

文章编号: 1002-0446(2003)05-0409-05

机器人多指灵巧抓持规划*

李继婷, 张玉茹, 郭卫东

(北京航空航天大学机器人研究所 100083)

摘要: 抓持规划是机器人灵巧手要完成预期任务所面临的一个重要问题. 本文采用主从操作方式进行灵巧手的指尖抓持规划, 由人手决定抓持接触点的位置, 灵巧手通过调整其手掌的位置和姿态保证各手指在人手指定的位置上抓持物体. 根据灵巧手的操作特点, 提出以关节灵活度来描述关节运动各向同性的能力, 并据此定义灵巧手操作灵活度, 作为灵巧手抓持位形性能的评价指标. 以最大操作灵活度作为优化目标函数, 寻求最优的抓持性能. 同时, 借鉴人手的抓持经验, 通过主从操作方式, 建立从人手到灵巧手的运动映射关系, 从而为手掌位置优化问题提供合理的初值. 仿真实验结果说明了文中方法的有效性.

关键词: 抓持规划; 指尖抓持; 抓持优化; 可操作度; 灵活度

中图分类号: TP24

文献标识码: B

GRASP PLANNING FOR ROBOTIC MULTI-FINGERED HANDS

LI Ji-ting, ZHANG Yu-ru, GUO Wei-dong

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

Abstract: Grasp planning is one of the key issues for dexterous robotic hands to accomplish desired tasks. A promising approach is to teach the robot hands by human operator. Due to the technical limitation of human-machine interface, the grasp configuration learning from the human hand needs to be improved. This paper presents a method to optimize the grasp from the initial configuration provided by the human hand. A quality measure based on joint motion isotropy is defined to evaluate grasp configurations. Human grasp experience is used to provide a desired initial configuration. The position and orientation of the palm is optimized based on the quality measure. The process of optimization is simulated in a virtual environment and the resulting optimal grasps illustrate the validity of the method.

Keywords: grasp planning; fingertip grasp; grasp optimization; manipulability; dexterity

1 引言 (Introduction)

机器人多指灵巧手是仿人形机器人的一个重要组成部分, 用来代替人手完成某些繁重、危险及有害环境下的工作, 或是在人手不可及的工作场合工作, 如航空、航天、深海等环境. 近 20 多年来已经有许多仿人手的机器人多指灵巧手样机研制出来, 但到目前为止, 它们都还仅局限于实验室的研究工作, 其中一个最重要的原因就是灵巧手的抓持规划问题尚未得到完善的解决.

灵巧手的抓持方式可大体上分为精度抓持和力度抓持两大类. 精度抓持又称为指尖抓持, 即灵巧手只在指尖与物体接触, 其突出的优点是可以对物体

进行灵巧操作. 对于指尖抓持, 抓持规划的任务是确定抓持接触点的位置以及灵巧手手掌的位置和姿态, 这涉及到力与运动两个方面的规划问题. 在力的方面, 所规划的接触点的位置应保证手-物体系统的抓持稳定性的要求; 在运动方面, 所规划的接触点应在灵巧手的工作空间. 也就是说, 对灵巧手的抓持规划应同时满足抓持稳定性和灵巧手的工作空间的要求. 为此, 可首先对灵巧手进行运动规划, 根据运动规划所确定的抓持位型进行满足抓持稳定性的力的规划.

对于运动规划而言, 目前在技术手段上一个可能的解决方案是采用遥操作或称为主从操作方式.

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

收稿日期: 2002-12-01

由于目前的仿人灵巧手无论是在运动学关系还是在功能上都与人手相似,因此通过人手示教的方式进行灵巧手的抓持规划方法成为可能,引起了许多研究者的兴趣.借助于视觉或数据手套等人机交互装置,人们已经提出了不同的遥操作系统和主从运动映射方法^[1~7].我们的前期研究工作^[8]针对指尖抓持方式提出了一种主从操作系统及主从运动映射关系,由人手决定抓持接触点的位置,通过一定的映射关系,确定灵巧手各指尖在笛卡尔坐标系中的位置.

我们认为,灵巧手是否能在指定位置抓住物体,取决于手掌的位置和姿态是否合理.一般来说,对于给定的接触点的位置,手掌的位姿有无穷解,这一点从人手的抓持经验可以看出.手掌位姿不同,抓持时各手指的位形也不同,因此可根据某种抓持性能评价指标确定最优的手掌位姿.为了确定最适合于完成给定任务的抓持位形,人们已提出了不同的抓持位形性能评价指标,Salisbury和Craig^[9]提出根据灵巧手指的“各向同性”选择抓持位形,Yoshikawa^[10]提出用可操作度来评价单个机器人机械臂的运动能力,A. Bicchi^[11]等人将末端输出速度的加权模与关节输入速度的加权模的比值定义为效率指数,用以评价系统在某位形下的操作性能.相对于单个机械臂而言,机器人灵巧手由于其结构尺寸小,可进行灵巧操作及需多指协调等特点,当其操作物体时,其各手指末端相对于手掌的位移变化有限,手指对物体的操作灵活性主要体现在各手指关节角在各运动方向的连续运动能力上.基于此,本文提出分别以关节灵活度和灵巧手操作灵活度来评价手指各关节和灵巧手的操作灵活性,并以使手的操作灵活度最大为优化目标,寻求灵巧手掌系位置的最优解.为得到优化过程所需的合理的初值,借鉴人手的抓持经验,根据人手手掌的抓持位姿,结合手的大小及抓持位型等因素的影响,来确定灵巧手掌的初始位姿.仿真环境下的抓持实验证明了文中方法的有效性.

2 手掌位置优化(Palm position optimization)

本文采用主从操作方式进行灵巧手的抓持规划,抓持接触点的位置由人手决定,通过调整灵巧手掌的位姿来保证灵巧手的各指尖在预期的位置抓持物体.对于手指非冗余的灵巧手,手掌位姿确定后,灵巧手各手指的抓持位形就随之确定.因而灵巧手是否能在指定位置抓住物体,取决于手掌的位置和姿态是否合理.一般来说,对于给定的接触点的位置,手掌的位姿有无穷解,这一点从人手的抓持经验

可以看出,手掌位姿不同,抓持时各手指的位形也不同,因此可根据抓持任务确定相应的抓持性能评价指标,用以确定最优的手掌位姿.在本文的规划策略中,灵巧手掌的姿态一经确定后不再改变,仅通过调整手掌的位置来实现最优的抓持位形.通过规划灵巧手的手掌位置进行灵巧手的抓持规划,不仅可以降低优化问题的维数,而且,手掌作为机器人手臂的末端,有利于臂手集成系统的规划.

首先建立坐标系.在图1中, $O-xyz$ 、 $O_H-x_Hy_Hz_H$ 和 $O_R-x_Ry_Rz_R$ 分别代表参考坐标系、人手坐标系和灵巧手坐标系.灵巧手各指尖的抓持位置分别为 C_1 、 C_2 、 C_3 ,灵巧手掌系的坐标原点为 O_R ,它在参考系中的坐标为 (x_R, y_R, z_R) .

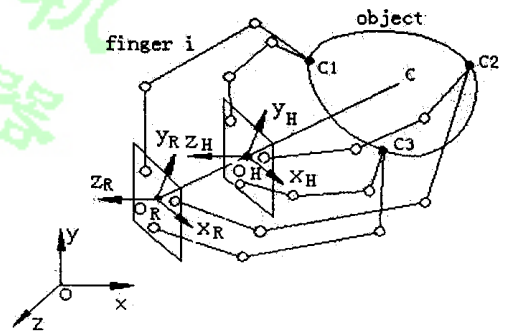


图1 主从操作运动映射

Fig.1 Motion mapping from master to slave

手掌位置优化的任务即在各指尖抓持点确定的前提下,寻找最优的掌系坐标原点 O_R 的位置,用 $O_R(x_R^*, y_R^*, z_R^*)$ 表示,使得在该位置下的抓持位形具有最优的抓持性能.

2.1 优化目标及性能评价

对于机器人灵巧手而言,指尖抓持的突出优点就是可对物体进行灵巧操作,因此操作灵活性是衡量其抓持性能的一个重要指标.同时,灵巧手对物体的抓持与操作又不同于单个机械臂.首先,手的抓持及操作任务需要由多个手指的协调配合来完成,因此灵巧手的灵活度或可操作度由各手指的相应性能所决定.其次,相对于机械臂而言,灵巧手尺寸较小,当其操作物体时,其各手指末端相对于手掌的位移变化有限,主要用于通过滚动操作等对物体进行细微操作,改变物体的姿态,因此,手指末端速度变化不大,手指对物体的操作灵活性主要体现在各手指关节角在各运动方向的连续运动能力上,这一点从人手的运动经验上可以很直观地看到.在另一方面,与人手相比,灵巧手的优势在于其关节运动能力远远大于人手,例如,人手手指伸直时,其各屈曲关节

基本上已经处于极限状态,而灵巧手的屈曲关节一般可在其手指伸直位置双向转动,如北京航空航天大学机器人研究所开发的 BH-3 型灵巧手,各手指的屈曲关节可在伸直位置 $\pm 80^\circ$ 的范围内转动.因此,对灵巧手进行运动规划时,应充分发挥其关节角的运动能力.基于上述分析,我们认为灵巧手的操作灵活性本质上来说是由各个手指中的每一个关节的灵活性来决定的,因此,本文提出了关节灵活度和灵巧手操作灵活度的定义,并以此作为手指抓持性能的评价指标.

定义 1 关节灵活度

定义关节灵活度为关节沿各个运动方向的连续运动的相对能力,即关节运动的各向同性性.

由于目前开发出来的灵巧手样机各关节均为转动关节,故不失一般性,在此以转动关节为例.设关节 i 的最大和最小转角分别为 $\theta_{i\max}$ 和 $\theta_{i\min}$,在某一位形下的转角为 θ_i ,令 $\theta_{im} = \frac{\theta_{i\max} + \theta_{i\min}}{2}$,称为理想转角,

$\Delta\theta_{i\max} = \frac{\theta_{i\max} - \theta_{i\min}}{2}$, $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{im}$ 则定义 $dxt_i = 1 - \frac{|\Delta\theta_i|}{\Delta\theta_{i\max}}$ 为关节 i 的灵活度.

从定义可看出,关节灵活度描述了在某一位形下,关节转角偏离其理想转角的相对程度,也即关节在各个转动方向上的连续转动能力的大小.当 $\theta_i = \theta_{i\max}$ 或 $\theta_i = \theta_{i\min}$ 时,关节只能单向连续转动,丧失了双向连续转动的能力,即各向同性性最差,因此灵活性最差,此时关节的灵活度 $dxt_i = 0$.当 $\theta_i = \theta_{im}$ 时,灵活度 $dxt_i = 1$,此时关节可双向连续转动的范围最大,为 $\frac{\theta_{i\max} - \theta_{i\min}}{2}$,即双向连续转动的能力最强,是各向同性的,因此灵活性最好,因而称之为理想转角.关节转角越接近理想转角,各向同性性越好,灵活度越大,表明关节双向连续转动的相对能力就越强,关节就越灵活.由定义知, dxt 的取值范围为 $0 \leq dxt_i \leq 1$.

定义 2 灵巧手的操作灵活度

我们认为灵巧手能否灵活地操作物体取决于手指各关节的运动各向同性性.任何一个关节的运动各向同性性即灵活性,都会影响灵巧手操作的灵活性.灵巧手的操作灵活性由手指各关节中灵活度最小的关节所决定,因此定义手的灵活度为各手指关节中最小的关节灵活度,用 DXT 表示,即 $DXT = \min(dxt_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为灵巧手的关节数.

根据灵巧手的灵活度的定义,定义优化目标函

数为 $\max(DXT)$.

在该优化问题中,优化变量为掌系的原点位置坐标 x_R, y_R, z_R .当 x_R, y_R, z_R 变化时,各关节角 θ_i 随之变化,各关节灵活度 dxt_i 也随之变化,手的灵活度 DXT 也发生变化,优化问题即要寻求最大的 DXT 及其对应的掌系原点坐标.

2.2 优化变量的初值

采用主从操作方式进行灵巧手的抓持规划时,抓持位置由人手决定后,灵巧手的各指尖位置随之确定.此时,灵巧手掌系的位姿(以 T_R^0 表示)决定各手指关节角的大小.掌系位姿确定后,灵巧手各手指的抓持位形就随之确定.一个合理的掌系位姿不仅能够保证各手指关节转角在其可行转角范围内,而且能够使灵巧手以较好的位形抓持物体,从而获得较优的抓持性能;反之,掌系位姿不合理,不仅不能获得较优的抓持性能,甚至不能保证各手指关节转角在其可行转角范围内,以至于不能实现预期的抓持任务.

一个合理的优化变量的初值是优化过程顺利进行的前提,为了确定手掌位姿 T_R^0 的合理的初值,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.令抓持时灵巧手掌系在参考系中的齐次坐标变换矩阵 T_R^0 为

$$T_R^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_R & \mathbf{r}_R^0 \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_R^0 = \begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{R}_R 为灵巧手掌系在参考系中的方向余弦矩阵,由人手抓持时掌系姿态与灵巧手初始掌系姿态决定,如果两者相同,则 \mathbf{R}_R 即为人手抓持时其掌系在参考系中的方向余弦矩阵. \mathbf{r}_R^0 为灵巧手掌系的原点 O_R 在参考系中的位置向量.为了确定 \mathbf{r}_R^0 ,需借鉴人手的抓持经验.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,手掌与物体之间的距离是不同的.为了使手指尽可能采用舒适及自然的抓持位形,较大的手与被抓物体的距离相对于较小的手而言会远些.在此,我们假设手掌距物体的距离与手指的长短成正比.设三指抓持时指端的抓持点分别为 C_1, C_2, C_3 ,其几何中心为 C ,点 C 在参考坐标系下的坐标为 (x_C, y_C, z_C) ,如图 1 所示,则令

$$x_C = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$$

$$y_C = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

$$z_C = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} \quad (1)$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 为各抓持点在参考系中的坐标, $i = 1, 2, 3$.

根据上述分析, 令

$$\frac{CO_R}{CO_H} \propto k_L \quad (2)$$

式中, $k_L = L_R/L_H$, L_R 为灵巧手伸直时手指的长度, L_H 为人手伸直时手指的长度.

考虑到手掌距物体的距离还与其手指的抓持位形有关, 又令

$$\frac{CO_R}{CO_H} \propto k_\theta \quad (3)$$

式中, $k_\theta = L_\theta/L_H$, L_θ 为人手抓持时指尖距其指根关节的距离, 它随抓持位形变化. 综合式(2), (3), 在此将其合并表示为

$$\frac{CO_R}{CO_H} = k = k_\theta k_L \quad (4)$$

通过上述分析可知, 由(4)式所确定的参数 k 同时考虑了手指长度和抓持位形对手掌抓持位置的影响. 设灵巧手掌系原点 O_R 及人手掌系原点 O_H 在参考系中的坐标分别为 (x_R, y_R, z_R) 、 (x_H, y_H, z_H) , 将它们代入(4)式, 得

$$\frac{x_R - x_C}{x_H - x_C} = \frac{y_R - y_C}{y_H - y_C} = \frac{z_R - z_C}{z_H - z_C} = k \quad (5)$$

由式(5)解得

$$\begin{aligned} x_R &= k(x_H - x_C) + x_C \\ y_R &= k(y_H - y_C) + y_C \\ z_R &= k(z_H - z_C) + z_C \end{aligned} \quad (6)$$

至此, 灵巧手掌系在参考坐标系中的抓持姿态及初始抓持位置便确定下来.

3 仿真实验 (Simulation experiment)

仿真实验在机械系统动力学仿真软件 ADAMS/VIEW 环境下进行. 分别建立了主从操作手的虚拟模型, 图2和图3所示分别为手指伸直时的位姿. 其中, 人手模型参考了一普通女性手的尺寸, 并做了适当简化, 三个手指的长度相等; 灵巧手为北京航空航天大学机器人研究所研制开发的 BH-3 灵巧手, 被抓物体为一半径为 40 mm 的球. 人手所确定的三个抓持点在 $z = 40$ mm 的大圆上均匀分布, 实验要求 BH-3 灵巧手在人手所决定的抓持点抓持物体. 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. 在参考系中确定灵巧手掌系姿态的方向余弦矩阵为

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

BH-3 灵巧手与人手模型的手指长度之比为 $k_L = 1.4$, 人手抓持时 $k_\theta = 0.85$, 因而取 $k = 1.2$, 由此所确定的灵巧手掌的初始位置坐标为 $O_R^0(47.5, -28, -16.04)$. 仿真结果分别如图4、图5所示. 其中图4为人手的抓持位形, 图5为灵巧手的初始抓持位形, 此时灵巧手的各关节转角自根关节开始分别为: 拇指 $(0^\circ, -18.15^\circ, -81.92^\circ)$, 食指 $(-7.26^\circ, -112.62^\circ, 104.01^\circ)$, 中指 $(7.26^\circ, -112.62^\circ, 104.01^\circ)$, 操作灵活度为 $DXT_0 = 0.06142$.

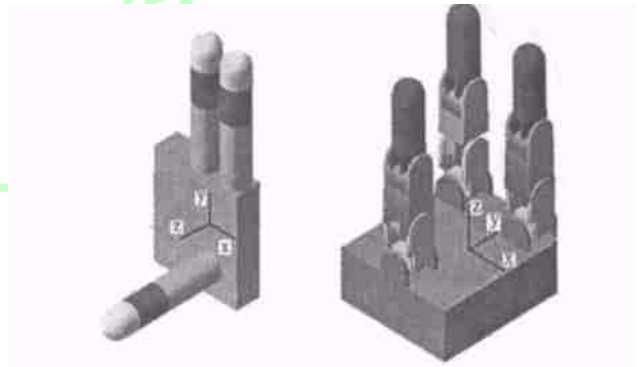


图2

图3

图2 人手虚拟仿真模型

Fig. 2 Virtual prototype for human hand

图3 BH-3 虚拟仿真模型

Fig. 3 Virtual prototype for BH-3 hand

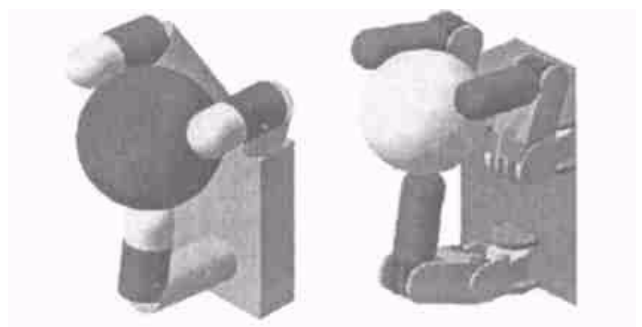


图4

图5

图4 人手抓持位形

Fig. 4 Grasp configuration of human hand

图5 灵巧手初始抓持位形

Fig. 5 Initial grasp configuration of dexterous hand

当手掌位置改变时, 由于抓持点位置不变, 因此各手指指端相对于手掌的位置变化, 各手指关节角由于受运动学关系的约束也发生变化, 抓持优化即要寻求抓持性能最优的抓持位形, 如前所述, 即为灵巧手的操作灵活度; 同时各手指关节角不仅满足运

运动学约束,还受其关节转角范围的约束,综上所述,抓持优化的数学模型表示如下:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && (-DXT) \\ & \text{subject to} && \\ & && \theta_i = f_i(x_R, y_R, z_R) \\ & && \theta_{i_{\min}} \leq \theta_i \leq \theta_{i_{\max}} \end{aligned}$$

式中, θ_i 、 $\theta_{i_{\min}}$ 和 $\theta_{i_{\max}}$ 的意义同前, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为灵巧手的关节数. 在本文的仿真实验中, $n = 9$. 上述约束中, 等式约束为灵巧手各手指应满足的运动学方程.

优化算法采用罚函数法, 优化后, 灵巧手掌系的最优位置解为 $O_R^*(47.5, -28, -16.04)$, 抓持位形仿真如图 6 所示, 此时灵巧手的各关节转角分别为: 拇指($0^\circ, -17.46^\circ, 0^\circ$), 食指($-3.79^\circ, -24.15^\circ, 29.93^\circ$), 中指($3.79^\circ, -24.15^\circ, 29.93^\circ$), 其操作灵活度为 $DXT^* = 0.75062$. 仿真结果表明灵巧手各指端不仅均在指定的位置抓持物体, 而且优化后抓持性能得到明显改善. 同时, 根据人手的抓持经验, 优化后的抓持位形(图 6)更为自然和省力.

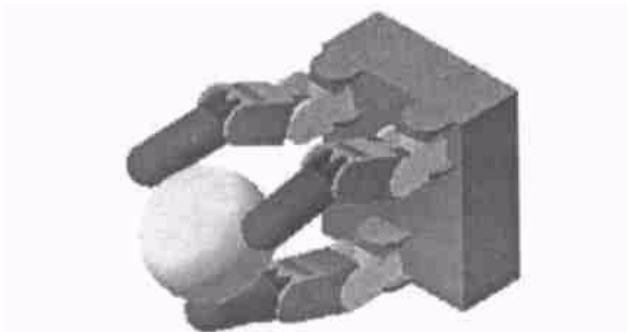


图 6 灵巧手优化抓持位形

Fig. 6 Optimal grasp configuration of dexterous hand

需要指出的是, 根据上述运动映射所确定的初始位形下的各关节转角只是运动学意义上的合理转角, 并不一定满足各关节物理极限转角的限制. BH-3 型灵巧手各屈曲关节的转角为相对于手指伸直位置为 $\pm 80^\circ$, 显然, 在初始位形下, 只有拇指的一个屈曲关节满足其物理转角的约束. 经过优化后, 各转角均在其物理关节转角范围内. 因此, 文中所定义的优化目标函数亦可在其它的优化问题中作为寻求满足关节转角约束的优化变量的一个有效手段.

4 结论 (Conclusion)

本文采用主从操作方式进行灵巧手的抓持规划, 通过调整手掌位姿使得灵巧手各手指在人手指定的抓持接触点上抓持物体. 根据灵巧手的结构和

操作特点, 提出以关节灵活度来描述关节运动的各向同性的能力, 并据此定义灵巧手操作灵活度, 作为灵巧手抓持位形性能的评价指标. 以最大操作灵活度作为优化目标函数, 寻求最优的抓持性能.

在指尖位置不变的前提下, 各手指关节转角的大小取决于手掌的位置. 手掌位置规划得合理, 可保证关节角在其转角范围内; 反之, 手掌位置规划得不合理, 关节角不在其转角范围内, 则不能完成抓持任务. 本文借鉴人手的抓持经验, 建立从人手到灵巧手的运动映射关系, 据此规划的掌系位置(即优化变量)可保证各关节角在其转角范围内, 为确定优化变量的合理初值提供了一个可行的方法.

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, 其限制是操作环境应允许人手直接操作物体.

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.

本文提出的抓持规划方法的目标是确定灵巧手掌系的位置, 这不仅保证规划的位形可行, 同时也是对机器人手臂提出了末端的运动要求, 因而更有利于臂手系统的集成.

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. Dexterous tele manipulation with four fingered hand system [A]. In: Proc. of ICRA [C]. 1996. 338 - 343.
- [2] Fischer M, et al. Learning techniques in a dataglove based tele manipulation system for the DLR hand [A]. In: Proc. of ICRA [C]. 1998. 1603 - 1608.