

# 欠驱动假手手指抓取力的研究

黄海<sup>1</sup>, 王新庆<sup>2</sup>, 姜力<sup>2</sup>, 刘宏<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 智能水下机器人国防技术重点实验室, 哈尔滨 150001, haius@163.com;

2. 哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150001; 3. 德国宇航中心机器人与系统动力学研究所)

**摘要:** 为了满足欠驱动手进行复杂作业的需要, 基于欠驱动原理建立了手指对物体的抓取力模型和基于力的阻抗控制策略. 对应于任一手指姿态, 抓取力模型可以准确得到基关节抓握力矩和手指各指节抓取力的关系; 采用基于力的阻抗控制策略, 实现了基关节抓取力控制. 实验证明, 手指能够稳定地抓取鸡蛋这样比较滑、容易碎、形状复杂且有一定质量, 需要稳定和平衡抓取力的物体, 其成功率达 80% 以上. 而这是单纯用手指的基关节力控制很难做到的(成功率只有不到 20%). 手指抓取力模型和阻抗控制策略的建立大大增强了假手进行复杂作业, 抓取复杂物体的能力.

**关键词:** 假手; 欠驱动; 阻抗控制

中图分类号: TP 242. 6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0801-05

## Finger grasp force of underactuated prosthetic hand

HUANG Hai<sup>1</sup>, WANG Xin-qing<sup>2</sup>, JIANG Li<sup>2</sup>, LIU Hong<sup>3</sup>

(1. National Defense Key Laboratory of Underwater Vehicles Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, haius@163.com; 2. State Key Laboratory of Robot and Systems, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Institute of Robotics and System Dynamics, German Aerospace Center.)

**Abstract:** In order to improve the operation capacity of an underactuated prosthetic hand, the static grasp model and the force based impedance control strategy of the finger were constructed based on the underactuated mechanism. According to the static grasp model, the precise relationship between the actuation torque and the support force from phalanges can be obtained corresponding to any grasp attitude. The force based impedance control strategy realizes the force control of base joint. According to experiments, the finger can stably grasp a slippery, fragile, complicated and comparatively heavy object such as an egg. Its success ratio reaches 80%, which can not be achieved only through the force control of base joint (the success rate was only less than 20%). Therefore, the hand can realize complex operation with the constructed static grasp model and the force based impedance control strategy.

**Key words:** prosthetic hand; underactuated; impedance control

欠驱动在机械手中有许多引人注目的特点, 比如其结构简单, 需要的电机数少于自由度数, 该方法可以通过像弹簧和机械限位之类的被动元件来实现手指的自适应抓握. 国内外许多研究机构在这方面做出了卓有成效的研究. 如加拿大手、

Southampton 手、TBM 手、OTTOBOCK 手、意大利手等<sup>[1-5]</sup>. 这类手可以完成一些简单的操作, 并且被应用于残疾人假手和伺服机器人<sup>[6-7]</sup>. 欠驱动机构是指在机构中独立控制变量(驱动单元)少于系统的自由度数(关节数). 为了获得静定系统, 在欠驱动机构中需引入弹性元件和限位装置<sup>[8]</sup>. 然而, 欠驱动机构中弹性元件又给欠驱动手的精确控制, 诸如精确的轨迹跟踪, 力控制等造成了一定的困难<sup>[9]</sup>, 尤其是国内的一些欠驱动手中, 加上其传感器数量的限制, 难以实现复杂和准

收稿日期: 2008-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50435040).

作者简介: 黄海(1978—), 男, 博士后;

姜力(1971—), 男, 副研究员, 博士生导师;

刘宏(1966—), 男, 特聘教授, 博士生导师.

确的操作,限制了它的灵巧<sup>[10]</sup>.

本文进行手指的静力学模型分析,研究手指基关节的力控制,并进行手指抓取的研究和实验.

### 1 手指的抓取力模型

HIT-DLR 仿人假手的手指结构如图1所示. 它共有3个指节,其中近指节和中指节欠驱动,手指的中关节有扭簧,中指节和指尖通过耦合连杆实现近似为1:1的耦合运动,手指的基关节有力矩和位置传感器. 由于手指只有一个主动自由度,给定一种抓取姿态,手指的基关节抓取力和各指节抓握力是一一对应的. 从而可以把手指结构简化为图2所示的抓取力学模型.

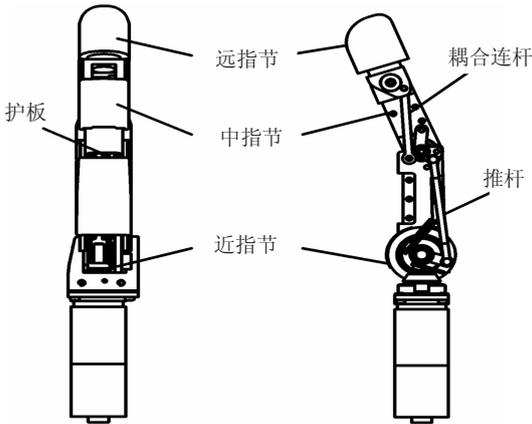


图1 手指结构图

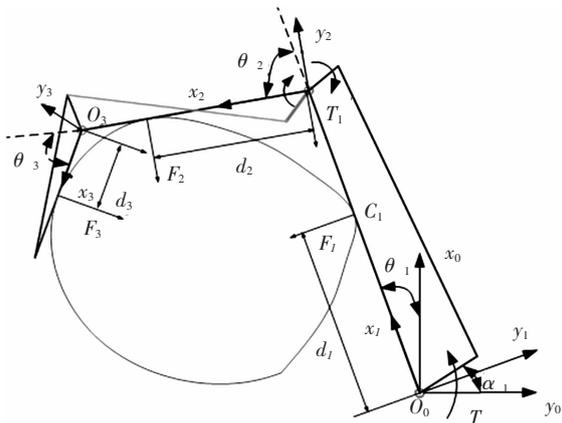


图2 手指抓取的力学模型

由图2,根据虚功原理可得

$$T^T \omega = F^T V. \tag{1}$$

式中:  $T$ 为手指系统输入转矩向量,由手指基关节驱动力矩  $T_0$  和弹簧扭矩  $T_1$  组成; $\omega$ 为手指各关节与力矩相关的连杆的角速度向量,由驱动连杆角速度  $\alpha_1$  和第二、第三关节角速度  $\theta_2$ 、 $\theta_3$  构成; $F$ 为作用在手指上的外力构成的向量,由外力  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  构成; $V$ 为外力作用点的速度分量,分别由各接触点的法向方向的速度矢量构成.

$$T = \begin{bmatrix} T_0 \\ T_1 = -k_1(\theta_2 + \theta_{20}) \\ T_2 = 0 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\omega = [\alpha_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3]^T, \tag{3}$$

$$F = [F_1 \quad F_2 \quad F_3]^T,$$

$$V = [V_{c1y1} \quad V_{c2y2} \quad V_{c3y3}]^T.$$

由图2可得

$$[V_{c1y1} \quad V_{c2y2} \quad V_{c3y3}]^T = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ l_1 \cos \theta_2 & d_2 & 0 \\ l_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_3 + d_3 & l_2 \cos \theta_3 + d_3 & d_3 \end{bmatrix} \cdot [\dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T,$$

令

$$J_v = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ l_1 \cos \theta_2 & d_2 & 0 \\ l_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_3 + d_3 & l_2 \cos \theta_3 + d_3 & d_3 \end{bmatrix}.$$

如图3所示,设杆  $a_1$  和  $l_1$  之间的初始角为  $\theta_0$ ,  $a_1$  杆和  $y_0$  之间初始角为  $\alpha_0$ ,  $l_1$  和  $c_1$  之间初始角为  $\beta_0$ ,令  $\alpha_0 = 0$ ;运动时,设近指节转  $\theta_1$ ,中关节转  $\theta_2$ , $a_1$  杆转  $\alpha_1$ ,这时四连杆机构之间的各个夹角分别为: $a_1$  和  $l_1$  之间为  $\theta_0 + \theta_1 - \alpha_1$ , $l_1$  和  $c_1$  之间的夹角为  $\beta_0 + \theta_2$ .

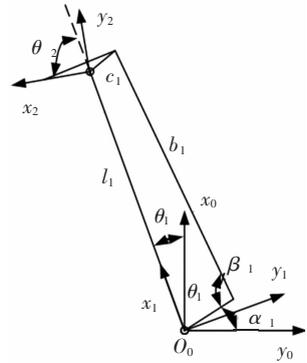


图3 基关节四连杆机构简图

从而可以得

$$a_1^2 + b_1^2 - 2a_1 b_1 \cos \beta_1 = c_1^2 + l_1^2 - 2c_1 l_1 \cos(\beta_0 + \theta_2),$$

$$a_1^2 + l_1^2 - 2a_1 l_1 \cos(\theta_1 + \theta_0 - \alpha_1) = b_1^2 - 2c_1 b_1 \cos \beta_2,$$

$$\theta_0 + \theta_1 - \alpha_1 + \beta_0 + \theta_2 + \beta_1 + \beta_1 = 360^\circ.$$

求出

$$\dot{\theta}_1 = \dot{\alpha}_1 - [1 + \sin(\beta_0 + \theta_2)c_1 l_1 / [b_1 a_1 (1 - (b_1^2 + a_1^2 - c_1^2 + 2\cos(\beta_0 + \theta_2)c_1 l_1 - l_1^2)^2 / (4b_1^2 c_1^2))]^{1/2}] \dot{\theta}_2 / [1 + \sin(\theta_1 + \theta_0 - \alpha_1)a_1 l_1 / [b_1 c_1 (1 - (b_1^2 - a_1^2 + c_1^2 + 2\cos(\theta_1 + \theta_0 - \alpha_1)a_1 l_1 - l_1^2)^2 / (4b_1^2 c_1^2))]^{-1/2}]. \tag{4}$$

由于中指节和指尖为 1:1 的耦合运动,  $\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3$ , 且中指节和指尖的质量比为 7:3, 由能量关系, 有

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.7A & -0.3A \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}.$$

式中:

$$A = [1 + \sin(\beta_0 + \theta_2)c_1l_1/[b_1a_1(1 - (b_1^2 + a_1^2 - c_1^2 + 2\cos(\beta_0 + \theta_2)c_1l_1 - l_1^2)^2)/(4b_1^2c_1^2))^{-1/2}]/[1 + \sin(\theta_1 + \theta_0 - \alpha_1)a_1l_1/[b_1c_1(1 - (b_1^2 - a_1^2 + c_1^2 + 2\cos(\theta_1 + \theta_0 - \alpha_1)a_1l_1 - l_1^2)^2)/(4b_1^2c_1^2))^{-1/2}].$$

令

$$\mathbf{J}_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1 & -0.7A & -0.3A \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

因此根据式(1)~(4)可得

$$\mathbf{V} = \mathbf{J}_\nu \mathbf{J}_\omega [\dot{\alpha}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\theta}_3]^T.$$

当  $d_1 \neq 0, d_1d_2d_3 \neq 0$  时,  $\mathbf{J}_\nu$  为非奇异矩阵, 因此它的逆矩阵存在, 而  $\mathbf{J}_\omega$  恒为非奇异矩阵, 逆矩阵也是存在的, 所以

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}_\nu^{-T} \mathbf{J}_\varepsilon^{-T} \mathbf{T}.$$

设

$$\mathbf{J}_F = \mathbf{J}_\nu^{-T} \mathbf{J}_\omega^{-T},$$

$$F_1 = T_0/d_1 - 0.7AT_0(l_1 \cos \theta_2 + d_2)/(d_1d_2) + k_1(l_1 \cos \theta_2 + d_2)(\theta_2 + \theta_{20})/(d_1d_2) + 0.3AT_0l_1[l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + d_3 \cos \theta_2 - d_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)]/(d_1d_2d_3),$$

$$F_2 = 0.7AT_0/d_2 - 0.3AT_0(l_2 \cos \theta_3 + d_3)/(d_2d_3) - k_1(\theta_2 + \theta_{20})/d_2,$$

$$F_3 = 0.3AT_0/d_3.$$

如果忽略扭簧产生的扭矩, 可得手指对物体的抓取力模型:

$$\begin{cases} F_1 = T_0/d_1 - 0.7AT_0(l_1 \cos \theta_2 + d_2)/(d_1d_2) + 0.3AT_0l_1[l_2 \cos \theta_2 \cos \theta_3 + d_3 \cos \theta_2 - d_2 \cos(\theta_2 + \theta_3)]/(d_1d_2d_3), \\ F_2 = 0.7AT_0/d_2 - 0.3AT_0(l_2 \cos \theta_3 + d_3)/(d_2d_3) - k_1(\theta_2 + \theta_{20})/d_2, \\ F_3 = 0.3AT_0/d_3. \end{cases} \quad (5)$$

## 2 基于力的手指阻抗控制

式(6)是关于手指基关节驱动力矩的逆动力学方程:

$$\mathbf{T}_0 = \mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) + \mathbf{F}(\theta, \dot{\theta}, \text{sign}(\dot{\theta})) + T_L. \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{M}(\theta)$  为手指的惯量矩阵,  $\mathbf{V}(\theta, \dot{\theta})$  为手指的向心加速度和哥式加速度向量,  $\mathbf{F}(\theta, \text{sign}(\dot{\theta}))$  为手指运动过程中扭簧的阻力、阻尼和摩擦,  $\theta$  为手指各连杆运动角度向量,  $T_L$  为手指所受外力力矩。

当手指以极慢速度运动时, 手指所受动力学力趋于 0, 即:  $\mathbf{M}(\theta)\ddot{\theta} \approx 0, \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) \approx 0$ , 这样如果手指在整个运动过程中被补偿, 平衡状态下的手指所受外力矩可由下式求出:

$$T_L \approx \tau - G(\theta) - F(\theta).$$

其中  $F(\theta)$  是手指所受扭簧的阻力。

由于假手手指只有一个自由度, 手指各连杆的运动角度可以由基关节的角度通过几何关系求得, 基关节的角度由位置传感器得到, 力矩参考值由参考位置 and 实际位置计算得到。

假手手指的基关节作用力和位置之间的动力学关系一般用如下的二阶微分方程来描述:

$$T_L = M_d(\ddot{\theta}_{br} - \ddot{\theta}) + B_d(\dot{\theta}_{br} - \dot{\theta}) + K_d(\theta_{br} - \theta). \quad (7)$$

式中:  $M_d$  为阻抗控制系统的目标惯量 ( $N \cdot m \cdot s^2/(\circ)$ ),  $M_d > 0$ ;  $B_d$  为阻抗控制系统的目标阻尼 ( $N \cdot m \cdot s/(\circ)$ ),  $B_d > 0$ ;  $K_d$  为阻抗控制系统的目标刚度 ( $N \cdot m/(\circ)$ ),  $K_d > 0$ ;  $T_L$  为手指与环境之间的接触力在基关节处产生的力矩 ( $N \cdot m$ );  $\theta_{br}$  为手指基关节的参考角度 ( $\circ$ );  $\theta$  为手指基关节的实际角度 ( $\circ$ ).

为保持目标阻抗, 手指的基关节力矩可由式(6)和(7)求得:

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}(\theta)(\ddot{\theta}_d - M_d^{-1}(T_L - B_d\delta\dot{\theta} - K_d\delta\theta)) + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{F}(\theta, \dot{\theta}, \text{sign}(\dot{\theta})) + \mathbf{G}(\theta) + T_L.$$

式中:  $\delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}, \delta\theta = \theta_d - \theta$ . 这意味着只要有准确的动力学模型和精确的传感器, 就可以为驱动力矩的计算提供理想的线性反馈, 并且手指能够展现期待的环境阻抗参数—— $M_d, B_d, K_d$ . 然而, 实际上手指的动力学模型并不能准确知道, 位置和力矩传感器也总是受到噪声干扰. 实际的实验很难得到理想的线性反馈和所期待的阻抗参数. 为此引入一个显性的力控制策略. 即令

$$T_d = M_d'\delta\ddot{\theta} + B_d'\delta\dot{\theta} + K_d'\delta\theta,$$

这样转矩误差:

$$T_e = T_d - T_{\text{ext}}.$$

其中:  $T_{\text{ext}}$  是测得的力矩传感器值减去重力. 如图 4 引进 PI 控制器, 这样, 如果  $T_e$  趋于 0, 则实际的阻抗参数趋近于期望的阻抗参数. 当手指达到平衡状态后, 所有测量和期望得到的速度和加速度

都为 0, 这样平衡状态下的变形角  $\delta\theta$  乘以刚度就得到了平衡状态下的力矩, 手指就像是一个编好程的弹簧.

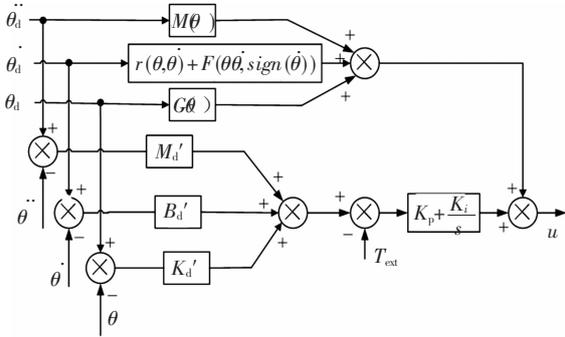


图 4 基于力的基关节阻抗控制策略

### 3 手指抓取的实验与分析

参照文献[11-12]的方法, 进行了抓取鸡蛋的实验. 根据鸡蛋的特点得到抓取鸡蛋的力封闭模型如图 5, 由于鸡蛋较大, 各指节力和摩擦力共同构成力封闭. 设定各指节抓取力大致如表 1, 这样根据手指对物体的抓取力模型式(5) 计算, 得到基关节控制力矩为  $0.33 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

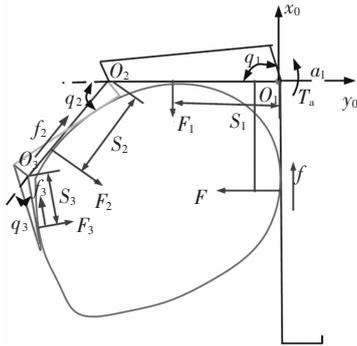


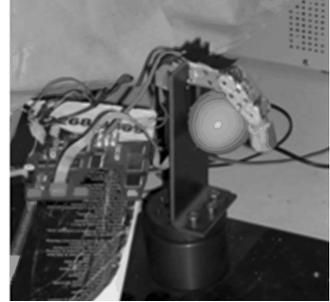
图 5 抓取鸡蛋力封闭模型

表 1 抓取鸡蛋时手指各指节抓取力及相关参数

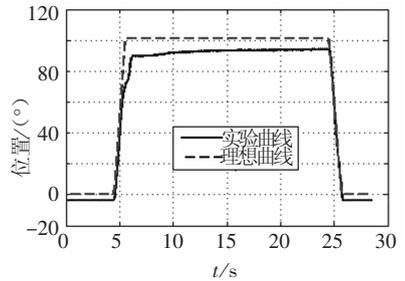
关节	抓取力/N	各指节运动角度/(°)	接触点距各指节距离/mm
近指节	8.35	90	28.6
中指节	3.13	36	16.6
指尖	2.71	36	14.4

图 6 是手指抓取鸡蛋的实验结果. 在实验中手指未接触到物体时, 基关节将首先通过图 4 所描述的 PI 控制以  $45^\circ/\text{s}$  的速度抓握鸡蛋, 当手指各指节接触到鸡蛋时, 期望轨迹仍以  $45^\circ/\text{s}$  增加到  $100^\circ$ , 此时的基关节期望力矩是  $0.33 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 如图 6 所示手指通过图 4 基于力的阻抗控制策略, 可以实现准确的基关节力控制, 从而保证手指各指节的抓取力按照表 1 分布, 使手指可以稳定地抓取鸡蛋, 其成功率达 80% 以上. 而这是单纯用手指的基关节力控制很难做到的(成功率只有不到

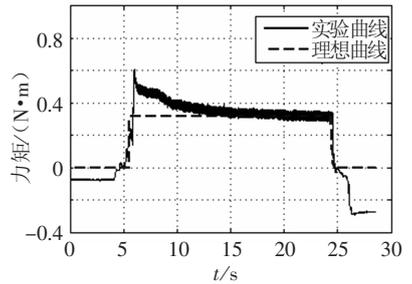
20%). 所以, 虽然假手只有基关节力矩传感器, 也可以在手指抓取力控制中, 通过手指对物体的抓取力模型, 控制各指节的抓取力, 从而稳定地抓取像鸡蛋这样比较难抓取的物体.



(a) 鸡蛋抓取实验



(b) 基关节位置曲线



(c) 基关节力矩曲线

图 6 抓取鸡蛋的实验结果

### 4 结 论

1) 针对欠驱动手指的特点, 建立了手指对物体的抓取力模型, 对应于任一手指抓取姿态, 可以准确得到基关节抓握力矩和手指各指节抓取力的对应关系.

2) 基于手指动力学模型, 对手指的阻抗控制进行了研究, 建立了基于力的阻抗控制策略, 通过该策略, 手指对基关节抓取力的控制就像一个编好程的弹簧.

3) 抓取鸡蛋的实验表明, 手指能够稳定地抓取鸡蛋这样比较滑、容易碎、形状复杂且有一定质量, 需要稳定和平衡抓取力的物体, 从而验证了手指对物体的抓取力模型和基于力的阻抗控制策略, 大大增强了假手抓取复杂物体的能力.

### 参考文献:

[1] DARIO P, LASCHI C, CARROZZA M C. An Integrat-

- ed Approach for the Design and Development of a grasping and manipulation System in humanoid Robotics [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Washington, D. C, USA:[s. n.],2002: 556.
- [2] CHAPPELL P H, KYBERD P J. Prehensile control of a hand prosthesis by a microcontroller [J]. Biomedical Engineering,1991, 13: 363 – 369.
- [3] DECHEV N, CLEGHORN W L, NAUMANN S. Multiple finger, passive adaptive grasp prosthetic hand[J]. Mechanism and Machine Theory, 2001, 36: 1157 – 1173.
- [4] LIGHT C M, CHAPPELL P H. Development of a light-weight and adaptable multiple-axis hand prosthesis[J]. Medical Engineering and Physics, 2000, 22: 679 – 684.
- [5] CARROZZA M C, MASSA B, MICERA S, *et al.* A “Wearable” Artificial Hand for Prosthetics and Humanoid Robotics Applications[C]//Proceedings of the 2001 IEEE —RAS International Conference on Humanoid Robots. Tokyo, Japan:[s. n.], 2001: 2134.
- [6] FARRELL T R, WEIR R F. The optimal controller delay for myoelectric prostheses [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2007, 15(1):111 – 118.
- [7] SHENOY P, MILLER K J, CRAWFORD B, *et al.* On-line electromyographic control of a robotic prosthesis [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2008, 55(3): 1128 – 1135.
- [8] BIRGLEN L, GOSSELIN C M. On the Force Capability of Underactuated Fingers [C]//Proceedings of the 2003 IEEE ICRA. Taipei, Taiwan:[s. n.], 2003: 139 – 144.
- [9] COTTON D PJ, CRANNY A, CHAPPELL P M, *et al.* Control strategies for a multiple degree of freedom prosthetic hand [J]. Measurement and Control, 2007, 40(1): 24 – 27.
- [10] ZHAO Da-wei, JIANG Li, JIN Ming-he, *et al.* Control system of anthropomorphic robotic hand with keeping torque function [J]. Electric Machines and Control, 2007, 11(5): 497 – 501.
- [11] HUANG H, JIANG L, ZHAO D W, *et al.* The Development on a New Biomechatronic Prosthetic Hand Based on Under – actuated Mechanism [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. BeiJing, China:[s. n.], 2006: 3791 – 3796.
- [12] ZHAO D W, JIANG L, HUANG H, *et al.* Development of a Multi-DOF Anthropomorphic Prosthetic Hand [C]//2006 IEEE International Conference on ROBIO. Kunming, China:[s. n.], 2006: 878 – 883.

(编辑 杨波)

(上接第800页)

与水环境国家重点实验室自主课题“天然水体水的社会循环优化控制技术与理论研究”(2008TS06)对本论文的支持。

## 参考文献:

- [1] EVANS M J, SCHILLER S. Application of microclimate studies in town planning: A new capital city, an existing urban district and urban river front development[J]. Atmospheric Environment, 1996,30(3): 361 – 364.
- [2] 刘幻雯. 城市河流景观现状分析及综合规划[J]. 云南环境科学, 2005,24(增刊1): 53 – 56.
- [3] 杨凯,唐敏,刘源,等. 上海中心城区河流及水体周边小气候效应分析[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2004,2004(3): 105 – 114.
- [4] YAMASHITA S. Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo [J]. Atmospheric Environment, 1996,30(3): 429 – 435.
- [5] 吴学伟,杨冰,智长贵,等. 基于遥感和GIS的哈尔滨城区热岛效应研究[J]. 地理信息世界, 2006(10): 63 – 66.
- [6] 王岩,范文义,杨爱玲. 6S辐射传输模型在校正哈尔滨市遥感图像中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2008, 31(2):16 – 19.
- [7] 刘志丽,陈曦. 基于ERSAS IMAGING软件的TM影像几何精校正方法初探:以塔里木河流域为例[J]. 干旱区地理, 2001,24(4):353 – 358.
- [8] 张世利,刘健,余坤勇,等. 基于ERDAS几何校正及在闽江流域影像处理中应用[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(4):365 – 369.
- [9] QIN Z, KARNIHELI A, BERLINER P. A mono – window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001,22(18):3719 – 3746.
- [10] JIMENEZMUOZ J, SOBRINO J. A generalized single – channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of geophysical research, 2003,108(22):4688 – 4695.
- [11] 李星敏,刘安麟,张树誉,等. 热惯量法在干旱遥感监测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1):54 – 59.
- [12] 刘志明,张柏,晏明,等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003,18(4): 576 – 583.

(编辑 杨波)