

基于运动捕捉仪的人体上肢运动轨迹参数的测量与分析*

王胤杰, 沈林勇*, 章亚男

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:针对人体上肢运动的轨迹参数和方程模型复杂、计算量庞大的问题,提出了一种新型的测量上肢运动轨迹方法。首先对人体上肢运动模型进行了重新分析与简化,根据人体上肢运动特点设计了一组实验,其中包含单关节运动实验、多关节协同运动实验及任务实验;通过 NDI 运动捕捉仪系统采集了实验者的上肢基本运动数据;将实验数据中的离散点用曲线拟合并展开后,得到了各组实验中各关节的周期性轨迹方程;运用 ADAMS 进行了建模及运动仿真,以验证拟合轨迹方程的正确性。研究表明,该方法能有效测量人体上肢运动参数,其结果可供上肢康复训练机器人的运动轨迹控制与上肢运动功能评价时参考。

关键词:上肢运动;康复训练;运动参数;运动捕捉仪

中图分类号:R318;TP242;TH73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)07-0841-05

Measurements and analysis of upper-limb motion parameters based on motion capture

WANG Yin-jie, SHEN Lin-yong, ZHANG Ya-nan

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Due to the complexity of modeling and the huge amount of calculation, a new method was presented to measure and analysis upper-limb motion parameters. The modeling of upper-limb motion was re-analyzed and simplified. Series of experiments were designed based on the characteristics of upper-limb motion, which included simple-joint motion experiment, multi-joint motion experiment and task experiment. The datas of upper-limb motion from experiment objects were collected by NDI motion capture. The discrete points in datas were fitted by polynomials, and the results were expanded to get periodic functions. ADAMS was used to model and simulate in order to verify the validity of the fitting trajectory functions. The research results indicate that the new method is effective in measuring the parameters of upper limb motion, and the results can be used as reference trajectories in control with upper limb rehabilitative robots and evaluation of upper-limb movement function.

Key words: upper-limb motion; rehabilitation training; motion parameters; motion capture

0 引言

目前,上肢康复机器人^[1]以其长期、稳定重复训练,精确、客观测定训练与运动参数以及可提供实时反馈、远程训练等功能,在康复领域得到了患者和医护人

员的认可。当前已有 MIT-MANUS^[2]、AMRin^[3]、MIME^[4]等多种康复训练机器人,可代替理疗师来驱动病患上肢进行康复运动。在此基础上,通过将患者上肢按照正常运动轨迹进行重复驱动,即能达到“运动再学习”的效果。研究者以点到点(point to point)运动为研究对象,根据驱动手臂运动的肌肉力的变化,

收稿日期:2011-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975165);上海市学科带头人计划资助项目(10XD1401900);上海市高校创新团队资助项目(未提供)

作者简介:王胤杰(1984-),男,浙江宁波人,主要从事医疗康复机器人方面的研究。E-mail: mislandel@hotmail.com

通信联系人:沈林勇,男,副教授,硕士生导师。E-mail: shenlycn@163.com

提出一组优化原则,用于理论上预测上肢运动的优化轨迹^[5]。Nelson^[6]提出了使用目标函数来预测单关节上肢的复合运动及多关节上肢平面运动的优化轨迹,大都取得了与实验相吻合的仿真结果。Uno 等^[7]提出最小肌肉张力变化模型,以“能量消耗最少”为原则,来预测人体上肢平面运动的轨迹,并通过仿真得到,手端的运动特征与优化的特征相符的结论。在国内,杨义勇等人^[8]建立了神经兴奋-肘关节肌肉收缩的动力学模型,利用最优控制方法计算肘关节快速屈伸和旋前、旋后的符合运动,计算结果与实验结果在肌肉力矩、肌电信号等方面的参数相吻合。此外,清华大学的UECM 机器人也实现了轨迹定量试验,通过患肢末端的运动轨迹与给定轨迹相比较,与 Fugl- Meyer^[9]评价标准相结合,得到患者上肢恢复情况的量化值^[10]。

以上研究得到的运动轨迹中,有些仅仅针对于单关节运动,有些是多关节单一平面运动,与上肢的正常运动大范围与灵活程度相比,局限较大,且数学模型复杂,计算量大。而诸如 MIT-MANUS、UECM 类型的末端驱动机器人在进行康复运动时,只能规划其末端的运动轨迹,无法对患肢的每个关节进行单独有效的驱动,对于康复初期病患上肢的联合反应不能进行有效的约束和矫正。

本研究介绍一种基于主动发光标志点三维运动捕捉仪的上肢运动轨迹测量方法。该方法根据上肢功能正常实验者的运动数据来计算有效的上肢基本运动轨迹。同时设定不同的任务场景,将每个关节的运动数据加以复合后,经过基本的数据处理,得到与日常活动中相仿的上肢运动轨迹,以作为上肢康复机器人进行上肢被动训练的驱动研究参考。

1 实验模型结构

正常人体上肢运动共有 7 个自由度:肩关节屈伸、肘关节屈伸、腕关节屈伸、肩关节旋前旋后、腕关节旋前旋后、肩关节外展内收、腕关节掌屈掌伸。康复训练针对上肢运动的主要运动自由度,对于本身运动幅度较小、对上肢整体运动影响不大的自由度可予以忽略,且自由度的增加也会加大康复机器人的制作成本及复杂程度。该实验将上肢运动简化成 4 个运动自由度的组合(上肢运动学模型如图 1 所示),分别为:肩关节的屈伸、肩关节的外展与内收,肘关节的屈伸、腕关节的旋前与旋后^[11]。根据 D-H 法则^[12],本研究规定各关节的旋转轴线为坐标系的 Z 轴,两坐标原点之间的连杆方向为 X 轴,并分别建立了 4 个旋转关节的坐标系。

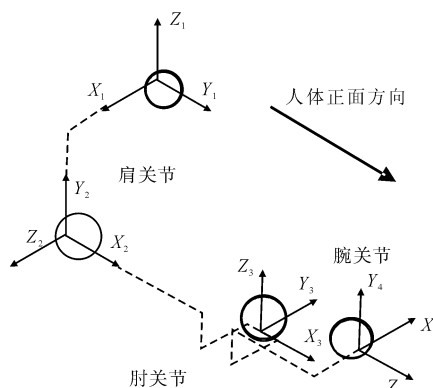


图 1 上肢运动学模型(右手)

2 实验对象、设备与原理

2.1 实验对象

实验对象为 5 人,平均年龄(25 ± 2)岁,其中女性 2 人,男性 3 人,上肢均无运动功能障碍。

2.2 实验设备

该实验采用的主要设备为 NDI 运动捕捉仪,采用 Optotrak 三维运动测量系统^[13]。该仪器捕捉各个发光 Marker 点的空间位置变化来测量各运动数据。此外,还需使用 PC 及其他实验辅助道具。

2.3 实验原理

运动模型中共有 3 个主要运动关节,其中肘关节与腕关节为单自由度。而对于类球铰的肩关节,本研究在分析运动时,将空间运动分解到各平面上分别进行解析。以人体正前方为 Z 轴正方向,竖直向下为 Y 轴正方向建立参考坐标系,坐标零点及三轴方向与 NDI 运动捕捉仪的零点和三轴方向重合。

Optotrak 三维运动测量系统主要由传感器,SCU 控制单元、Marker 点、PC 及连线组成。实验系统构成如图 2 所示,试验者在手臂上绑定主要的测量 Marker 点,加上若干用于辅助定位的 Marker 点。传感器安放在实验者对侧,以实时记录实验中各 Marker 点位置的变化,Marker1 ~ Marker9 的序号如图 3 所示。数据结果为 Marker 点的三轴坐标 $Mi_x, Mi_y, Mi_z (i = 1 \sim 9)$ 。

2.3.1 肩部屈伸、外展内收关节角度测量

本研究在人体上臂上固定 2 个 Marker 点,使 Marker7 和 Marker9 成为一个空间运动矢量:

$$\mathbf{Vec} = \{M9_x - M8_x, M9_y - M8_y, M9_z - M8_z\} \quad (1)$$

在基准处固定 Marker10 和 Marker11,构成基准向量:

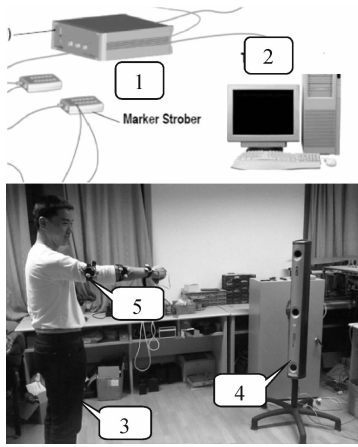


图2 实验系统构成

(1)—SCU;(2)—PC;(3)—试验对象;(4)—传感器;
(5)—Marker点

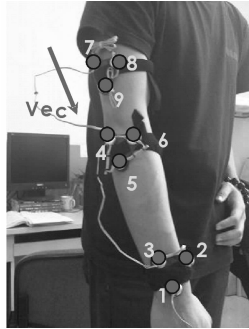


图3 上肢运动测量 Marker 点布置方案

$$\mathbf{Vec}_{std} = \{M11_x - M10_x, M11_y - M10_y, M11_z - M10_z\} \quad (2)$$

本研究将在空间运动的矢量投影在矢状面上(如图3所示),对应肩关节的外展内收运动;投影在和水平面上,对应肩关节的屈伸运动,即分解为 $\mathbf{Vec}_{yz}$ 和 $\mathbf{Vec}_{xz}$ 。相应地,将 $\mathbf{Vec}_{std}$ 分解为 $\mathbf{Vec}_{std_{yz}}$ 和 $\mathbf{Vec}_{std_{xz}}$ 。其中:

$$\mathbf{Vec}_{yz} = \{M9_y - M8_y, M9_z - M8_z\} \quad (3)$$

$$\mathbf{Vec}_{xz} = \{M9_x - M8_x, M9_z - M8_z\} \quad (4)$$

$$\mathbf{Vec}_{std_{yz}} = \{M11_y - M10_y, M11_z - M10_z\} \quad (5)$$

$$\mathbf{Vec}_{std_{xz}} = \{M11_x - M10_x, M11_z - M10_z\} \quad (6)$$

于是,肩关节屈伸角度和肩关节外展内收角度为:

$$\theta_{flex-ext} = \arccos \frac{\mathbf{Vec}_{yz} \cdot \mathbf{Vec}_{std_{yz}}}{|\mathbf{Vec}_{yz}| \times |\mathbf{Vec}_{std_{yz}}|} \quad (7)$$

$$\theta_{abd-add} = \arccos \frac{\mathbf{Vec}_{xz} \cdot \mathbf{Vec}_{std_{xz}}}{|\mathbf{Vec}_{xz}| \times |\mathbf{Vec}_{std_{xz}}|} \quad (8)$$

2.3.2 肘关节角度测量

测量肘关节旋转角度的 Marker 点布置如图4(a)所示,共6个 Marker 点,分别在两个体节处形成平面。其中 Marker7, Marker8, Marker9 构成平面 P_{upper} , 其法

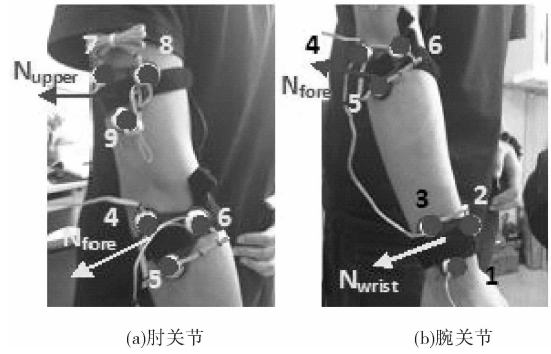


图4 肘关节及腕关节 Marker 点布置方式

向量为 N_{upper} ; Marker4, Marker5, Marker6 构成平面 P_{fore} , 其法向量为 N_{fore} 。两个法向量之间的夹角即肘关节屈伸的旋转角度:

$$\theta_{abd-add} = \arccos \frac{\mathbf{Vec}_{xz} \cdot \mathbf{Vec}_{std_{xz}}}{|\mathbf{Vec}_{xz}| \times |\mathbf{Vec}_{std_{xz}}|} \quad (9)$$

2.3.3 腕关节角度测量

测量腕关节旋转角度的 Marker 点布置如图4(b)所示,共6个 Marker 点。其中 Marker1, Marker2, Marker3 构成平面 P_{wrist} , 其法向量为 N_{wrist} 。腕关节旋内旋外的旋转角度即为:

$$\theta_{wrist} = \arccos \frac{N_{wrist} \cdot N_{fore}}{|N_{wrist}| \times |N_{fore}|} \quad (10)$$

2.4 实验设计

人体日常生活运动 (Activities of Daily Living, ADL) 指多数人为了独立完成日常生活活动,每天必须反复进行的、最基本的活动,包括穿衣、进食、个人卫生等基本动作和技巧。该思想方法被广泛应用于运动障碍评估、损伤评价、康复评价及关节灵活度等方面的评价^[14]。人体上肢运动具有随意性和多变性,且不像步态行走一样具有标准和规律,故需对人体上肢的日常活动进行合理的简化和归纳,来设计若干实验阶段。本研究将实验分为以下几个阶段:

第1阶段:单关节运动。包括腕关节旋内旋外、肘关节屈伸、肩关节屈伸、肩关节外展内收。这4个动作是该上肢模型的基本动作,也是所有上肢运动的构成元素。实验数据作为单关节连续被动运动的参考之用。

第2阶段:上肢范围运动。一些日常生活中所涉及到的动作,如吃饭、刷牙、移动物体等都需要上肢对某一目标在一定范围内进行触摸、握持等动作,故使上肢在其运动范围内进行正常运动是康复训练的重要目标。该次实验将人体本身作为参考,选定了上肢(右臂)康复运动的范围:上一右手触摸额前;左一右手触摸左侧肩部;右一右手触摸右侧肩部;左下一右手触摸

左侧腰部;右下一右手触摸右侧腰部。本研究以这 5 点作为范围的运动目标来测量上肢的运动参数。

第 3 阶段:任务实验。康复后期,患者已经能够完成各大运动关节的基本运动。此时需要进行较精细的多关节协作任务实验,来帮助患者进一步进行康复。该实验设计两款轨迹跟踪任务,患者按照实验桌上简单的几何图形(三角形和四边形)来绘制轨迹。实验中保持实验者上身竖直,座椅与桌子间距离固定。

3 实验结果与分析

实验数据为多人多组结果,本研究取其中一段周期和若干特征点,利用插值、拟合等方法得到各关节的角度变化轨迹。

3.1 单关节试验

在第 1 阶段单关节运动试验中,关节角度变化呈现明显的周期性,且其轨迹接近于正弦函数。肘关节屈伸角度变换曲线的拟合过程如图 5 所示,本研究取 2 s 为一个运动周期,采集各波峰、波谷的数值后得到一个以正弦函数为基准的拟合曲线来作为该组运动的标准运动轨迹曲线。原曲线波谷处产生的毛刺是由于运动到极限位置时,肢体因制动产生的振动所致,本研究将其视作圆滑轨迹处理。最终得到的轨迹方程为:

$$\theta_{\text{肩内外}} = 0.3073 \times \sin(\pi(t + 200)/125) + 1.10604 \quad (11)$$

式中: t —时间,单位 1.0×10^{-2} s。

其他各单关节角度轨迹曲线以此类推。

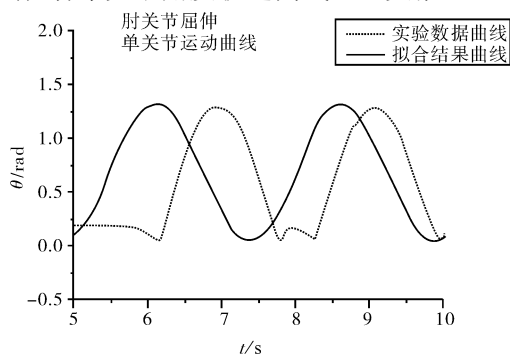
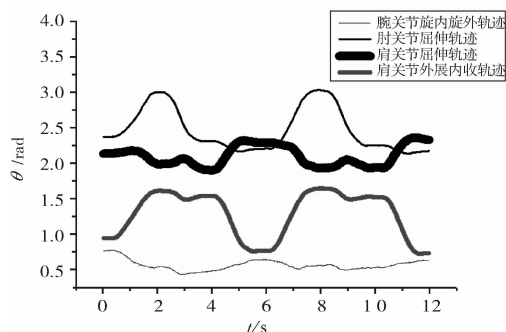


图 5 肘关节屈伸单关节角度变化曲线拟合过程

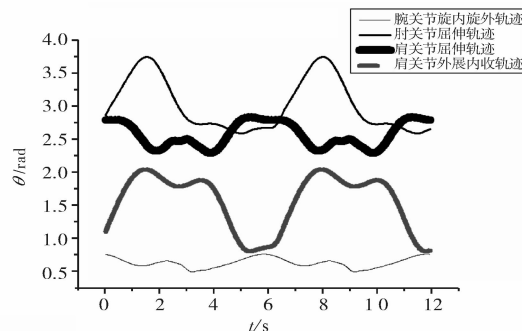
3.2 多关节试验

第 2、3 阶段为多关节协同运动。本研究将各关节的运动数据在同一图表中标出。其中,第 2 阶段上肢基本分解运动的结果曲线也为类正弦曲线,处理方式与第 1 阶段相同。第 2 阶段任务实验阶段中各关节运动轨迹曲线较复杂,如图 6(a) 所示。首先,本研究以肩关节屈伸为例,根据图形特征采集若干特征点的坐标(t_i, θ_i) (i 为特征点数量),再用 10 次多项式将曲线重新拟合,得到方程:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{屈伸}} = & -0.861 \sin(0.00967t - 80.93) - \\ & 0.00254 \sin(0.0772t - 710.3) + \\ & 0.00742 \cos(0.0484t - 440.7) - \\ & 0.0885 \sin(0.0193t - 170.8) - \\ & 0.146 \cos(0.0193t - 170.8) + \\ & 0.00132 \sin(0.087t - 800.3) - \\ & 0.00194 \cos(0.106t - 980.0) - \\ & 0.0000543 \sin(0.09670t - 890.3) - \\ & 0.00994 \cos(0.0386t - 350.7) + \\ & 0.000132 \cos(0.0675t - 620.4) + \\ & 0.00119 \cos(0.0772t - 710.3) - \\ & 0.00721 \sin(0.0581t - 530.6) + \\ & 0.00435 \sin(0.0675t - 620.4) - \\ & 0.0408 \cos(0.029t - 260.8) - \\ & 0.00286 \cos(0.0581t - 530.6) - \\ & 0.532 \cos(0.00967t - 80.93) + \\ & 0.0112 \sin(0.0484t - 440.7) + \\ & 0.00188 \cos(0.116t - 1070) - \\ & 0.00174 \cos(0.087t - 800.3) + \\ & 0.00194 \cos(0.0967t - 890.3) + \\ & 20.46 + 0.000317 \sin(0.116t - 1070) + \\ & 0.00447 \sin(0.029t - 260.8) - \\ & 0.0147(\sin 0.0386t - 350.7) \end{aligned} \quad (12)$$



(a) 三角形轨迹多关节运动实验曲线



(b) 三角形轨迹多关节运动拟合曲线

图 6 三角形轨迹多关节运动实验曲线与拟合曲线

本研究将其用傅里叶多项式在全领域展开后,得到如图 6(b) 所示的完整的轨迹曲线及其方程。其他

关节依此类推。

3.3 仿真验证

利用 ADAMS 建立的 3 杆简易上肢模型如图 7 所示。本研究将上述得到的各拟合轨迹方程加载至各关节的驱动中加以验证。

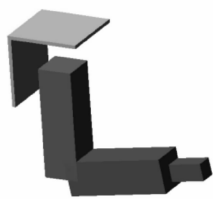


图7 上肢仿真模型

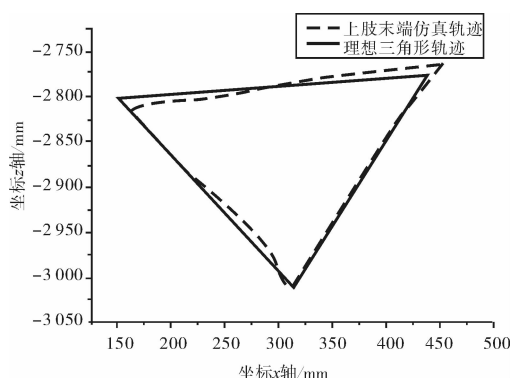


图8 三角形轨迹任务实验仿真

三角形轨迹任务实验仿真如图 8 所示。仿真结果表明,各个方程均符合上肢的运动规律,运动频率适当,峰值过渡平缓,可以作为上肢关节驱动的参考。图 8 中的离散点为任务实验的末端轨迹,实线为理想轨迹,两种轨迹基本吻合,证明拟合关节角度符合实际的运动情况。

4 结束语

上肢关节运动参数是上肢康复运动的一个重要依据,但相比于下肢运动,上肢运动的相对范围更大,运动自由度多,所需完成的任务更为复杂多样,同一个人完成同一个动作时,关节的运动参数也不可能完全相同,不利于标准运动轨迹的设计与规划的因素较多。

本研究利用 NDI 运动捕捉设备产生的上肢运动数据来制定运动轨迹,相较于使用数学、力学的推导方法更为直观有效。实验结果经过特征点拟合、多项式拟合、傅里叶展开后,可得到一组具有明显周期性的上肢关节角度拟合变化曲线,其中包含 4 组单关节运动,5 组范围运动以及 2 组任务实验。经过软件仿真后,证明所拟合的曲线与实际运动轨迹基本吻合,仿真轨迹与理想轨迹最大误差为 6.84%,根据康复科医师意见,可将其作为上肢康复机器人的运动参考轨迹。

仿真误差主要由实验者的运动误差及函数拟合误差造成,今后的研究中可结合康复机器人传感器构成反馈系统,实现轨迹的自修正,从而进一步完善上肢运动轨迹方程。

参考文献 (References):

- [1] 李会军,宋爱国. 上肢康复训练机器人的研究进展及前景[J]. 机器人技术与应用, 2006(4): 32-36.
- [2] HOGAN N, KREBS H I, CHARNNARONG J, et al. MIT-MANUS: A Workstation for Manual Therapy and Training I [C]// IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, Massachusetts Institute of Technology, 1992: 161-165.
- [3] NEF T, MIHELJ M, COLOMBO G, et al. ARMin-Robot for Rehabilitation of the Upper Extremities [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006: 3152-3157.
- [4] LUM P S, BURGAR C G, SHOR P C. Evidence for improved muscle activation patterns after retraining of reaching movements with the MIME robotic system in subjects with post-stroke hemiparesis [J]. **IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering**, 2004, 12 (2): 186-194.
- [5] 孙鹏伟,王士敏,王 琪. 多关节人体上肢运动的优化轨迹预测[J]. 力学学报, 2010, 42(3): 506-511.
- [6] NELSON W L. Physical principles for economies of skilled movements [J]. **Biological Cybernetics**, 1983(46): 135-147.
- [7] UNO Y, KAWATO M, SUZUKI R. Formation and control of optimal trajectories in human multijoint arm movement [J]. **Biological Cybernetics**, 1989, 6(12): 89-101.
- [8] 杨义勇,王人成,贾晓红. 人体肘关节复合运动的建模及协调控制 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(5): 653-656.
- [9] HARWIN W S, LOUREIRO R C V. Analysis of the Fugl-Meyer Outcome Measures Assessing the Effectiveness of Robot-Mediated Stroke Therapy [C]// Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics. Noordwijk, The Netherlands: [s. n.], 2007: 729-735.
- [10] 谢 群. 机器人辅助上肢康复机器人训练的量化评价方法研究 [D]. 北京: 清华大学精密仪器与机械学系, 2010: 72-99.
- [11] 南 丁,傅兰谷. 临床骨科生物力学基础 [M]. 上海: 上海远东出版社, 1993.
- [12] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [13] STATES R A, PAPPAS E. Precision and repeatability of the Optotrak 3020 motion measurement system [J]. **Journal of Medical Engineering & Technology**, 2006, 30(1): 11-16.
- [14] 崔三生,王 刚. 一种新型 ADL 量表可行性的研究 [J]. 中国康复医学杂志, 1992, 11(4): 199-201.

[编辑:李 辉]