res*, 1995, 103(1): 151-163.
- [16] Rougier P. Visual feedback induces opposite effects on elementary centre of gravity and centre of pressure minus centre of gravity motions in undisturbed upright stance [J]. *Clin Biomech*, 2003, 18(4): 341-349.

（上接第 443 页）

- Hao WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(2): 97-104.
- [8] 贾司光, 梁宏. 航天员舱外活动的工效学问题 [J]. *中华航空航天医学杂志*, 2001, 12(4): 246-249.
- [9] Hong L, Jia QX, Sun HX, *et al.* The study of an integer design and development of virtual human motion analysis software on VC platform [C]// 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Application. Singapore: [s. n.], 2008: 686-690.
- [10] 杨峰. 航天员舱外活动计算机仿真 [D]. 北京: 北京航空航天大学博士学位论文, 2003.
- [11] Yesil MS, Gudukbay U. Realistic rendering and animation of a multi-layered human body model [C]// Tenth International Conference on Information Visualization. London: [s. n.], 2006: 785-790.
- [12] Hamdouni A, Taibi N. Kane's formalism and lie group theory [J]. *Mech Res Commun*, 1998, 25(4): 385-393.