

文章编号: 1002-0446(2002)06-0530-05

人手抓持识别与灵巧手的抓持规划*

李继婷 张玉茹 张启先

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘要: 本文研究灵巧手采用指尖抓持方式时的抓持规划方法. 在相同的操作环境和操作对象下, 由人手决定抓持接触点的位置, 利用人手运动测量装置测量人手抓持位置, 通过一定的映射关系将其转换为灵巧手的抓持位置及其掌系的位姿, 再根据灵巧手自身的结构通过运动学反解确定其抓持位形.

关键词: 灵巧手; 人手抓持; 运动学

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

GRASP IDENTIFICATION OF HUMAN HANDS AND GRASP PLANNING OF DEXTEROUS HANDS

LI Ji-ting ZHANG Yu-ru ZHANG Qi-xian

(Robotics Institute of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Abstract: A method for robotic dexterous fingertip grasp planning is presented. The master-slave manipulation method is adopted. The grasp points are determined by human hand wearing the measuring apparatus. And then the data are mapped into the grasp point positions and palm pose of the dexterous hand. The grasp configuration is then solved with inverse kinematics of the dexterous hand.

Keywords: dexterous hand, fingertip grasp, kinematics

1 引言(Introduction)

灵巧手的主要功能是抓持和操作物体, 抓持是操作的基础. 灵巧手在什么位置以及采用什么方式抓持物体, 是抓持规划必须解决的问题. 抓持规划的理想目标是实现自主规划, 这需要对抓持任务、被抓持物体形状、灵巧手等诸多抓持因素进行建模. 然而, 在影响抓持规划的众多因素中, 有些很难用准确的数学模型描述, 如抓持任务、某些形状复杂的物体、预抓持位形和不同抓持类型间的过渡. 另一方面, 从应用的角度看, 要实现对任意物体的抓取, 对每一种被操作的物体都建立数学模型显然是不切实际的. 为了有效地解决灵巧手的抓持规划问题, 目前一些研究者采用了一种新的向人手学习的主从操作策略, 核心思想是将人纳入控制系统回路, 由人作规划, 由灵巧手实施运动, 从而使人的智能与机器人的机械运动能力有效结合. 例如, 美国国家航空航天局

(NASA) 所属 JPL 实验室通过手上佩带式运动测量装置, 将人手关节的运动映射成灵巧手关节的运动^[1]. NASA 的 Johnson 空间中心通过在小臂处测量人手运动的肌电信号进行人手与灵巧手之间的运动映射^[2]. 德国宇航研究中心(DLR) 的机器人与系统动力学研究所采用数据手套进行运动映射^[3].

就灵巧手的抓持规划而言, 实现主从操作的关键问题之一是如何将人手的抓持转换为灵巧手的抓持, 较多的研究者就此进行了研究^[1-9]. 人手与灵巧手之间的运动映射可以在关节空间和直角空间进行, 运动映射空间的选择应取决于抓持类型. 对于指端抓持, 物体与手指仅在指端接触, 主要用于操作物体或对物体位姿进行微小精确调整, 因而确定指端相对于物体的位置是一个重要因素, 而关节位置可看成指端位置的函数, 由指端位置决定. 因此对于指端抓持而言, 测量指端位置、进行直角空间映射是合

* 基金项目: 国家自然科学基金(59985001) 和国家教育部博士点基金(2000000605) 资助项目.

收稿日期: 2002-05-27

理的选择.

实现主从操作的另一个关键是人手运动识别. 目前的研究大多通过人手佩戴主操作装置或数据手套来测量人手关节运动, 建立人手或主操作装置的运动学模型, 然后将其映射为灵巧手关节的运动, 或是建立人手关节角与其指尖抓持位置的关系, 再将其映射为灵巧手的运动. 佩戴主操作装置使人手的运动受到限制, 灵活性减弱, 同时因灵巧手与人手的差别, 关节之间的运动映射精度不高. 数据手套对人手的运动限制较少, 但映射精度不高的问题更为突出. 测量人手的肌电信号以获取运动参数的思路, 虽然可以克服手指运动受限制的问题, 但准确、可靠地提取人手运动参数是一个正待解决的难题.

本文研究指端抓持, 研究对象为仿人灵巧手, 在相同的操作环境和操作对象下, 由人手决定抓持物体时的接触点, 灵巧手通过调整其手掌的位姿, 使其指端分别在上述接触点抓持物体, 从而保证抓持稳定. 我们采用的测量系统能够直接测量人手抓持位置, 利用灵巧手与人手相似的特点, 借鉴人手的抓持经验, 建立从人手到灵巧手的映射关系, 以此确定灵巧手抓持相同物体时的指端位置和手掌位姿, 通过

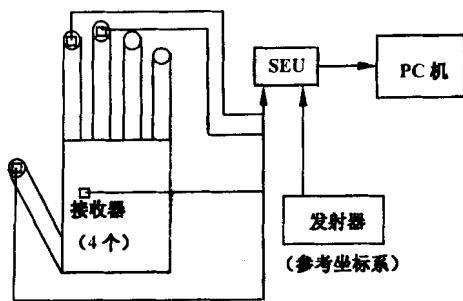


图 1 人手运动测量系统

Fig. 1 Measurement system of human hand motion

为此, 需要恰当地设计人手与接收器的接口装置. 我们以 BH-3 灵巧手为物理样机, 其仿真模型如图 5 所示, 它有三个手指, 每个手指有三个自由度, 指尖外形为一半球. 为叙述方便, 我们将佩带于人手指端的接口装置称为指端佩带器, 其外形为与 BH-3 灵巧手相同的四分之一的球壳, 如图 2 所示. 图中, O_{RV} 为接收器上的测量点, O_P 为人手指端佩带器的球心.

为了使该指端佩带器适应人手指粗细的变化, 在接收器与指端佩带器中加上调整垫片, b 为调

对灵巧手手掌位姿的规划, 实现最优的抓持位形.

2 人手抓持识别 (Fingertip grasp recognition)

为了提高人手运动测量系统的精度, 一个重要的手段是采用尽量简单的测量系统和直接的测量手段, 这样既可以简化运动映射关系, 又可以降低系统的成本. 我们采用由美国 Pohelmus 公司生产的空间位置跟踪仪 FASTRAK, 它包含一个发射器和四个接收器, 并都已分别定义了各自的坐标系, 在其有效工作范围内可测量接收器相对于发射器的空间位置和姿态.

如图 1 所示, 测量人手抓持时, 由发射器定义参考坐标系, 被抓物体相对于发射器位置固定, 人手手背佩带一个接收器, 每手指指端各佩带一个接收器 (由于 FASTRAK 本身只提供四个接收器, 因而最多可测量三个手指), 人手抓住物体后, 测量手指接收器和手背接收器在发射器坐标系 (参考坐标系) 中的位姿, 其中, 手指接收器的位姿用来计算手指球心在参考系中的位置, 手背接收器的位姿用来确定灵巧手掌系在参考坐标系的初始位姿.

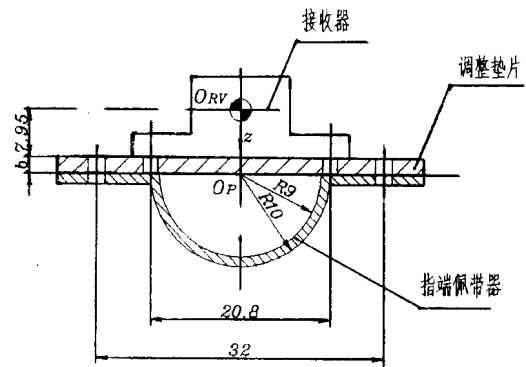


图 2 指端接收器的佩带

Fig. 2 Wearing of receivers on fingertips

整垫片的厚度, 接收器的被测点距其底面的距离为 7.95 毫米.

3 抓持映射 (Grasp mapping)

抓持映射的任务是根据上述测量所得的点 O_{RV} 的坐标和其坐标系在参考坐标系中的方向余弦矩阵, 确定灵巧手抓持相同物体时在参考系中的手指末端位置和手掌的位姿.

3.1 指端位置

由于人手指端佩带器与 BH-3 灵巧手的外形

尺寸完全相同,所以人手抓持物体时指端佩带器的球心位置即为灵巧手抓持相同物体时的指端球心的位置.指端佩带器相对于接收器的位置由设计确定,设其球心在接收器坐标系中的位置为 r_i^{RV} ,则

$$[r_i^{RV}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ z_i^{RV} \end{bmatrix}$$

式中 $z_i^{RV} = 7.95 + b$. 设所测各接收器坐标系原点 O_{RVi} 在参考系中的坐标为 r_{RVi} , 齐次坐标变换矩阵为 T_{RVi} , 由此可计算出各手指球心在参考系中的坐标, 设为 r_i^o , 则

$$\begin{bmatrix} r_i^o \\ 1 \end{bmatrix} = T_{RVi} \begin{bmatrix} r_i^{RV} \\ 1 \end{bmatrix}$$

式中, 脚标 O 、 RV 、 i 分别代表参考坐标系、接收器坐标系和第 i 个手指, 且

$$[r_i^o] = \begin{bmatrix} x_i^o \\ y_i^o \\ z_i^o \end{bmatrix}$$

$$T_{RVi} = \begin{bmatrix} R_{RVi} & r_{RVi} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{RVi} = \begin{bmatrix} x_{RVi} \\ y_{RVi} \\ z_{RVi} \end{bmatrix}$$

式中 R_{RVi} 为各接受器坐标系在参考系中的方向余弦矩阵, 它和 r_{RVi} 都由实验测得. 因此, 上述计算值 r_i^o 即可作为灵巧手的指端在参考系中的位置.

3.2 掌系的初始位姿

在图3中, O - XYZ 代表参考坐标系, O_R - $x_R y_R z_R$ 和 O_H - $x_H y_H z_H$ 分别代表灵巧手掌系和人手掌系, O_P - $x_P y_P z_P$ 代表灵巧手指端球心坐标系, C_1 、 C_2 、 C_3 分别为抓持接触点, C 为所有抓持接触点的中心, 灵巧手掌系在参考系中的初始位姿用 T_R^o 表示.

为了确定合理的 T_R^o , 使得各抓持接触点均在灵巧手各手指的工作空间内, 在此借鉴人手的抓持姿态, 即让灵巧手采用与人手相似的姿态去抓持物体. 令灵巧手掌系在参考系中的齐次坐标变换矩阵 T_R^o 为

$$T_R^o = \begin{bmatrix} R_R & r_R^o \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad r_R^o = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix}$$

其中, R_R 为灵巧手掌系在参考系中的方向余弦矩阵, 由人手掌系与灵巧手掌系的标定确定, 如果两者相同, 则为单位阵. r_R^o 为灵巧手掌系的原点 O_R 在参

考系中的位置. 为了确定 r_R^o , 我们认为, 不同大小的人手在相同的接触点上抓持相同的物体时, 为了使手指尽可能的舒适及自然抓持, 大手距被抓物体相对于小手而言会远些. 在此, 不妨假设各手掌距物体的距离与其手指的长短成正比. 设三指抓持时指端的抓持点分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 , C_1 、 C_2 、 C_3 的几何中心为 C , 则根据上述分析有

$$\frac{CO_R}{CO_H} = k \tag{1}$$

考虑到手掌距物体的距离还与其手指的抓持位形有关, 在此我们取 $k = k_0 \cdot k_{max}$, $k_0 = L_0/L_H$, $k_{max} = L_R/L_H$, 式中, L_R 为灵巧手手指的长度, L_H 为人手手指的长度, L_0 为人手抓持时指端距其指根关节的距离, 它随抓持位形变化. 因而由(1)式所确定的比例 k 同时考虑了手指长短和抓持位形对手掌抓持位置的影响. 设点 C 在参考坐标系下的坐标为 (x_C, y_C, z_C) , 则

$$x_C = (x_1 + x_2 + x_3)/3$$

$$y_C = (y_1 + y_2 + y_3)/3$$

$$z_C = (z_1 + z_2 + z_3)/3$$

式中 (x_i, y_i, z_i) 为各抓持点在参考系中的坐标, $i = 1, 2, 3$. 则灵巧手掌系原点 O_R 在参考坐标系下的坐标 (x_R, y_R, z_R) 可由下式计算

$$\frac{x_R - x_C}{x_H - x_C} = \frac{y_R - y_C}{y_H - y_C} = \frac{z_R - z_C}{z_H - z_C} = k$$

式中, (x_H, y_H, z_H) 为测得的手背接收器在参考系中的坐标. 至此, T_R^o 已完全确定.

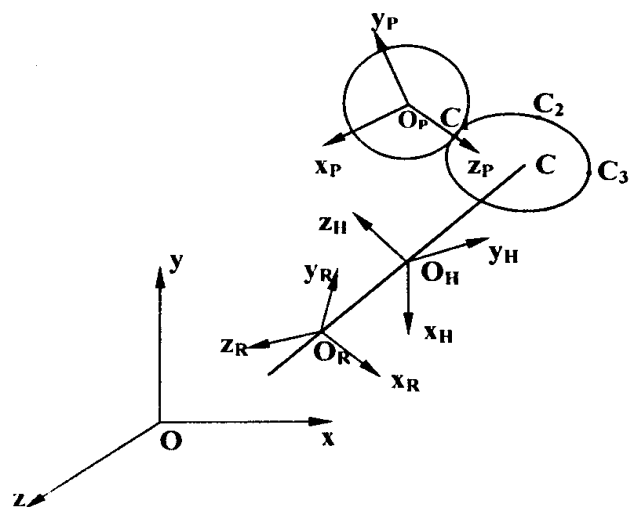


图3 人手掌系与灵巧手掌系

Fig. 3 Palm systems of human hand and dexterous hand

4 抓持仿真 (Grasp simulation)

在仿真实验中, 定义人手三个手指指根所在的平面为人手掌系平面, 三个指根关节的中心为人手掌系坐标原点, 灵巧手掌平面及掌系原点的定义与人手相同. BH-3 灵巧手与人手模型的手指长度之比为 1.4, 抓持时取 $k=1.2$. 在参考系中灵巧手掌系相对于人手掌系的初始旋转矩阵为

$$R = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

被抓物体为一半径为 40mm 的球, 人手所确定的三个抓持点在 $z=40\text{mm}$ 的大圆上均匀分布. 下图中图 4 为人手抓住球体时的位形, 图 5 为灵巧手抓住球体时的位形, 图 6 为灵巧手各指端在抓持过程中的位置, 仿真结果表明灵巧手各指端均在指定的位置抓持物体.



图 4 人手抓持位形
Fig. 4 Grasp configuration of human hand

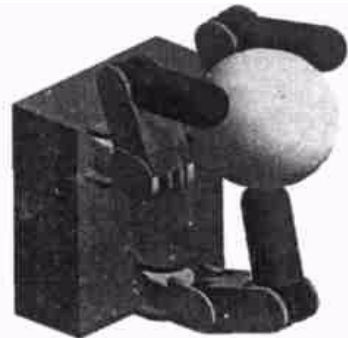


图 5 灵巧手抓持位形
Fig. 5 Grasp configuration of dexterous hand

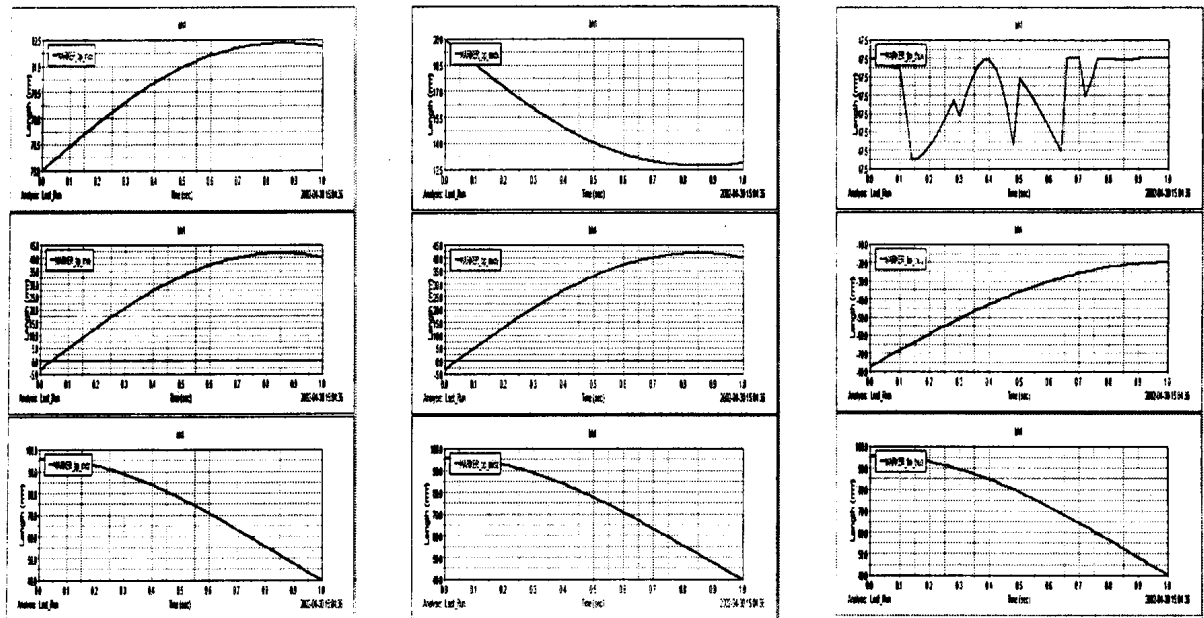


图 6 灵巧手各指端在抓持过程中的位置
Fig. 6 Grasp positions of human hand fingertips

5 结论(Conclusion)

本文采用主从操作方式实现仿人灵巧手的指尖抓持规划,即由人手决定抓持点的位置,测量系统可直接测量人手指尖抓持位置,通过规划灵巧手掌系的位姿使其在上述抓持点抓持物体,实现灵巧手的抓持规划。

文中提出的规划方法,人手参与抓持物体,不需对物体进行建模,适用于被操作物体形状复杂、难以进行数学描述或建模的情况,其限制是操作环境允许人手操作物体。

在指尖接触点不变的条件下,抓持位形可有无穷解,因此,可根据灵巧手自身的结构,定义适当的目标函数,确定抓持时的最优位形。利用本文提出的方法,可保证初始抓持位形在可行域,从而保证优化的顺利进行。

虽然仿真实验中被抓持物体为球,但由于映射关系本身只与抓持点有关,而与物体形状无关,故本文所提出的规划方法不受被抓物体的形状的限制。即在灵巧手的关节运动空间内,可抓取任意形状的物体。

由于我们研究的是仿人灵巧手,在规划灵巧手的抓持时借鉴了人手的抓持经验,因而算法的精度与灵巧手的结构有关,灵巧手的结构越接近人手,则算法越有效。在我们的仿真实验中,BH-3手在结构上与人手有所不同,其指根关节只有一个侧摆的自由度,人手的仿真模型中指根关节有侧摆和屈曲两个自由度。实验表明文中提出的映射方法对于BH-3手是完全适用的。

另外需要指出的是,在我们的仿真实验中,人手抓持点的位置及手掌的位姿都是事先确定好的,而在实际的规划系统中,则需要相关的测量装置测量

人手的有关抓持信息,我们正对这一问题进行研究。

参考文献 (References)

- [1] Jau. Dextrous telemanipulation with four fingered hand system. IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 1996. 338- 343
- [2] Ferry, *et al.* Myoelectric teleoperation of a complex robotic hand. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1996, **12**(5): 775- 877
- [3] M Fischer *et al.* Learning Techniques in a Dataglove Based Telemanipulation System for the DLR Hand. In Proc 1998 IEEE Int Conf Robotics and Automation, 1998. 1603- 1608
- [4] Ch. Borst, *et al.* A Fast and Robust Grasp planner for Arbitrary 3D Objects. in Proc 1999 IEEE Int Conf Robotics and Automation, 1999. 1890- 1896
- [5] S B Kang, K Ikeuchi. Toward Automatic Robot Instruction from Perception- Mapping Human Grasps to Manipulator Grasps. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1997, **13**(1): 81- 95
- [6] Haruhisa Kawasaki, *et al.* Virtual Teaching Based on Hand Manipulability for Multi-Fingered Robots. In Proc 2001 IEEE Int Conf Robotics and Automation, 2001. 1388- 1393
- [7] Ammon K, Wright, *et al.* Kinematic Mapping Between the EXOS Handmaster Exoskeleton and the UTAH/MIT Dextrous Hand. in Proc 1990 IEEE Int Conf on Systems Engineering, 1990. 101- 104
- [8] Robert N, Rohling and John M, Hollerbach. Optimized Fingertip Mapping for Teleoperation of Dextrous Robot Hands. In Proc 1993 IEEE Int Conf Robotics and Automation, 1993. 769- 775
- [9] Weston B. Griffin, *et al.* Calibration and Mapping of a Human Hand for Dexterous Telemanipulation. In Proc. 2000 ASME IMECE DSC-Symposium on Haptic Interfaces, November 2000. 1- 8

作者简介:

李继婷(1967-),女,硕士。研究领域:机械设计及理论,机器人灵巧手。