

具有力/位感知的仿人假手拇指机构

王伟¹, 姜力¹, 王新庆¹, 刘伊威¹, 刘宏^{1,2}

(1. 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 150086, kingwei82@163.com;

2. 德国宇航中心, 机器人及机电一体化研究所, 慕尼黑 82230)

摘要: 为使假手运动速度更快、更稳定, 体积更小, 基于耦合原理设计了假手的拇指机构; 为使假手更加智能化, 集成了力矩和位置感知装置, 使之能够感知手指的绝对位置和指尖出力. 该拇指由 1 个电机驱动, 由 3 个关节组成, 电机、减速箱和伞齿轮减速装置全部嵌入在手掌内部, 近指节和中指节之间采用了平面四杆和空间四杆驱动方式, 使手指的外观和运动轨迹更加拟人化. 实验表明, 手指抓取速度快且在运动的起点和终点没有震动, 抓取过程更加仿人化, 能够完成正向捏取、三指捏取、柱状抓取等人手大部分抓取功能, 能够满足残疾人基本生活需要.

关键词: 假手; 拇指机构; 力矩感知; 位置感知; 四杆机构

中图分类号: TP241

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)09-1403-05

Thumb mechanism of humanoid prosthetic hand with torque/position perception

WANG Wei¹, JIANG Li¹, WANG Xin-qing¹, LIU Yi-wei¹, LIU Hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150086, China, kingwei82@163.com;

2. Institute of Robotics and System Dynamics, German Aerospace Center (DLR), Munich 82230, Germany)

Abstract: To make the prosthetic hand move faster with less vibration and smaller than adult thumb, a prosthetic thumb has been designed on the basis of underactuated mechanism. To make the hand more intelligentized, torque and position perception devices have been integrated. The thumb consists of three joints and is actuated by one motor. And the motor, gearhead and bevel device are all embedded in palm. Planar four-bar linkage and spatial four-bar linkage are adopted between metacarpal and proximal phalanx to make the appearance and track more humanoid. It is verified from experiment that the thumb has faster grasping speed without vibration at the beginning and end of grasping. It is more humanoid when grasping and can accomplish the prehension by subterminal opposition, tridigital grip, cylindrical palmar prehension, and can meet the basic life needs of the handicapped.

Key words: humanoid prosthetic hand; thumb mechanism; torque perception; position perception; four-bar linkage

近年来, 国内外对假手的研究都取得了一定成果, 如意大利的 RTR I^[1-2] 和 RTR II 假手^[3], 美国的 IOWA - Hand^[4] 和 Standford - Hand^[5], 加拿大的 TBM - Hand^[6], 西班牙的 MANUS - Hand^[7], 哈工大的 HIT - DLR 手^[8-9] 等. 现有大部分假手

的传感系统不够完善, 限制了假手的应用, 基于欠驱动原理设计的上一代 HIT/DLR 假手, 虽然其拇指包络性较好, 但由于其需要储能元件(扭簧), 决定了拇指的尺寸比较大, 且实验表明, 由于储能元件的存在, 拇指在运动的起点和终点会发生震动, 这些都限制了欠驱动技术在假手中的应用.

本文在上一代假手的基础上研制了一种基于耦合原理和空间四杆的具有力矩和位置感知的仿人拇指. 该拇指能够感知手指的绝对位置和指尖

收稿日期: 2009-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50435040).

作者简介: 王伟(1982—), 男, 硕士研究生;

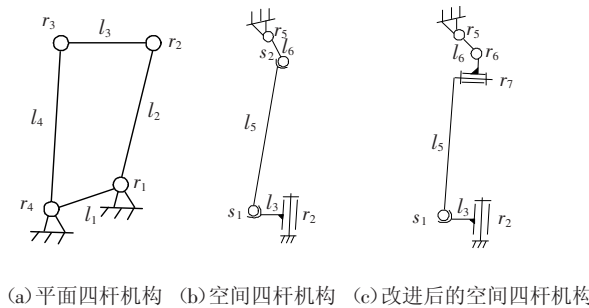
姜力(1971—), 男, 教授, 博士生导师.

出力. 采用了耦合驱动,使得尺寸小于成人拇指,抓取速度快且在运动的起点和终点没有震动.

1 仿人拇指的结构设计

人手拇指有 3 个指节组成,即近指节、中指节和远指节(指尖). 近指节被肌肉包裹,在手掌一侧,故拇指一般只露出后 2 个指节,但近指节在抓握物体时参与运动. 另外,拇指在抓握运动时,通常是沿一锥面,即伸展/弯曲,外展/内收两个自由度的结合,而不是做单一方向的运动.

本文设计的仿人假手拇指具有 3 个指节,考虑到假手外观及佩戴手套需要,每个指节的尺寸均略小于成人拇指. 电机经减速箱和伞齿轮减速装置减速增矩后驱动近指节运动,中指节与近指节之间、远指节与中指节之间均采用耦合驱动方式. 为模仿人手拇指的运动特点,远指节与中指节之间为平面耦合驱动,中指节与近指节之间采用了一平面四杆和一空间四杆结合的空间耦合驱动方式,原理如图 1(a)和图 1(b)所示.



(a)平面四杆机构 (b)空间四杆机构 (c)改进后的空间四杆机构

图 1 拇指近指节连杆机构简图

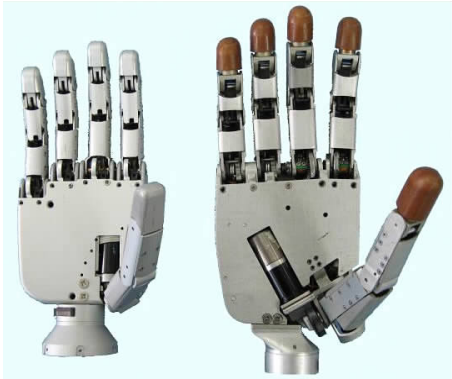
其中: l_1 为拇指基座, l_2 为近指节侧板, l_6 为中指节轴盘, s_1, s_2 为球铰. 近指节侧板 l_2 的运动推动连杆轴 l_3 的运动,连杆轴通过球铰连杆 l_5 推动中指节轴盘运动,从而实现与中指节轴盘 l_6 连在一起的中指节运动. 对于图 1(b)所示的双球铰四杆机构,由空间自由度计算公式可得该机构的自由度 $F = 2$.

可见双球铰之间会引入一局部自由度,为消除此自由度,其中球铰 s_2 使用两个转动副轴线垂直的球连杆代替,如图 1(c). 这样,球铰 s_2 的 3 个转动自由度转变为两个转动自由度. 新一代假手与上一代假手比较见图 2(a),可以看出,新一代假手的拇指比上一代假手尺寸更小,外观更加仿人化. 拇指的结构图见图 2(b).

2 仿人假手拇指近指节连杆机构运动学分析

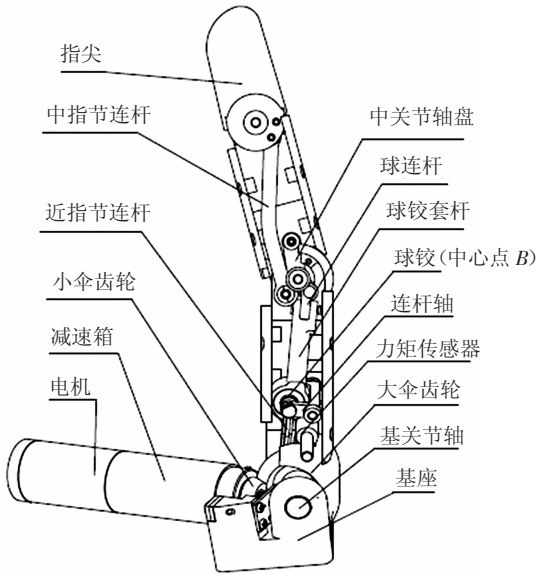
如图 2(b)所示,近指节侧板、基座、近指节连

杆与连杆轴组成一平面四连杆机构,近指节侧板、连杆轴、球铰套、球连杆与中关节轴盘组成一空间四杆机构. 球铰中心点 B 是此平面四杆机构和空间四杆机构的公共点,通过对这两个机构分别进行分析,推出 B 点的坐标值,建立方程,进行运动学计算.



新一代假手 上一代假手

(a)两代假手比较图



(b)拇指结构图

图 2 两代假手比较及拇指结构图

2.1 拇指近指节平面四杆运动学分析

为空间四杆计算方便,坐标原点 O_0 设置在通过球铰中心 B 且垂直于基关节轴的平面与基关节轴的交点处, z_0 轴与基关节轴重合, x_0 轴垂直于基关节转动轴线与中关节转动轴线所形成的平面, y_0 由右手定则确定. 建立的坐标系如图 3(a)所示.

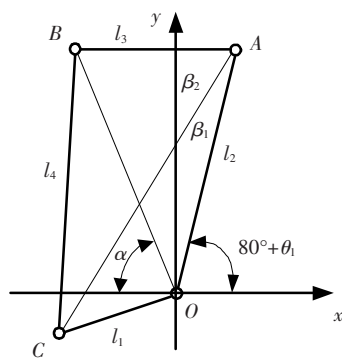
对于 $\triangle OAC$,有

$$\beta_1 = \arcsin \frac{l_1 \cos \angle AOC}{\sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \angle AOC}}$$

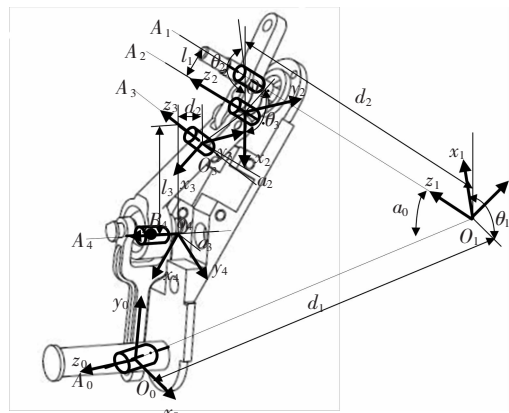
对于 $\triangle ABC$,有

$$\cos \beta_2 = \frac{l_3^2 + l_{AC}^2 - l_4^2}{2l_3 l_{AC}},$$

对于该拇指机构 $\beta_2 < 90^\circ$, 可得



(a) 平面四杆运动学分析图



(b) 空间四杆的连杆坐标系

图3 平面四杆运动学分析和空间四杆的连杆坐标系

$$\beta_2 = \arccos \frac{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 - l_4^2 - 2l_1l_2\cos\angle AOC}{2l_3\sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2\cos\angle AOC}},$$

同理可得

$$\angle AOB = \arcsin \frac{l_3\sin\beta}{l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3\cos\beta}.$$

其中, $\beta = \beta_1 + \beta_2$.

则 $\alpha = 180^\circ - (80^\circ + \theta_1) - \angle AOB = 100^\circ - \theta_1 - \angle AOB.$

其中, θ_1 为输入角.

则球铰中心 B 点的坐标

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{OB}\cos\alpha \\ l_{OB}\sin\alpha \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_3l_3 + s_3d_4 + l_2)c_{12} + c_1l_1 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}(c_3l_3 + s_3d_4 + l_2)s_{12} + \frac{1}{2}c_3d_4 - \frac{1}{2}s_3l_3 + \frac{\sqrt{3}}{2}s_1l_1 - \frac{1}{2}(d_1 + d_2) \\ \frac{1}{2}(c_3l_3 + s_3d_4 + l_2)s_{12} - \frac{\sqrt{3}}{2}c_3d_4 + \frac{\sqrt{3}}{2}s_3l_3 + \frac{1}{2}s_1l_1 + \frac{\sqrt{3}}{2}(d_1 + d_2) + d_5 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

其中: $c_{ij} = c_i c_j - s_i s_j, s_{ij} = c_i s_j + s_i c_j, d_5$ 为坐标原点 O_4 到 B 点沿 z_4 轴的距离.

为模仿人手指的运动,取中关节转动角与

2.2 拇指近指节空间四连杆运动学分析

对拇指空间四杆机构建立坐标系如图 3(b) 所示, O_0 坐标系与平面四杆坐标系重合, 连杆的 Denavit-Hartenberg 参数如表 1 所示.

表 1 连杆的 Denavit – Hartenberg 参数表

连杆 i	变量 θ_i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	l_{i-1}	d_i
1	θ_1	30	0	d_1
2	θ_2	0	l_1	d_2
3	θ_3	90	l_2	0
4	θ_4	90	l_3	d_4

在这里, $0 \leq \theta_1 \leq 45^\circ, 0 \leq \theta_2 < 180^\circ, 0 \leq \theta_3 < 90^\circ, 0 \leq \theta_4 < 90^\circ$.

相邻连杆坐标系之间的齐次变换矩阵是:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2}s_1 & \frac{\sqrt{3}}{2}c_1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2}d_1 \\ \frac{1}{2}s_1 & \frac{1}{2}c_1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_1 \\ s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & -1 & -d_4 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

其中: $s_i = \sin \theta_i, c_i = \cos \theta_i$.

则空间四杆的坐标变换矩阵

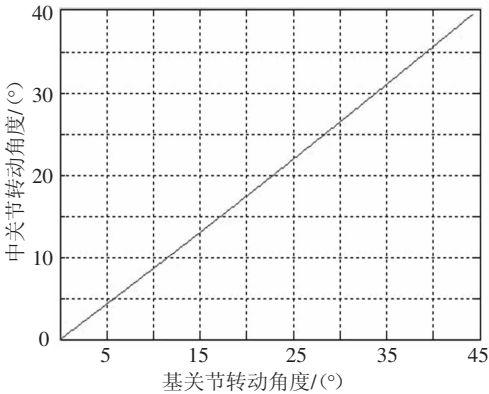
$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4,$$

可得 B 点的坐标:

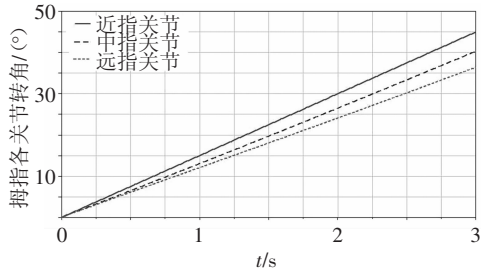
基关节转动角 $\theta_2 : \theta_1 = 0.9 : 1.0$. 根据人手指近指节的尺寸, 可以确定 l_2, l_3 和 d_i 的值, 则由 (1)(2) 联立, 并注意到 θ_i 的变化范围即可求得中

关节轴盘 l_1 的值.

图 4(a)为通过 Matlab 得出的拇指中关节与基关节转动角度关系曲线. 图 4(b)为通过 ADAMS 仿真得到的拇指各关节转角与时间关系曲线.



(a) 中关节与基关节转动角度关系曲线



(b) 拇指各关节转角与时间关系曲线

图 4 中关节与基关节转动角度关系曲线和拇指各关节转角与时间关系曲线

3 仿人假手力矩和位置传感装置设计

3.1 力矩传感装置设计

设计了基于应变片的一维力矩传感器,安装在手指的基关节上,用来测量手指的抓取力矩. 传感器和电机驱动部分相连,把电机的扭矩传递给各个手指. 基关节力矩传感器的弹性体作为一个机械部件连接在基关节轴和驱动连杆之间,由 ANSYS 对其进行受力分析,找出其应变最大处,贴应变片. 它反映了抓取过程中近指节、中指节和远指节与物体接触的时间和力的大小.

根据各弹性体在手指中的实际受力情况,要求弹性体在电机额定力矩的驱动下,中间应变为 $1 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$ 左右,以此来确定弹性体的基本结构. 对力矩传感器进行了静态标定实验,由标定所得数据可知,在力矩传感器末端加负载 50 N 时,力矩传感器的应变为 $0.74 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$. 通过 ANSYS 分析,力矩传感器末端加负载 50 N 时,平均应变为 $0.81 \times 10^{-3} \text{ mm/mm}$,说明力矩传感器实验与理论相符.

3.2 位置传感装置设计

根据霍尔效应原理,将磁钢固定在减速箱输出轴上的转盘边沿,转轴转动时,转盘随转轴旋转,磁钢也将跟着同步旋转,磁钢所产生的磁场也将随着变化,安装在转盘上方的霍尔器件,受磁钢所产生的磁场的影响,将产生与位置变化相关的正余弦电压信号. 根据霍尔器件产生的电压值可以计算出转轴的绝对位置. 图 5 为手指在伸展/弯曲时位置传感器输出信号. 该位置传感器能够测得 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的绝对位置,转轴的转动范围为 108° ,设计的位置传感器能够满足需要.

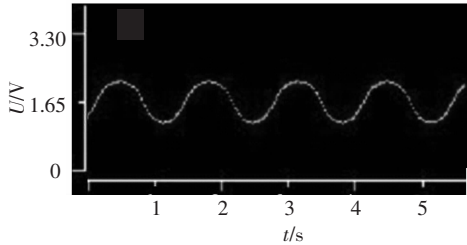


图 5 手指在伸展/弯曲时位置传感器信号图

4 仿人假手的控制系统设计和抓取实验

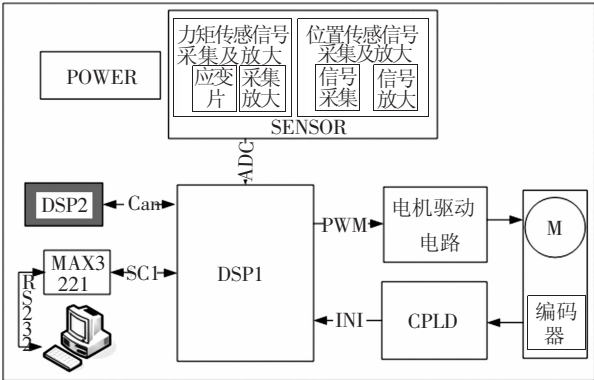
假手的控制系统采用主、从双 DSP 分布式控制结构,由驱动和传感系统和上层主控制系统组成.

如图 6 所示,主控制系统中的 DSP2 作为主控制器置于手臂筒内,以减少手掌的体积,它负责整个电气系统的处理与决策. DSP2 将处理完的肌电 (EMG) 信号转换为电动机动作指令后,通过 CAN 总线把命令发给驱动和传感系统控制器的 DSP1.

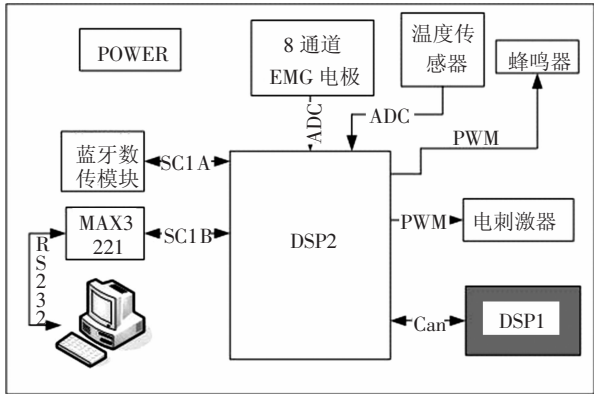
驱动和传感系统采用 DSP 加 CPLD 的基本设计思路. 根据就近原则 DSP1 与 CPLD 置于手掌内,电机编码器把信号返还给 CPLD 进行处理,获得手指的速度信息并发给 DSP1. 在功能上,实现力矩传感器、位置传感器信号的计算,从而获知手指的力矩和绝对位置信息. 驱动和传感系统由自己的系统电源转换模块为 DSP 供电,但和主控制系统共用一对电池. 此部分通过 CAN 总线通讯,接受 DSP2 主控制系统的指令,并根据相应的指令驱动电机工作,另外它还可以通过 DSP1 的 SCI 口经由 MAX3221 转为 RS232 串口与 PC 机进行通信.

人手抓握物体一般包括精确抓取、力量抓取、捏拿等抓握方式,在抓取物体时,拇指起到了很重要的作用,没有拇指施加力,其他手指只能完成很小直径的柱状物体的抓握. 图 7 为假手分别进行抓取 U 盘(手指正向捏取)、抓取乒乓球(三指捏取)、抓取水瓶(柱状抓握)和握拳图. 实验证明,

假手能够完成人手大部分抓取功能,且运动速度快,抓取力大且稳定,运动轨迹仿人化,能够满足残疾人基本生活需要.



(a) 驱动和传感系统



(b) 主控制系统

图6 假手的控制系统



图7 假手抓取实验和假手握拳图

5 结 语

1) 基于耦合驱动原理对拇指机构进行了设计和实验,并集成了力矩和位置感知功能.

2) 拇指的特点是:能够感知拇指的绝对位置和指尖出力,运动速度快且在运动的起点和终点没有震动,尺寸略小于正常人的拇指,运动轨迹仿人化,能够满足残疾人基本生活需要.

3) 与上一代假手相比,手指的出力更大,运动更稳定,抓取速度更快.

参考文献:

[1] CARROZZA M C, MASSA B, MICERA S, *et al.* The development of a novel biomechatronic hand——ongoing research and preliminary results [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(2):108 – 114.

[2] CARROZZA M C, MASSA B, DARIO P, *et al.* A two DOF finger for a biomechatronic artificial hand [J]. Journal Technology and Health Care, 2002, 10(2):77 – 89.

[3] MASSA B, ROSELLA S, CARRIZOZO M C, *et al.* Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington DC:[s. n.], 2002:28 – 36.

[4] YANG Jingzhou, PITARCH E P, ABDEL-MALEK K, *et al.* A Multi-Fingered Hand Prosthesis [J]. Mechanism and machine theory, 2004, 39: 555 – 581.

[5] DOSHI R, YEHC C. The design and development of a gloveless endoskeletal prosthetic hand [J]. Journal of Rehabilitation Research and Development, 1998, 35 (4):388 – 395.

[6] DECHEV N, NAUMANN S. Multiple Finger, Passive adaptive grasp prosthetic hand[J]. Mechanism and Machine theory, 2004, 36:1157 – 1173.

[7] PONS J L, ROCON E, CERES R. The MANUS-HAND dextrous robotics upper limb prosthesis: Mechanical and manipulation aspects [J]. Autonomous Robots, 2004, 16:143 – 163.

[8] HUANG Hai, JIANG Li, ZHAO Da-wei, *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;IEEE, 2006:3791 – 3796.

[9] HUANG Hai, JIANG Li, LIU Yi-wei, *et al.* The Mechanical Design and Experiments of HIT/DLR Prosthetic Hand [C]//2006 IEEE International Conference on ROBOTICS and BIOMIMETICS. Kunming, China; IEEE, 2006: 896 – 901.

(编辑 杨 波)