残疾人用 Partial Finger 机构研究

杨会生，姜 力，刘伊威，刘 宏

（哈尔滨工业大学 机器人研究所，哈尔滨 150001，yanghuisheng@126.com）

摘 要：为了解决手指基指节截断患者无法安装功能型假肢的问题，研制了残疾人用 Partial Finger. 先分析了手指基指节截断患者的手部结构特点，基于被动驱动原理设计了 Partial Finger 的机械本体. 基于拟人化的思想研究了手指的关节运动规律，设计以近似等比例传动的杆件参数. 进行了运动学分析及样机性能实验. Partial Finger 样机外形比成年人小指略小，采用残存基指节驱动，具有侧摆和张合两个自由度，手指关节以近似定传动比传动. 实验结果表明：Partial Finger 可单手安装和拆卸，指尖最大出力 10.7 N，外形和运动状态与人手指相似，疲劳实验 5 万次以上未出现问题，配合其他手指可完成近 95% 的手部功能.

关键词：Partial Finger；全耦合；被动驱动

中图分类号：TP242 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)09－1413－05

Study on the mechanism of partial finger for handicapped

YANG Hui-sheng, JIANG Li, LIU Yi-wei, LIU Hong

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, yanghuisheng@126.com)

Abstract: In order to solve the problem that no functional type of prosthetic finger is suitable for handicapped person with only truncated base knuckle, a novel partial finger was designed in this paper. First, the characteristic of truncated base knuckle was analyzed. Based on the passive drive principle, mechanical structure of the partial finger was designed. Then, research on the motion law of the knuckles was carried out based on personification ideas, and parameters of the bars were determined to realize the approximate equal ratio transmission. Finally the kinematics analysis as well as the performance experiment was done. The partial finger with its size smaller than the little finger of an adult is driven by truncated base knuckle and has two degrees of freedom, moreover, each joint approximately moves with stable drive ratio. Experimental results indicate that the disassembly and installation of partial finger can be accomplished only by one hand, the maximum force output by fingertip is 10.7 N, the shape and motion of partial finger are similar as the human finger, and no problem appears after 50 thousand of fatigue tests. The partial finger can accomplish 95 percent of the hand function with the cooperation of other fingers.

Key words: partial finger; full-coupling; passive driving

近年来，仿人型残疾人假手的研究已经成为生物医学工程及机器人学科的一个热点方向. 随着机器人灵巧手技术的飞速发展，单自由度、三自由度、五自由度、多自由度残疾人假手相继出现. 比较有代表性的有 Otto Bock 手、TBM 手、HIT/DLR Ⅲ Ⅳ型假手、i－LIMB 手、FluidHand 手、惠普金斯大学假手[1－8]. 这些假手在外形、重量、自由度配置和感知功能方面都具有了某些方面的改进，但是上述假手的研究还主要集中在臂部骨骼离断的全手阶段，它们安装时要求上肢残疾人患者全手残疾，并且对小臂残肢长度有一定要求. 针对手部骨骼残疾的研究较少，特别是掌骨和指骨离断的研究，因为其有效利用体积小，拟人化要求高，基本处于空白状态. 据业内人士调查显示，手残患者中有相当一部分不是整手残疾，而是部分手残疾，所以针对部分手残疾的假手的研究日益

收稿日期：2009－04－18.

基金项目：国家自然科学基金重点项目(50435040).

作者简介：杨会生(1982—)，男，研究实习员；

姜 力(1970—)，男，教授，博士生导师；

刘 宏(1966—)，男，博士生导师，长江学者特聘教授.

迫切[9-10].

本文针对手指基指节(第一指骨)离断的残疾人患者,设计了一种结构简单,安装简便快捷,外观形象逼真,运动方式拟人化的残疾人用 Partial Finger. 有效地解决了现在没有适用于手指基指节残存患者能够使用的功能型假肢问题.

1 Partial Finger 结构设计

1.1 手部残疾类型和手指基指节离断结构分析

普通人手是由 5 个手指构成,每个手指都有很多骨骼组成,手指各个关节的运动是通过与之直接相连的肌肉或筋腱的相应收缩、伸展运动实现的,图 1 为人手骨骼构造简图[11],掌骨与手腕骨相连,手腕骨通过腕关节与小臂相连. 医学上针对手部残疾类型有腕关节离断、手腕骨截断、手掌骨截断、第一节指骨截断、第二节指骨截断、第三节指骨截断等类型,小臂和上臂及对应关节的离断也与手掌有关. 研究证明,手指第二、三指骨截断基本不影响手指的正常功能,可以安装装饰型假肢,但是基指节(第一指节指骨)离断将严重影响手指的正常功能,需要安装功能性假肢来弥补手指功能. 人手每个手指有 3 个关节,基关节有两个自由度(侧摆运动和张合运动),其余关节只有一个自由度(张合运动),因为手指基指节的驱动肌肉在手掌内,所以手指基指节离断后,残余基指节依然保留了原来的运动能力,如果利用得当,可以驱动假手指实现拟人化运动.

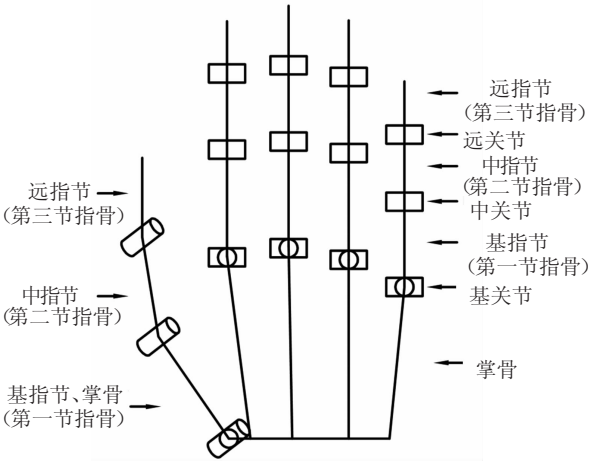


图 1 人手骨骼构造简图

1.2 Partial Finger 的整体结构

考虑到假手指应用普遍性,本文所研制的 Partial Finger 样机以人手指有效利用体积最小、实现难度最高的小指为基准,并预留外包装指套的空间. Partial Finger 由假手指连接部分(手掌部分)、基指节、中指节、远指节 4 部分组成,其结构图见图 2,各指节具体尺寸参数见表 1. Partial Finger 三指节采用全耦合结构,分别选取手指自然伸展和完全合拢为初始状态,设计假手指各指节的运动空间,为了模仿人手指的运动状态,采用近似定传动比来设计各指节四杆机构的尺寸参数,最终确定基关节与中关节近似 9∶10 传动,中关节与远关节近似 4∶3 传动. 各指节运动范围见表 2. 基指节与中指节初始角度为 5°,中指节与远指节初始角度为 0°.

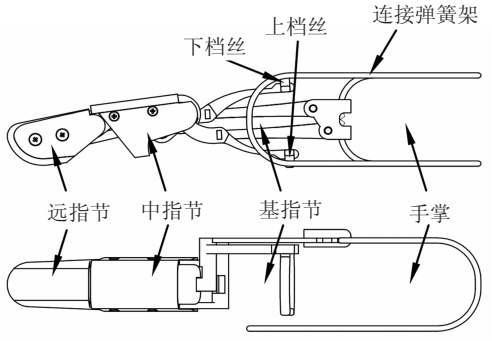


图 2 Partial Finger 结构图

表 1 假手指外形尺寸 mm

指节	长度	宽度	厚度
基指节	38	15	13
中指节	20	13	12
远指节	19	11	11

假手指通过连接弹簧架的弹性将假手指连接到手掌上,连接弹簧架的圆弧与手指的虎口接触定位. 连接弹簧架与基指节四杆机构的基座轴向固定、周向转动,模拟手指基关节的侧摆自由度,上下档丝分别与基指节四杆机构的上下连杆固连,通过对假手指参数进行优化,可使上下档丝在假手指开合运动整个过程中近似包络出残余基指节的形状,并且保证残余基指节在任意位置与上下档丝接触,从而驱动假手指开合.

表 2 假手指各关节运动范围 (°)

指节	运动范围
基指节	0 ~ 90
中指节	15 ~ 105
远指节	15 ~ 90

1.3 耦合四杆机构参数确定

假手指开合机构采用全耦合的原理设计,基指节四杆机构和中指节四杆机构原理基本相同,将基指节四杆机构中的两个杆与中指节四杆机构中的两个杆固连,可将基指节运动耦合到中指节,将远指节与中指节的一个杆固连,可将中指节运动耦合到远指节.

图 3 为近指节四杆机构,假手指合拢运动时 l_4 为基座,l_1 为主动杆,l_3 为中间杆传动杆,l_2 为从动杆;假手指张开运动时 l_4 为基座,l_3 为主动杆,l_1 为中间传动杆,l_2 为从动杆. 在假手指开合运动

过程中，同时 l_1 与 l_2 是与中指节四杆机构的耦合连杆，所以角 β 也是中指节四杆机构的驱动角.

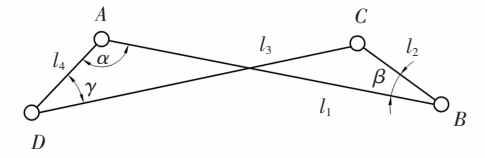


图 3　近指节四杆机构简图

以手指合拢运动为例设计基指节四杆机构各杆参数，手指张开可视为合拢运动的逆运动. 由上述分析可知，在手指的运动过程中，l_4 可视为手掌，l_1 可视为基指节，l_2 可视为中指节. 所以角 α（主动旋转角 $\angle BAD$）的增量 $\Delta\alpha$ 就是基关节的运动角度，同理，角 β（耦合旋转角 $\angle CBA$）的增量 $\Delta\beta$ 就是中关节的运动角度. 基指节与中指节的旋转方向一致，所以 $\Delta\alpha$ 为负，$\Delta\beta$ 为正，为实现基指节与中指节近似定传动比运动，在运动过程中应有 $-\Delta\alpha \approx n \times \Delta\beta$（$n$ 为基关节与中关节传动比）. 为保证基指节开合运动的对称性，在运动过程中 $\angle BAD$ 的变化量 $\Delta\alpha$ 与 $\angle ADC$ 的变化量 $\Delta\gamma$ 近似相等，即有 $-\Delta\alpha \approx \Delta\gamma$.

由人手指大小的要求及结构尺寸限制，可确定指节长度和某些杆的长度范围. 在参数确定的过程中，首先可以确定的是 l_1 和 l_4，为了得到最优化的各杆参数，本文根据实际情况取 $l_2 \in [l_4 - 2, l_4 - 2]$. 此外，四连杆机构中需要确定的参数还有角 α 和角 β 的初始值 α_0 和 β_0. 考虑到传递效率和关节运动范围，有

$$\alpha_0 \in [15^\circ + \theta_A, 165^\circ],$$

$$\beta_0 \in [15^\circ, 165^\circ - n \times \theta_A].$$

式中：θ_A 是 $\angle BAD$ 的运动范围，n 为基关节与中关节传动比，考虑到实际加工水平，l_2 的最小搜索步长为 0.1 mm，α_0 和 β_0 的最小搜索步长为 0.5°，利用 matlab 进行三层嵌套循环，从而可计算得连杆 l_3 的一系列长度值：

$$l_3 = f_1(\alpha_0, \beta_0, l_2).$$

本文在设计连杆的过程中，以 $-\Delta\alpha$ 与 $n \times \Delta\beta$ 角度差 δ_1 及 $-\Delta\alpha$ 与 $\Delta\gamma$ 的角度差 δ_2 的和为主要参考指标. 要求当主动角 α 从初始角度开始，在 $0 \sim \theta_A$ 的运动范围内，$\delta_1 + \delta_2$ 的统计值（均值 $E(\delta_1 + \delta_2)$、方差 $D(\delta_1 + \delta_2)$）最小.

$$E(\delta) = \sum_{k=1}^{n} \delta_k / n_1,$$

$$D(\delta) = \sum_{k=1}^{n} [\delta_k - E(\delta)]^2 / n_1.$$

式中：n_1 为主动角 α 在运动区间内采样点的数目，$\delta = \delta_1 + \delta_2$，$\delta_k = \delta_{1k} + \delta_{2k}$.

在传动过程中，可以得到 $\alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0$ 与 δ 的函数关系：

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = f_2(\alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0).$$

经过 Matlab 仿真计算，得出以下一组最优参数 $l_1 = 33.5$ mm，$l_2 = 5.5$ mm，$l_3 = 32.3$ mm，$l_4 = 6$ mm，$\alpha_0 = 117^\circ$，$\beta_0 = 26.5^\circ$.

中指节四杆机构如图 4 所示，l'_1 和 l'_4 与基指节四杆机构耦合，l'_2 与远指节耦合. $\angle B'A'D'$ 的变化量 $\Delta\alpha'$ 与 $\Delta\alpha$ 大小相同，方向相反. $\angle C'B'A'$ 的变化量 $\Delta\beta'$ 是远关节的运动角，为保证中指节与远指节运动角度近似等比例，应有 $\Delta\alpha' = -n' \times \Delta\beta'$（$n'$ 为基指节与远指节的传动比）.

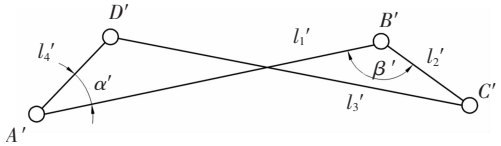


图 4　中指节四杆机构简图

经过 Matlab 计算，得出以下一组最优参数：$l'_1 = 15$ mm，$l'_2 = 5$ mm，$l'_3 = 12.9$ mm，$l'_4 = 3.9$ mm，$\alpha'_0 = 17^\circ$，$\beta'_0 = 90.5^\circ$.

利用 Matlab 将上述参数带入，测得各关节运动角度误差如图 5 所示，结果表明基关节最大传动误差 0.59°，中关节最大传动误差 0.63°.

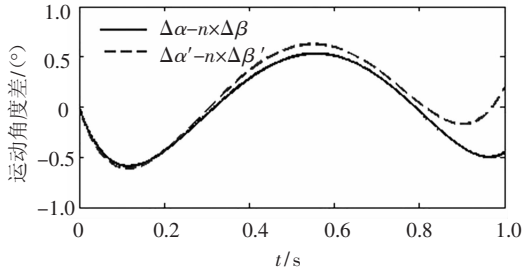


图 5　关节运动误差

2　Partial Finger 的运动学分析

因为假手指开合运动的运动互逆，假手指的运动学分析以合拢运动为例. 在假手指合拢运动过程中，残余基指节与基指节四杆机构的下挡丝（详见图 2）保持接触，可将接触面近似看作线接触，则残余基指节与下挡丝既存在转动又存在滑动，可以用一个滑动副加一个转动副代替，则假手指合拢运动的机构简图如图 6 所示. O 点既是坐标原点，也是基指节的关节点，l_{AQ} 是残余基指节的下表面.

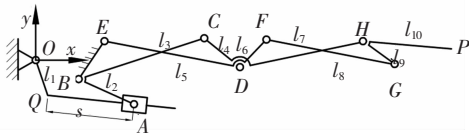


图 6　假手指合拢机构简图

利用杆组法将图 6 划分为Ⅰ级机构 AQ、RRPⅡ级基本杆组 AAB、Ⅰ级机构 BC、RRRⅡ级基本杆组 EDC、Ⅰ级机构 DF、Ⅰ级机构 DH、RRRⅡ级基本杆组 FGH、Ⅰ级机构 HP. 设残余基指节与 x 轴夹角为 φ_1，角速度为 ω_1，角加速度 α_1，则各点各杆的所有运动参数全部可求，将关键杆和重要点的运动参数进行定量分析，对照图 6 关键杆有基指节杆 l_5、中指节杆 l_7、远指节杆 l_{10}，重要点有中关节点 D、远关节点 H、远指节指尖点 P、下挡丝点 A，还有 A 与 Q 的相对运动关系.

图 7 所示为假手指各关节点的运动轨迹，对比人手指的运动形式可知，假手指具有高度拟人化的运动状态.

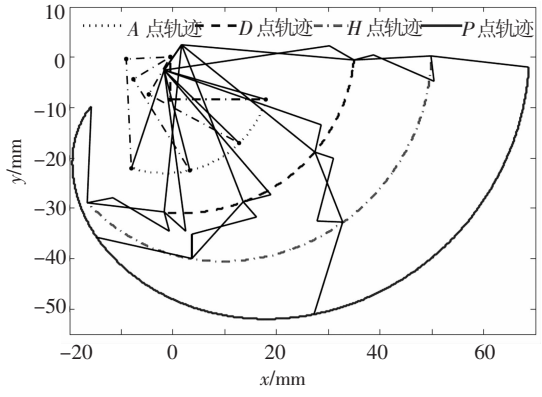


图 7 假手指各关键点运动轨迹

图 8 ~ 10 为假手指各指节的运动状态. 由图中曲线可知，假手指各关节以近似定传动比运动，当残余基指节匀速运动时，假手指各指节角加速度很小，近似匀速运动. 图 11 所示为假手指下挡丝在残余基指节上的运动状态，上图表明挡丝与残余基指节相对运动量较小，相对运动速度很小，所以挡丝对残余基指节的磨损量很小，可以利用残余基指节长时间驱动假手指.

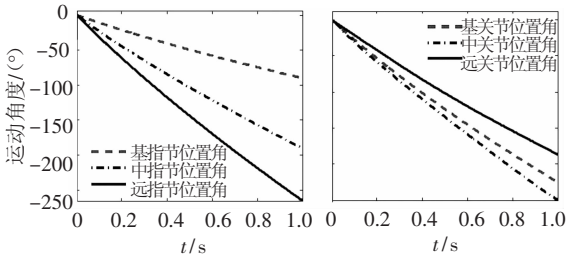


图 8 假手指各指节运动角

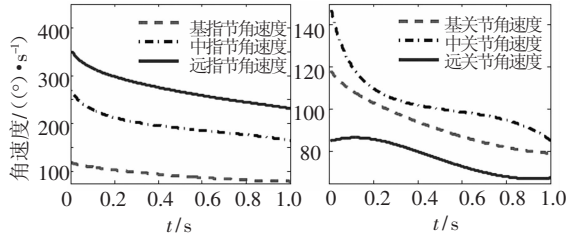


图 9 假手指各指节运动角速度

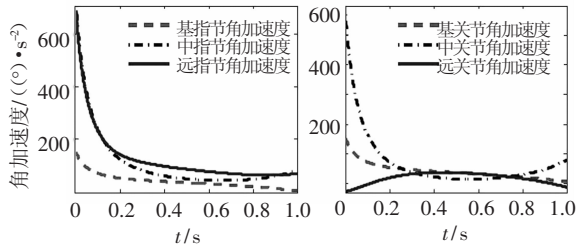


图 10 假手指各指节运动角加速度

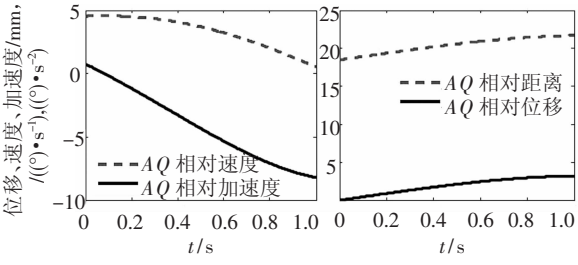


图 11 假手指 A 相对 Q 运动关系

3 Partial Finger 的运动实验

根据前文所述的结构，研制出了 Partial Finger 样机，根据相应残疾类型设计了残手实验装置，对假手指进行了性能实验. 通过负载实验验证，假手指可通过单手拆卸，在只通过连接弹簧架连接时，假手指指尖可承受力为 10.7 N，记录弹簧架状态，再现于人手掌上，没有压迫感；同时进行了 5 万次疲劳实验，在整个实验过程中，假手指连接可靠，机构运动平滑，实验完毕，残余基指节与上下档丝的磨损量不大；此外，本文还进行了抓取能力实验，因为没有其他手指的配合，Partial Finger 只能对外形尺寸 <25 mm 的物体进行操作，但抓取稳定、力量可靠，如图 12 所示；最后通过对比假手指的运动状态，特别是假手指始末状态与人手自然状态（如图 12 所示），表明假手指运动方式和外形高度拟人化，配合外包装手套可以完全满足残疾人需要.

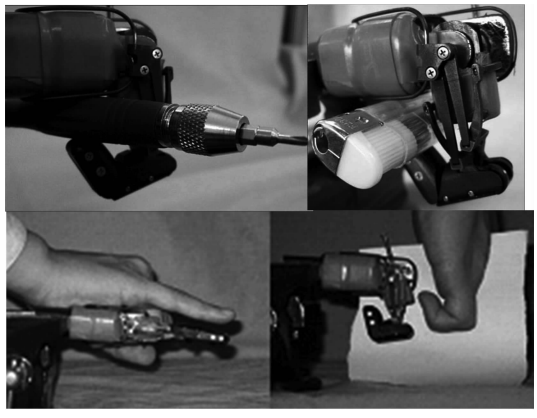


图 12 Partial Finger 实验图片

4 结 语

1）研制了一种利用被动方式驱动，采用全耦合机构实现手指开合的仿人型残疾人用 Partial

Finger，并设计了相应连接机构.

2）分析了手指基指节离断的手部结构，利用 Matlab 设计了以近似等比例传动的杆件参数，对假手指的运动学进行了理论分析，研制了假手指实验平台，并对其整体性能进行了验证.

3）通过多次实验证明，该假手指结构简单、可靠，运动灵活、控制方便，可以配合其他手指完成手的近 95% 功能.

参考文献：

[1] CHAPPEL P H, KYBERD P J. Prehensile control of a hand prosthesis by a microcontroller [J]. Journal of biomedical engineering, 1991, 13 (5): 363 – 369.

[2] CARROZZA M C, DARIO P. An Actuator System for a Novel Biomechatronic Prosthetic Hand [C]//In Proceedings of Actuator 2000. Bremen, Germany: [s. n.], 2000: 276 – 280.

[3] DECHEV N, CLEGHORN W L. Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand [J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36: 1157 – 1173.

[4] ZHAO Dawei, JIN Minghe. Development of An Underactuated Prosthetic Hand with the Step Motor [J]. High Technology Letters, 2006, 12(4): 341 – 345.

[5] CHRISTINE C, Prosthetic hands from Touch Bionics [J]. Industrial Robot, 2008, 4(35): 290 – 293.

[6] SAITO Y, OGAWA A, NEGOTO, *et al.* Development of intelligent prosthetic hand adapted to age and body shape [C]//9th International Conference on Rehabilitation Robotics. [S. l.]: ICORR, 2005: 384 – 389.

[7] 史士财，高晓辉，姜力，等. 欠驱动自适应机器人手的研制[J]. 机器人，2004，26(6)：496 – 502.

[8] ZHAO Jingdong, JIANG Li, SHI Shicai, *et al.* A Five-fingered Underactuated Prosthetic Hand System [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. [S. l.]: ICMA, 2006: 1453 – 1458.

[9] 陈　光. 我国残疾人用品生产和供应概况及发展趋势[C]//2001 年中国残疾人康复论坛专家论文集. 北京：华夏出版社，2001：12 – 17.

[10] 王新宪. 中国残疾人康复事业的现状与展望[C]// 2001 年中国残疾人康复论坛专家论文集. 北京：华夏出版社，2001：1 – 6.

[11] BERGAMASCO M, SCATTARECGIA MARCHES S. The Mechanical Design of the MARCUS Prosthetic hand [C]//IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Tokyo: [s. n.], 1995: 95 – 100.

（编辑　杨　波）

（上接第 1378 页）

3）采用设计干扰观测器的方法来减小变结构控制的固有振颤，保证了观测时航天器平台的稳定，最后通过数值仿真验证了该方法的有效性.

参考文献：

[1] FOUNTAIN G H, KUSNIERKIEWICZ D Y, HERSMAN C B. The new horizons spacecraft [J]. Space Science Reviews, 2008.

[2] WONG E C, BRECKENRIDGE W G. An attitude control design for the cassini spacecraft [C]//Guidance, Navigation, and Control Conference. [S. l.]: AIAA, 1995.

[3] LEE A Y, HANOVER G. Cassini spacecraft attitude control system flight performance [C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. California, USA: AIAA, 2005.

[4] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineer's guide to sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328 – 342.

[5] CHANG C Y, HSU K C, CHIANG K H. An enhanced adaptive sliding mode fuzzy control for positioning and anti-swing control of overhead crane system [C]//2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Taiwan: [s. n.], 2006.

[6] HU Qinlei, MA Guangfu, XIE Lihua. Robust and adaptive variable structure output feedback control of uncertain systems with input nonlinearity [J]. Automatica, 2008, 44(2): 552 – 559.

[7] HU Qinlei, MA Guangfu. Control of three – axis stabilized flexible spacecraft using variable structure strategies subject to input nonlinearities [J]. Journal of Vibration and Control, 2006, 12(6): 659 – 681.

[8] LIU Hui, LI Junfeng, BAOYIN Hexi. Sliding mode control for low thrust earth-orbiting spacecraft formation maneuvering [J]. Aerospace Science and Technology, 2006, 10(7): 636 – 643.

[9] 吕建婷，李传江，马广富. 卫星姿态调节的滑模 PID 控制器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报，2008，40(7)：1009 – 1012.

[10] 管萍，刘小河，刘向杰. 挠性卫星的变结构姿态控制[J]. 控制理论与应用，2007，24(3)：480 – 484.

[11] SIDI M J. Spacecraft Dynamics and Control [M]. London: Cambridge University Press, 1997.

（编辑　张　宏）