

STANFORD 型主机械手平衡系统

陈 丰

(郑州工业大学数力系)

摘要 本文介绍 6 自由度 STANFORD 型主机械手的平衡系统,并从位姿矩阵分析和动态力学解算等方面论证其合理性。

关键词 主机械手 STANFORD 型 平衡系统

中图分类号 TP39

1 前言

空间遥控主—从式智能机器人由从机械手(PUMA200 型)、主机械手(STANFORD 型)和计算机控制系统 3 部分组成。

STANFORD 型主机械手的功能有两个:一是将手柄部受人操纵运动时空间位置和姿态六个独立坐标参数向从手输出;二是当从手受力时,将从手受力状况反馈给操作者。由于反馈力较小,为避免反馈力淹没在不平衡造成的力感差别中,系统的随遇平衡是主机械手设计的关键。

2 力反馈形式

力反馈是主—从式机器人特有的功能。STANFORD 型主机械手采用“力—位置”型力反馈结构。该系统在从手上安装了力传感器。系统的正向驱动(主手到从手)采用位置—位置型的位置误差信号驱动,反向控制(从手到主手)则是通过从手的力传感器将从手负载力经从手控制系统传送至主手控制系统。由于主、从手采用异构形式,所以该负载力需在主手计算机控制系统进行解算,并选择主、从手之间合适的力比,将其合理地分布在主手各活动关节上,通过驱动主手各个活动关节的电机,使操纵员借助主手感知从手的受力情况。图 1 是其简化框图。

这种力反馈系统对传动机械的要求不高。因为该系统是不可逆的,从手的摩擦力、惯性力不会反映到主手上去,使主手的操作更具灵活性。

收稿日期:1996-01-25

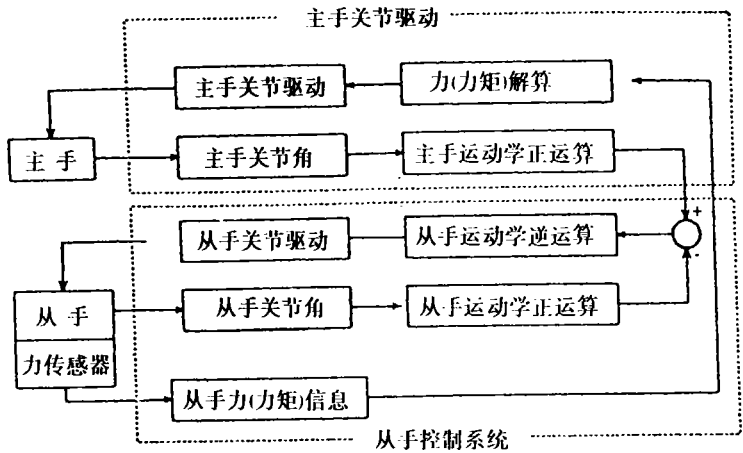


图 1 STANFORD 手控系统简化框图

3 STANFORD 型主机械手结构

STANFORD 型主机械手具有 6 个自由度。主要由肩部、手臂和腕部三大部分构成。图 2 是新设计 STANFORD 型主机械手的结构示意图,手柄的空间位置由两个回转运动和一个直线运动来实现;手柄自身可以实现俯仰、滚动和偏航三种运动,显然腕部和手臂的平衡对力反馈的灵敏度影响最大。

4 腕部结构特点

4.1 位姿方程

从图 2 所示的各关节轴坐标关系来看,由于关节 3 相对于关节 2 的扭角 α_2 不是绕 x_2 轴,而是绕 y_2 轴旋转;且第 3 关节变量 d_3 也应给出初始值,这就给坐标系的设立和用 $D-H$ 法建立运动学方程带来困难。本文采用两步法;首先建立相邻两杆的 0 位形变换矩阵(对初始位形毫无要求),然后建立由关节变量确定的变换矩阵。

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

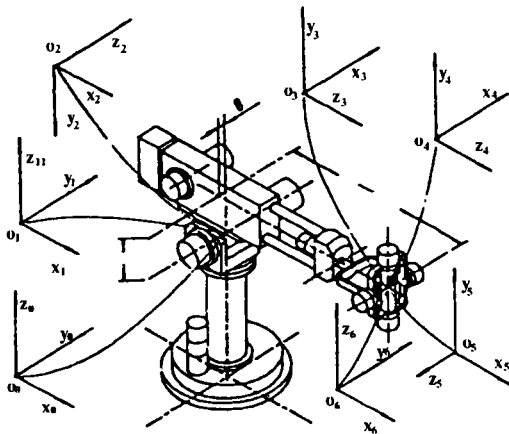


图 2 STANFORD 型主机械手结构示意图

$$\begin{aligned}
 T_3^2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 408+d_3 \\ 0 & -1 & 0 & -8 \\ 1 & 0 & 0 & 121 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_4^3 &= \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 T_5^4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_5 & c\theta_5 & 0 & 0 \\ c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & T_6^5 &= \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 T_6^0 &= T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

腕部手柄中心点在空间的姿态和位置分别为

$$R_6^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & p_x \\ n_y & o_y & p_y \\ n_z & o_z & p_z \end{bmatrix} \quad P_6^0 = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$$

式中

$$\begin{aligned}
 n_x &= [(s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4) s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_5] c\theta_6 - (s\theta_1 c\theta_2 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) s\theta_6 \\
 n_y &= (s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 c\theta_6 + (c\theta_1 c\theta_4 + s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) s\theta_6 \\
 n_z &= (c\theta_2 c\theta_4 s\theta_5 - s\theta_2 c\theta_5) c\theta_6 + c\theta_2 s\theta_4 s\theta_6 \\
 o_x &= (c\theta_1 s\theta_2 s\theta_4 - s\theta_1 c\theta_4) c\theta_6 - [(s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4) s\theta_5 + c\theta_1 c\theta_2 c\theta_5] s\theta_6 \\
 o_y &= (c\theta_1 c\theta_4 + s\theta_1 s\theta_2 s\theta_4) c\theta_6 - (s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_4) s\theta_5 s\theta_6 \\
 o_z &= c\theta_2 s\theta_4 c\theta_6 - (c\theta_2 c\theta_4 s\theta_5 - s\theta_2 c\theta_5) s\theta_6 \\
 a_x &= (s\theta_1 s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4) c\theta_5 - c\theta_1 c\theta_2 s\theta_5 \\
 a_y &= (s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 - c\theta_1 s\theta_4) c\theta_5 \\
 a_z &= c\theta_2 c\theta_4 c\theta_5 + s\theta_2 s\theta_5 \\
 p_x &= c\theta_1 c\theta_2 (d_3 + 408) + 8c\theta_1 s\theta_2 - 121s\theta_1 \\
 p_y &= 8s\theta_1 s\theta_2 + 121c\theta_1 \\
 p_z &= 8c\theta_2 - s\theta_2 (d_3 + 408)
 \end{aligned}$$

$c\theta_i$ 即 $\cos\theta_i$; $s\theta_i$ 即 $\sin\theta_i$; T_i^{i-1} 为相邻两杆之间的变换矩阵; T_6^0 为腕部中心相对基础坐标系的变换矩阵。

4.2 腕部结构

由 STANFORD 型主手的位姿方程可以看出,手心在空间的位置向量 P_6^0 与关节 4、5、6 的转角毫无关系,这是采用新型结构带来的结果。

从手或一般自主方式工作的机器人的腕部均有夹具或手指,想使机器人除前 3 个关节之外的所有关节轴线完全汇交于一点,几乎是不可能的,因此,一般机器人的腕部各关节角对腕部中心的位置向量 P 均有影响,使运算量增大,不利于机器人的实时控制;且参与运算的参数愈多,由于误差积累的作用,使得到的位置向量 P 的精度愈低。主从式机器人的主手末端没有夹具,取而代之的是手柄,这就从结构上为实现腕部各关节轴线汇交于一点创造了

条件。

图 2 中的腕部结构不仅实现了腕部 3 个关节轴线汇交于一点,使手心操作位置处于汇交点上,并且形体和重量完全对称于该点。这样的好处是,腕部各电机的驱动力臂最小,电机可以选得较小,使腕部重量大大减轻;腕部因姿态不同产生的力矩变化值相互抵消,对整机的精确平衡及参数的整体优化很有帮助。

5 大臂平衡

大臂相对其关节回转轴线应尽可能在重量上平衡,对减少电机负荷和提高运动响应速度是有益的。由于反馈力只有 10N,所以这一点显得尤其重要;否则,上下两方向的反馈力将被淹没在不平衡造成的力感差别之中。大臂支撑着臂部和腕部的所有零件,零件多,运动比较复杂,既有绕第 2 关节轴线的公转,又有腕部相对大臂的移动,还有腕部各部分的自转,精确平衡相当困难。可以说,实现这部分的随遇平衡是整个方案成败的关键。

大臂平衡的力学模型如图 3 所示,要使大臂在任意位置随遇平衡,必须满足方程

$$P_1(L_1 + \delta L_1) + \sum M_{1i} = P_2(L_2 + \delta L_2) + W_{20}A + \sum M_{2i}$$
 ①

其中 $\sum M_{1i}, \sum M_{2i}$ 分别为支点左、右端所有相对大臂壳体静止零件对支点的力矩和; W_{20} 为 #3 关节电机及该关节轴系零件的总重量。

由①式得

$$P_1L_1 + P_1\delta L_1 + \sum M_{1i} = P_2L_2 + P_2\delta L_2 + W_{20}A + \sum M_{2i}$$
 ②

只要 $P_1L_1 + \sum M_{1i} = P_2L_2 + W_{20}A + \sum M_{2i}$ ③

$$P_1\delta L_1 = P_2\delta L_2$$
 ④

①式即可满足。

经上述分析可知,要实现随遇平衡,可以从 2 个方面着手:

(1) 分析①式, $\delta L_1, \delta L_2$ 分别是大臂左端和右端所有移动件总的瞬时重心位置的变动量,而与重心的具体位置没有关系,对于多件复杂系统的动态平衡来说,可以使问题的解算大大简化。把④式稍作变化,可以得到 $P_1/P_2 = \delta L_2/\delta L_1$ 。通过齿轮齿条机构,只要满足 $Z_1/Z_2 = P_1/P_2$, 分别与 Z_1, Z_2 啮合的齿条的运动就可以实现上述关系。

(2)、③式实际上是①式当 $\delta L_1, \delta L_2$ 分别为 0 时的特殊情况,即左、右两端可移动件均处于最里边的位置。从理论上讲,只要把支点正好选在大臂所有零件的总重心点上,③式即可满足。

国外 RRPRRR 型主手是通过确定支点位置(必须在大臂上所有零件的总重心点上),靠控制左右两端所有零件对支点的力矩来实现的。对大臂壳体的加工精度要求较高,特别是大臂上支点孔的位置很难确定(包括水平和垂直两个方向),工艺性较差,特别是其腕部 3 个关节没有汇交于一点,由于腕部至大臂支点的力臂较长,腕部在运动过程中姿态的变化会给

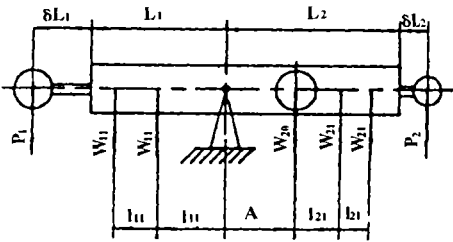


图 3 大臂力学模型图

- L_1 —— 大臂壳体左端面到支点的距离;
- L_2 —— 大臂壳体右端面到支点的距离;
- W_{1i} —— 支点左端相对壳体静止零件的重量;
- W_{2i} —— 支点右端相对壳体静止零件的重量;
- P_1 —— 随手腕移动各零件的重量之和;
- P_2 —— 配重块及与之一起移动零件的重量;
- δl_1 —— P_1 瞬时重心相对大臂左端面的位移;
- δl_2 —— P_2 瞬时重心相对大臂右端面的位移。

大臂两端的平衡带来影响,不易实现精确平衡。

在 STANFORD 型主手设计中,大臂上的零件可以在装配好之后由实验法确定重心点在水平方向的位置,配作大臂与支架联接用的螺纹孔。支架上的光孔是长槽形,故可进行微调。在高度方向上,支点位置不在大臂总重心点上,由计算机模拟分析的结果表明,由此引起的附加力矩值 $\Delta M = K_1 \theta_2$,在大臂两端安装的平衡弹簧的伸长量 $\Delta l = K_2 \theta_2$, (K_1, K_2 为常数),只要选择适当的弹簧刚度,就可从利用弹簧来平衡这一附加力矩,实践证明这一改进是合理的,不仅工艺性好,而且平衡效果比较理想,为了避免由实验法确定支点位置的盲目性给安装带来困难及对整体造型带来的影响,在设计阶段利用计算机对总重心位置进行计算,并对有关参数进行优化设计,以使大臂达到精确平衡。

6 结束语

STANFORD 型主机械手的研制,在力反馈、随遇平衡,柔性支承等几项关键技术上有突破。实践证明,这些技术措施是有效的,对样机的实测数据表明达到设计要求。目前,样机正成功地应用于我国空间智能机器人地面综合平台。

参 考 文 献

- 1 Edited by steven B. Skaar Teleoperation and Robotics in Space
- 2 户田义继,小型空间用机械手的研究,日本航空宇宙学会志 Vol 35, No401 87
- 3 周远清,张再兴. 智能机器人系统,清华大学出版社
- 4 陈丰,曾凡才. 简易空间机器人机械结构设计,郑州工学院学报 Vol 10 No. 3
- 5 马香峰. 机器人机构学,机械工业出版社

The Balance System of STANFORD Mark Master Manipulator

Chen Feng

(Department of Mathematics and Dynamics)

Abstract The development of a 6 degree of freedom direct drive master manipulator of STANFORD mark is introduced. The balance system of arm and the structure of a new hand are explained.

Key words master manipulator; STANFORD; mark balance; system