

基于 Fitts 定律的人体上肢运动功能评定方法^{*}

杨年峰¹ 王人成¹ 金德闻¹ 董 华¹ 黄昌华¹ 张 明²

摘要 目的: 探讨在临床医学和康复工程等领域中人体运动功能评定的有效方法及原理。方法: 基于 Fitts 定律, 参照代表动作执行情况某方面唯一特性的指标——执行度, 结合速度、能量等其它物理量, 提出了具有普遍意义的运动功能量化评定方法。选取人体上肢触点运动, 用 Vicon 系统对 5 名健康男性进行了上肢触点运动实验, 并通过一组运动功能评定指标, 对人体上肢触点运动功能进行了量化评定。结果及结论: 人体上肢运动是包含肌肉骨骼和神经系统的高冗余度的系统运动, 选取基于大系统性能理论的宏观特征作为评定指标对人体上肢运动功能进行量化评定是可行和现实的。鉴于人体结构的复杂性和运动的多样性, 在对不同动作的评定中, 各评定指标的使用必须进行相应的侧重和组合。

关键词 运动功能评定; 上肢触点运动; 难度指标; 执行指标

Evaluation method of human upper limb movement function based on Fitts' law YANG Nianfeng WANG Rencheng JIN Dewen, et al. // *Chinese Journal of Rehabilitation Medicine*, 2001, 16(6): 336—339

Abstract Objective: To evaluate the most effective method and principle of human movement function in clinical medicine and rehabilitation engineering et al. **Method:** Based on Fitts' Law and a characteristic index of movement performance-DOF (Dimensions Of Performance), an evaluation method was proposed. As an example the point-touching movement of upper limb performed by five healthy subjects, were experimentally investigated. All movements were recorded using a Vicon motion analysis system. A set of indices were used to evaluate the human upper limb movement function quantitatively. **Result and Conclusion:** The movements of human upper limb were high redundant systematic movements performed by muscles, bones and nerve system. It is practical to chose the macroscopical characters which based on big system capability theory, as the indices for the evaluation of human upper limb movement function. As the complexity of human limb structure and the variety of human movement, it is almost impossible to entirely describe a movement function in one or a few indices. Hence, in an evaluation practice, we may focus on some indices and other indices may be ignored.

Author's address Dept. of Precision Instruments Tsinghua University, Beijing, 100084

Key words movement function evaluation; point-touching movement of upper limb; index of difficulty; index of performance

康复学界早已认识到各种功能评定是康复医学和康复工程的基础, 康复医学同其他治疗医学的一个很大区别就是把功能障碍的评定作为重点^[1]。

人体运动功能康复评定大多数是基于病理的诊断和某种特定运动功能障碍的评定, 其评定依据、指标可分为 3 大类: ①如 Johnson 等^[2]关于单侧上肢运动功能的评定中采用的速度、加速度等常规参数; ②如 Ghika 等^[3]关于帕金森综合征的运动功能异常程度的量化评定中采用的肌肉收缩程度及其力学特性参数等较微观的肌肉运动单元的特征; ③基于大系统性能理论的宏观特征, 如 Fitts 在上肢运动研究中提出的 Fitts 定律(Fitts' law), 以及运动执行度指标(index of performance)概念^[4]。这些评定指标也在不同程度上反映了人们对人体运动机制和病理的认识程度。

对于人体运动功能的定量评定, 人们进行了很多尝试, 提出了各种方法。不过这些方法提出的评价指标大多具有经验色彩^[5]。Fischer 与 Kondraske 提出了代表动作执行情况某方面唯一特性的指标——执行度 DOP (dimensions of performance)^[6], 并尝试用一组执行度来描述运动动作, 从而找到具有普遍意义的运动功能描述方法。人体运动功能的定量评定方法取决于相关学科的研究进展。但现有定量评定方法还未能充分反映人们在人体生物运动控制机理方面的研究成果。

^{*} 国家自然科学基金重点基金(39930070)和重庆大学机械传动国家重点实验室访问学者基金资助课题。

1 清华大学精密仪器与机械学系, 北京, 100084

2 香港理工大学康复科技中心

收稿日期: 2001-09-15

基于 Fitts 定律并参照 DOP, 结合其它物理量, 本文尝试用一组具有普遍意义的运动功能评定指标对人体上肢的动作进行运动功能评定。由于人体上肢的结构极其复杂, 而且相对于下肢运动, 人体上肢的运动复杂多样, 缺乏规律性和类似步态周期的标准动作(standard activity)^[7]。因此从实验观察的角度出发, 本文选择了日常生活动作(activities of daily living, ADL)中出现频率最高^[8]的一个较简单、基本的动作-上肢触点运动作为研究对象, 并限制动作的起始和终止位置与肩部在同一矢状面内。

1 方法

1.1 上肢触点动作实验

触点动作任务的定义如图 1 所示, 受试者的上肢从起始位置出发, 以他们认为最习惯的动作去触及终点目标。初始位置和终止位置与受试者的肩部在同一矢状面内。

图 2 显示的是矢状面内的上肢触点运动参数的定义: P_s 为肩关节中心, P_{ini} 为上肢末端的起始位置, P_{ter} 为上肢末端的目标位置, θ_i 为上肢触点运动的起始角度, θ_t 为上肢触点运动的终止角度。



图 1 上肢触点运动任务定义

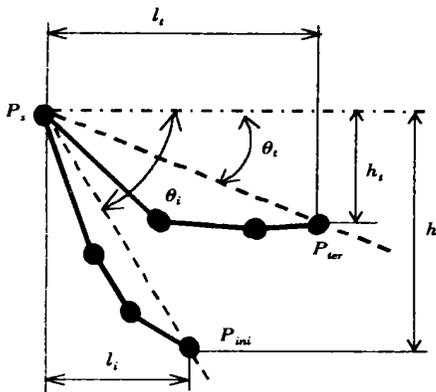


图 2 上肢触点运动参数定义

者、不同动作进行测试。由于个体差异, 不同受试者具有不同的生理参数, 因此需要对上肢的触点运动进行统一规范。

我们假设, 如果满足以下 3 个条件, 则两个触点运动被认为是相同的。① 各运动具有相同的 θ_i , θ_t 和 $(l_t - l_i)/l_0$ 或 $(h_t - h_i)/l_0$, (l_0 为上肢长度); ② 上肢各关节(肩、肘和腕)在起始和终止位置都处于自然状态; ③ 在运动过程中, 受试者在保证运动精度的前提下尽可能快地完成动作。本实验的受试者为 5 名健康的男性青年, 每个受试者要求完成 3 种不同水平跨度的触点运动, 即从相同的起始位置出发, 目标位置具有相同的高度和不同的水平跨度。每次动作受试者重复 10 次以上。动作的定义如表 1 所示。

表 1 人体上肢触点运动参数

触点动作	$\theta_i(^{\circ})$	$\theta_t(^{\circ})$	$(l_t - l_i)/l_0$
远距离	50	17	0.33
中距离	50	21	0.30
近距离	50	27	0.27

1.2 运动功能评定指标

本文提出以下 4 类用于上肢运动功能评定的指标:

1.2.1 综合指标: Fitts 在 1954 年从 Shannon 的信息理论导出了上肢运动中速度、加速度、运动幅度, 以及目标物尺寸间的数学关系, 这便是后来广为人知的 Fitts 定律。Fitts 在定律中提出了一维平移运动的难度指标 I_d (index of difficulty) 与执行指标 I_p (index of performance), 其定义为^[4]:

$$I_d = -\log_2(W/2A) \quad I_p = -\frac{1}{t_m} \log_2(W/2A)$$

其中 A 为运动幅度, W 为目标宽度, t_m 为运动时间。

1994 年, Kondraske 将 Fitts 定律进一步推广到角度运动中, 提出了角度运动难度指标与执行指标为^[9]:

$$I_d^{\theta} = -\log_2(\theta_w/2\theta_A) \quad I_p^{\theta} = -\frac{1}{t_m} \log_2(\theta_w/2\theta_A)$$

其中 θ_A 为角度运动的幅度, θ_w 为角度运动的目标宽度, t_m 为运动时间。

在这里, 本文结合上肢运动的具体情况, 将 Fitts 定律推广到二维极坐标下的上肢触点运动中, 得到如下难度指标与执行指标:

为进行实验结果的比较、分析, 需要对不同受试

$$I_d^o = -\log_2(\rho_W/2\rho_A) \quad I_p^o = -\frac{1}{t_m} \log_2(\rho_W/2\rho_A)$$

$$I_d^\theta = -\log_2(\theta_W/2\theta_A) \quad I_p^\theta = -\frac{1}{t_m} \log_2(\theta_W/2\theta_A)$$

其中 I_d^o, I_d^θ 表示动作难易程度, I_p^o, I_p^θ 表示完成动作的能力, ρ_A, θ_A 为上肢运动幅度与角度, ρ_W, θ_W 为目标宽度(见图3), t_m 为上肢触点运动时间。

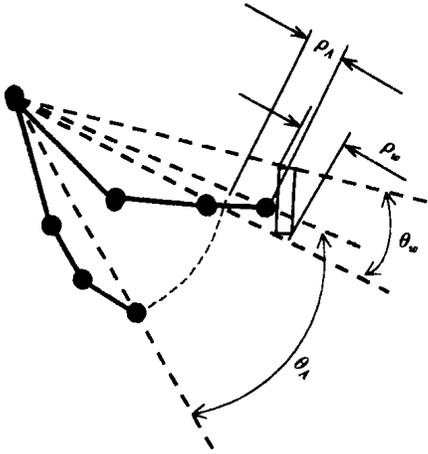


图3 上肢触点运动幅度和角度定义

1.2.2 速度与时间指标: 速度是评价运动功能的常用指标之一, \bar{v} 取为各时刻瞬时速度的均值, M_v 取

为最大瞬时速度 $\text{Max}(v)$ 。时间指标 T 为完成运动所用时间。

1.2.3 能量指标: 取运动动作的总动能 E_T 和最大瞬时能量 $M_{ip} = \text{Max}(E_k)$ 作为能量指标。

1.2.4 平顺性指标: 平顺性(smoothness)反映运动的平滑程度, 瞬时平顺性定义为^[6]:

$$S = \frac{1}{|j_x| + |j_y| + |j_z|}$$

其中 j 为加速度变化率即位移的3次导数。平顺性指标 S 取为各时刻瞬时 S 的均值, M_s 取为最大平顺性 $\text{Max}(S)$ 。

2 结果

表2所示为同一受试者3种不同动作的运动功能评定指标。表3所示为同一受试者在不同熟练程度下执行动作任务的运动功能评定指标。所谓“不熟练”是指受试者第一次执行该动作, “较熟练”是指在练习了3次以后(第4次)执行该动作, “很熟练”是指再练习多次(5次以上)后执行该动作。表4所示为同一受试者不同疲劳状态下执行动作任务的运动功能评定指标。

表2 相同受试者、不同动作的上肢触点运动功能评定指标

触点运动	I_d^o	I_p^o	I_d^θ	I_p^θ	$T(s)$	\bar{v} ($mm \cdot s^{-1}$)	M_v ($mm \cdot s^{-1}$)	S ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	M_s ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	E_T ($N \cdot m$)	M_{ip} ($N \cdot m$)
远距离	4.9321	4.5178	4.4594	4.0848	1.0917	483.1098	1410	25.5924	34.8620	25.905	0.99399
中距离	4.5926	4.5548	4.2730	4.2378	1.0083	467.7477	1357.3	47.7170	76.4332	22.962	0.92109
近距离	4.0753	4.4057	3.9386	4.2579	0.9250	471.3628	1122.1	35.1571	50.3752	18.178	0.62954

表3 相同受试者不同熟练程度的上肢触点运动功能评定指标

触点运动	I_d^o	I_p^o	I_d^θ	I_p^θ	$T(s)$	\bar{v} ($mm \cdot s^{-1}$)	M_v ($mm \cdot s^{-1}$)	S ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	M_s ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	E_T ($N \cdot m$)	M_{ip} ($N \cdot m$)
不熟练	4.5926	3.9086	4.2730	3.6366	1.1750	455.6532	1018.2	23.2624	51.2654	24.325	0.51839
较熟练	4.5926	4.2068	4.2730	3.9141	1.0917	462.3314	1263.4	37.6527	57.4565	23.554	0.79809
很熟练	4.5926	4.5548	4.2730	4.2378	1.0083	467.7477	1357.3	47.7170	76.4332	22.962	0.92109

表4 相同受试者不同疲劳程度下的上肢触点运动功能评定指标

触点运动	I_d^o	I_p^o	I_d^θ	I_p^θ	$T(s)$	\bar{v} ($mm \cdot s^{-1}$)	M_v ($mm \cdot s^{-1}$)	S ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	M_s ($s^9 \cdot mm^{-3}$)	E_T ($N \cdot m$)	M_{ip} ($N \cdot m$)
良好状态	4.5926	4.5548	4.2730	4.2378	1.0083	467.7477	1357.3	47.7170	76.4332	22.962	0.92109
疲劳状态	4.5926	4.0524	4.2730	3.7704	1.1333	448.5646	1025.3	45.4456	69.2455	23.464	0.52561

3 讨论

由于3种不同动作的目标具有相同的尺寸, 因此具有相同的运动精度。比较表2中各参数可看出: 随着水平跨度的逐渐减小, 动作执行时间也相应减小。动作难度与水平跨度对应, 随着动作难度的降低(水平跨度逐渐减小), 难度指标下降。执行度

指标相应上升, 显示对动作的执行能力不断提高。由于腕关节在触点运动过程中的运动幅度相对肩关节和肘关节来说较小, 手的长度相对于前臂和上臂也较小, 因此在上肢3个主要关节中, 对执行度指标 I_p^o 影响最大的是肩关节的执行能力, 对执行度指标 I_p^θ 影响最大的是肘关节的执行能力。最大瞬时速度

指标 M_v 也随水平跨度的减小而减小。由于触点运动的起始和终止的状态都是静止, 因此在起始和终止位置的速度都为零。上肢在运动过程中从零速度开始加速, 在到达目标之前减速直到重新回到零。我们对受试者的要求是在保证运动精度和自然动作的前提下尽可能得快, 因此最大瞬时加速度是对“尽可能快”特性的反映。运动幅度越大, 加速的过程越长, 所能达到的瞬时速度自然也就越大。最大瞬时效能 M_{ip} 与最大瞬时速度相对应。考虑到是同一受试者, 因此在能量的计算过程中质量 m 都取为 1。总能量 E_T 反映的是整个运动过程能量消耗情况。平顺性指标 S 反映的不仅是运动的平滑程度, 也是人体对该运动稳定性的控制能力。平顺度越大, 运动越平滑, 运动的稳定性越好。影响平顺性的因素很多, 包括运动任务和人体生理因素, 因此表 2 中平顺性指标并不简单地随动作难度的减小而增大。

影响运动功能的因素很多, 如运动障碍、关节受损、肌肉疼痛、神经麻痹等都会影响到动作的执行。表 3 和表 4 反映了熟练状态和身体疲劳程度对运动功能的影响。从表 3 中的数据比较可以看出, 对于同一动作任务的执行, 随着熟练程度的提高, 动作完成时间 T 不断缩短, 执行度指标不断提高, 平顺性指标也相应提高, 表明人对动作的控制能力加强。同时总体能耗也下降, 也反映出运动稳定性的提高。从表 4 可以看出, 虽然平顺性指标变化不大, 即人体对动作的控制能力、动作的稳定性变化不大, 但在疲劳状态下运动时间增加, 执行度指标有明显的下降, 显示出动作执行能力的下滑。这与受试者自身的感受是相符合的。

人体的运动是包含肌肉骨骼和神经系统的高冗余度的系统运动, 虽然某一部分的异常会得到其他部分的补偿, 但总会或多或少反映在动作的最后执行上。执行度指标的异常在某种程度上反映相应关节的异常或运动障碍的存在。因此, 本文提出的评定指标可以作为量化的评定方式去评定肢体的运动功能, 作为临床运动障碍病理诊断的依据。

人体运动功能的特性体现在各个方面, 由于人体本身的复杂性及个体的独立性, 要完全反映某种运动的特性几乎是不可能的。因此, 基于不同的应用目的, 在对具体动作进行运动功能评定时, 对各个评定指标的使用必然会有所侧重。例如对于偏瘫患者的评定诊断来说, 主要关注的是运动的宏观特性, 因此在诸多评价指标中, 偏重能反映运动整体特点的执行度指标和平顺性指标。

本文提出的各个评定指标通常并不是独立使用的。对评定指标的取舍、侧重和联合使用的依据或是对某类运动动作的生理机理的认识, 或是对某类运动动作的统计分析。这种指标的联合使用与传统的经验、直观评定相比更为客观、科学, 更易于对运动功能作更深入的探讨。

参考文献

- [1] 卓大宏. 中国康复医学[M]. 北京: 华夏出版社, 1990.
- [2] Johnson LM, Randall MJ, et al. Development of a clinical assessment of quality of movement for unilateral upper-limb function[J]. *Dev. Med. & Child Neurol.*, 1994, 36: 965-973.
- [3] Ghika J, Wiegner AW, et al. Portable system for quantifying motor abnormalities in Parkinson's disease[J]. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1993, 40(3): 276-283.
- [4] Fitts PM. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement[J]. *J. Exp. Psychol.*, 1954, 47: 381-391.
- [5] 杨年峰, 黄昌华, 王人成, 等. 食指触点的运动质量评价[J]. *现代康复*, 2000, 4(5): 656-658.
- [6] Fischer CA, Kondraske GV. A new approach to human motion quality measurement[J]. *Proceedings - 19th International Conference - IEEE/EMBS*, 1997: 1701-1704.
- [7] Anglin C, Wyss UP. Review of arm motion analyses[J]. *Proc Instn Mech Engrs Part H*, 2000, 214: 541-555.
- [8] Romilly DP, Anglin C, Gosine RG, Hershler C, et al. A functional task analysis and motion simulation for the development of a powered upper-limb orthosis[J]. *IEEE Trans. On Rehabil. Engng.*, 1994, 2(3): 119-128.
- [9] Kondraske GV. Angular motion Fitts' law for human performance modeling and prediction[J]. *Proceedings -16th International Conference - IEEE/EMBS*, 1994: 307-308.