

滚动接触时机器人手的操纵

李松山 谌刚 熊有伦

(华中理工大学, 武汉)

摘要 多自由度多手指, 具有高度灵活性的机器人手(Robot hand)的研究受到了越来越多的学者和专家的重视. 机器人手与物体的接触形式有3类: 1) 固定点接触; 2) 滚动接触; 3) 滑动接触. 本文研究滚动接触时机器人手的操纵机理, 导出了手指尖运动之间的相容关系. 利用本文结果, 一方面可以从已知的手指尖运动求出物体(被操纵体)的运动; 另一方面, 可实现对机器人手的操纵规划, 从而使机器人手对物体实现给定操作.

关键词: 机器人手, 操纵, 规划, 相容条件.

1 引言

多自由度, 多手指, 具有高度灵活性的机器人手(RH)的研究, 对改善和扩大机器人功能具有极其重要的实际意义. 现在研究最多的机器人操纵手(Robot manipulator, 以下简称为RM)只相当于人的一只没有手掌和手指的手臂, 因此, 对环境和工作对象的适应性受到很大限制. 而且, 由于RM的工作范围较大, 不可能对工作对象实现很精确的微小操作. 所以, 在RM上配上灵活的RH无疑是吸引人的, 有着广阔的应用前景. 另外, 在RH上配上各种触觉传感器, 可对工件进行自动识别和定位, 代替一部分视觉功能, 由于目前机器人视觉技术处理很困难, 费用又大, 离实用相距甚远, 这更增加了人们对RH及其相关技术研究的兴趣. 有关RH的研究, 国外在理论和实验上都做了不少工作, 取得了大量成果. 相比之下, 国内在这一具有实际应用前景的领域研究甚少, 确有必要引起注意.

RH的最重要的功能之一是抓取和操纵物体, 因此有以下问题必须解决:

- 稳定抓持能力;
- 抓持稳定性判断;
- 操纵能力;
- 操纵机理.

可以说, 这4个问题没有一个得到了完满解决, 都有不少问题需进一步研究. 相对而言, 对前两个问题的研究多些, 但也很不全面^[1,2]. 第3个问题, 操纵能力, 也就是机器人手的工作空间分析, 研究工作比较少, 文[3]分析了固定点接触时, 两手指(平面机器人手), 3手指(空间机器人手)机器人手的工作空间, 文[4]对滚动接触时机器人手的工作空间计算作了一点探讨. 第4个问题, 即对RH操纵机理的分析, 可以说是这4个问题中最重要, 最有意义的一个. 只有对这一问题有足够的知识之后, 我们才有可能通过计算机控制RH, 对物体进行灵活的操作, 使其达到所需位置. 由于RH有多个手指, 而且手指与物体的接触点可能变动, 因此, 其操纵分析要比对RM的操纵分析复杂得多, 特别是当接触点有变化时. 文[3]对平面上的推操作中的一些力学问题进行了分析; 文[4]推导了手指关节速度与物体速度在纯滚动接触时必须具有的约束关系, 当然, 这是一个非完整约束. 文[5]分析了RH对物体的无限小操纵, 其方法不适用于对物体的有限操纵, 这将在第4节

中指出, 本文将致力于纯滚动接触时 RH 的操纵机理分析.

2 几点假设

RH 由手掌和多个手指组成(图 1), 其中每个手指中离手掌最远端的连杆叫做手指尖. 在本文的分析中作如下假设: ①物体和 RH 都是刚体; ②RH 只通过手指尖对物体进行操纵; ③接触部分是光滑连续曲线(面)(注意: 这里的光滑是几何意义上的, 并不是说没有摩擦); ④手指之间, 手指与物体之间, 其运动不发生干涉.

3 平面 RH 的操纵

在平面 RH 的操纵中, 由于滚动约束限制 2 个自由度, 故 RH 的手指尖数, 亦即手指个数, 不得小于 2. 在空间机器人手中则不得小于 3. 我们在下面的分析中, 假定这两点是成立的.

显然, 被操纵物体(以后简称物体)的运动完全决定于手指尖的运动, 操纵分析的目的在于建立手指尖运动与物体运动之间的关系, 为此, 我们考虑第 i 个手指尖与物体的作用情况(见图 2). $X_0O_0Y_0$ 固定在物体上, $X_iO_iY_i$ 固定在手指尖上, XOY 固定在手掌上, 设 $X_0O_0Y_0$ 相对于 XOY 的坐标变换矩阵为 $M(\theta, x, y)$, $X_iO_iY_i$ 相对于 XOY 的坐标变换矩阵为 $M(\theta_i, x_i, y_i)$

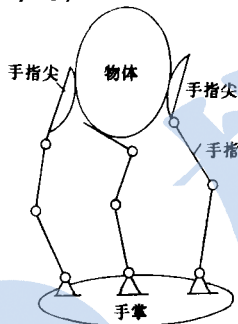


图 1 RH

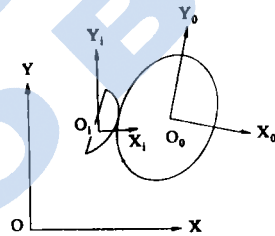


图 2 第 i 个手指尖与物体间的作用

这里

$$M(\theta, x, y) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & x \\ \sin\theta & \cos\theta & y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

另外, 设手指尖在接触区域内的轮廓曲线在 $X_iO_iY_i$ 中的矢量方程为 $r_i(s_i)$; 物体在接触区域内的轮廓曲线在 $X_0O_0Y_0$ 中的矢量方程为: $R_i(s_i)$, 其中的 s_i 为弧长参数.

$R_i(s_i)$ 在 s_i 处的 Frenet 标架为(见图 3)

$$[\vec{n}, \vec{\tau}] = [-\rho_i(s_i)R_i''(s_i), R_i'(s_i)]$$

这个标架是相对于坐标系 $X_0O_0Y_0$ 的.

$r_i(s_i)$ 在 s_i 处的 Frenet 标架为(图 3):

$$[\vec{n}', \vec{\tau}'] = [l_i(s_i)r_i''(s_i), r_i'(s_i)]$$

这个标架是相对于坐标系 $X_iO_iY_i$ 的. 这里 $\rho_i(s_i)$, $l_i(s_i)$ 为曲率半径, 注意这两个标架中一个取的是外法向, 另一个取的是内法向, 这里需要进一步假设两条曲线均没有拐点, 且其接触形式为图 4(a), 如为图 4(b)或(c)则这两个标架中的法向都同时取外或同时取内.

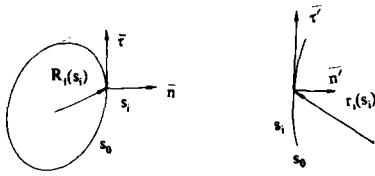
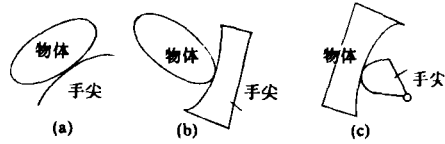
图3 $R_i(s_i)$ 和 $r_i(s_i)$ 的标架

图4 接触形式

有了这两个标架之后, 我们可立即得到纯滚动接触时手指尖运动和物体运动之间的关系, 由于这两个标架是重合的, 我们有:

$$M(\theta, x, y) \begin{bmatrix} -\rho_i(s_i)R_i'(s_i) & R_i'(s_i) & R_i(s_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = M(\theta_i, x_i, y_i) \begin{bmatrix} -l_i(s_i)r_i'(s_i) & r_i'(s_i) & r_i(s_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ i = 1, 2, \dots, n; \quad n \geq 2; \quad s_i \in [s_i^0, s_i^1] \quad (2)$$

其中 n 为手指尖个数(也就是手指个数), s_i^0 、 s_i^1 分别为初始接触时和终了接触时的弧长参数值, 记:

$$K_i(s_i) = \begin{bmatrix} -\rho_i(s_i)R_i'(s_i) & R_i'(s_i) & R_i(s_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$G_i(s_i) = \begin{bmatrix} -l_i(s_i)r_i'(s_i) & r_i'(s_i) & r_i(s_i) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3b)$$

那么

$$M(\theta, x, y)K_i(s_i) = M(\theta_i, x_i, y_i)G_i(s_i)$$

$$\forall \forall s_i \in [s_i^0, s_i^1], \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad n \geq 2 \quad (4)$$

所以

$$M(\theta, x, y) = M(\theta_i, x_i, y_i)G_i(s_i)K_i^{-1}(s_i) \quad (5)$$

从而

$$M(\theta_1, x_1, y_1)G_1(s_1)K_1^{-1}(s_1) = M(\theta_2, x_2, y_2)G_2(s_2)K_2^{-1}(s_2) \\ = \dots = M(\theta_n, x_n, y_n)G_n(s_n)K_n^{-1}(s_n) \quad (6)$$

由于 (θ_i, x_i, y_i) 为第 i 个手指尖的运动参数, 故式(6)为维持纯滚动接触时各手指尖运动之间必须满足的条件, 在这里把它叫作相容条件, 当相容条件不被满足时, 纯滚动接触将遭到破坏.

从式(4)还可以得到:

$$M(\theta_i, x_i, y_i) = M(\theta, x, y)K_i(s_i)G_i(s_i) \quad (7)$$

利用以上公式可以解决操纵分析中的如下问题:

① 已知各手指尖的运动 $\theta_i(t)$, $x_i(t)$, $y_i(t)$, 求物体的运动 $\theta(t)$, $x(t)$, $y(t)$, 这里 t 为时间参数. 这时, 利用(6)式先判断各手指尖的运动是否相容. 不相容, 则不可能对物体实现纯滚动操作, 若相容, 求出 $s_i(t)$, 再利用(5)式即可求得物体的运动 $\theta(t)$, $x(t)$, $y(t)$.

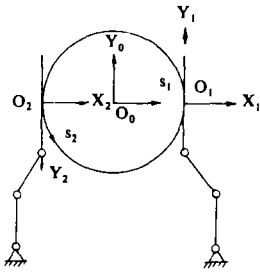


图 5 RH-物体系统

RM 的连续规迹规划完全一样, 这里不作进一步的论述.

4 应用实例: 直线手指尖对圆盘的操纵

RH-物体系统如图 5, 初始位置时两手指尖平行, 物体上固定坐标系 $X_0Y_0Z_0$, 开始时与手掌坐标重合, 手指尖 1 与手指尖 2 上分别固定坐标系 $X_1O_1Y_1$, $X_2O_2Y_2$, 取弧长参数为 s_1 , s_2 , 那么:

$$K_1(s_1) = \begin{bmatrix} \cos \frac{s_1}{R} & -\sin \frac{s_1}{R} & R \cos \frac{s_1}{R} \\ \sin \frac{s_1}{R} & \cos \frac{s_1}{R} & R \sin \frac{s_1}{R} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_1(s_1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & s_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_2(s_2) = \begin{bmatrix} -\cos \frac{s_2}{R} & -\sin \frac{s_2}{R} & -R \cos \frac{s_2}{R} \\ -\sin \frac{s_2}{R} & -\cos \frac{s_2}{R} & -R \sin \frac{s_2}{R} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_2(s_2) = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -s_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中 R 为圆盘直径. 代入(6)式得出相容条件为:

$$\begin{cases} \theta_1 - \frac{s_1}{R} = \theta_2 - \frac{s_2}{R} \\ -R \cos \theta_1 - s_1 \sin \theta_1 + x_1 = R \cos \theta_2 + s_2 \sin \theta_2 + x_2 \\ -R \sin \theta_1 + s_1 \cos \theta_1 + y_1 = R \sin \theta_2 - s_2 \cos \theta_2 + y_2 \end{cases}$$

从上式中消除 s_1 , s_2 可得到不含 s_1 , s_2 的相容条件:

$$\begin{aligned} & (\sin \theta_2 + \sin \theta_1)[R \sin \theta_2 + R \sin \theta_1 + y_2 - y_1 + (\theta_2 - \theta_1)R \cos \theta_1] \\ & = (\cos \theta_2 + \cos \theta_1)[-R \cos \theta_1 - R \cos \theta_2 + x_2 - x_1 + (\theta_2 - \theta_1)R \sin \theta_1] \end{aligned}$$

即只有 θ_1 , x_1 , y_1 , θ_2 , x_2 , y_2 满足上式时, 手指尖与圆盘才可能为滚动接触. 在满足相容条件后, 可根据下式求出 θ , x , y , s_1 , s_2 (均为时间 t 的函数).

② 操纵规划问题: 即规划手的运动使之完成对物体的给定操作.

此时物体的运动 $\theta(t)$, $x(t)$, $y(t)$ 为已知, 手的规划可分为两步进行: (a) 规划手指尖的运动, (b) 在(a)的基础上, 规划手指的各个关节的运动. 第一步规划利用式即可得到, 这时需要选取 $s_i(t)$, 这可结合手指的工作空间来进行, 第二步规划和一般

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & R & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \cos\theta_1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\sin\theta_2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cos\theta_2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \theta \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\theta_1 \\ -R\cos\theta_1 + x_1 \\ y_1 - R\sin\theta_1 \\ R\theta_2 \\ R\cos\theta_2 + x_2 \\ R\sin\theta_2 + y_2 \end{bmatrix}$$

这样就完成了操纵分析问题。

对操纵规划问题, θ, x, y 是已知的, 这时先接合手的工作空间选取 s_1, s_2 (它们都是时间参数 t 的函数), 再利用下式规划出手指尖的运动:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ x_1 \\ y_1 \\ \theta_2 \\ y_2 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta + \frac{s_1}{R} \\ R\cos(\frac{s_1}{R} + \theta) + x + s_1 \sin(\frac{s_1}{R} + \theta) \\ -s_1 \cos(\frac{s_1}{R} + \theta) + R\sin(\frac{s_1}{R} + \theta) + y \\ \theta + \frac{s_2}{R} \\ -R\cos(\theta + \frac{s_2}{R}) - s_2 \sin(\theta + \frac{s_2}{R}) + x \\ -R\sin(\theta + \frac{s_2}{R}) + s_2 \cos(\theta + \frac{s_2}{R}) + y \end{bmatrix}$$

5 空间 RH 操纵的简要讨论

前已指出, 空间机器人手的操纵, 其手指尖的个数, 亦即手指的个数不得小于 3. 从第 3 节的分析可以看出, 操纵分析的关键在于弄清物体与手指尖之间的相互位置关系. 这种相互位置关系在平面问题中只需一个弧长参数就可以表示. 在空间机器人手的分析中, 问题就大不一样了, 这时, 纯滚动接触, 手指尖相对物体虽只有 3 个自由度, 但用 3 个广义坐标却无法表示出它们之间的相互位置关系, 一般而言, 这时需要 5 个广义坐标, 当然这 5 个广义坐标并不是完整独立的, 它们之间还必须满足两个不可积的微分约束关系, 即不完整约束关系. 当考虑无限小操作时, 不完全约束等同于完整约束, 问题大为简化, 文 [1] 详细地讨论了这一问题.

参 考 文 献

- 1 Hiroaki, Kobayashi. Control and geometrical considerations for an articulated robot hand. Int J Robotics Res, 1985
- 2 Kerr J, Roth B. Analysis of multifingered hands. Int J Robotics Res, 1986: 4(4)
- 3 Mason M T, Salisbury J K. Robot hands and the mechanics of manipulation. MIT Press, 1985
- 4 梅凤翔. 非完整系统动力学基础. 北京工业学院出版社, 1985

MANIPULATION PLANNING OF PLANAR ROBOT HAND WITH ROLLING CONTACTS

LI Songshan SHENG Gang XIONG Youlun

(Dept of Mech Engng I Huazhong Sci & Tech Univ, Wuhan)

Abstract

This paper deals with manipulation mechanism of planar robot hand with (pure) rolling contacts. Some kinematical compatible conditions of finger-tip motions are obtained. A method of manipulation planning is developed. If the motions of finger-tips are given and if they satisfy compatible conditions, the motion of manipulated object can be derived by using the method presented. On the other hand, we can plan the motion of the fingers, so that prescribed motion of manipulated object can be realized.

Keywords: robot hand, manipulation, planning, compatible condition.

(上接第 25 页)

参 考 文 献

- 1 Rodney A Brooks. Robot beings. Proceedings IEEE / RSS Intl, Workshop on Intelligent Robots and System's 89, 1989
- 2 Jun'ichi Iijima *et al.* Searching unknown environment by a mobile robot using range sensor. Proceedings IEEE / RSJ Intl. Workshop on Intelligent Robots and Systems' 89, 1989
- 3 Glen E Monaghan. World modelling and path planning for autonomous mobile robots. SPIE Vol. 579 Intelligent Robots and Computer Vision, 1985
- 4 Richard Charles SEALS. Environment sensing and modelling, path planning and position location for a mobile robot. BSc(Hons), British Thesis, 1985;21(1)

STRUCTURE BASED FREE-GRID METHOD FOR MOBILE ROBOT ENVIRONMENT MODELLING

SHI Zhibai

(Shenyang Inst of Automation Robotics Lab, the Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Synthesizing the main ideas of regular grid modelling and free-space modelling, a structure based free-grid method is proposed to definitively overcome optionality of imaginary boundaries generation in the process of free-space segmentation according to environment structural data and hence the uncertainty of the path is eliminated. Furthermore, the structure based free-grid model can be used to avoid 'making a big detour', during the path planning to some extent.

Keywords: regular grid method, free-space method, imaginary boundary, structure based, object-shaped region.