

文章编号: 1002-0446(2000)04-0315-04

改进的 6-DOF 并联机器人 Newton-Euler 动力学模型*

韩佩富¹ 王常武¹ 孔令富¹ 黄真¹ 赵立强²

(1. 燕山大学信息科学与工程学院 秦皇岛 066004; 2. 河北农业技术师范学院基础部 河北昌黎 066600)

摘要: 本文在 6-DOF 并联机器人运动模型的基础上, 采用对加速度及作用力正交分解的方法, 将其 Newton-Euler 动力学模型归结为一个简单的、可用于实时计算的模型。

关键词: 并联机器人; Newton-Euler 动力学模型; 改进算法

中图分类号: TP24 文献标识码: B

1 引言

并联机器人是复杂的空间多链机构, 同串联机器人相比, 其构件数目倍增, 构件间的耦合关系更加复杂。目前人们提出多种并联机器人动力学理论模型^[1-3]。其中 Newton-Euler 模型具有较小的计算量。自提出带力补偿的控制策略以来, 这种方法颇受人们重视。文献[1, 3]提出运用 Newton-Euler 方法建立并联机器人动力学模型的通用方法。但对于 6 自由度并联机器人, 其 31 个运动杆件, 36 个运动副将形成一个由 78 个方程及 78 个未知量构成的大方程组。本文分析了 6 自由度液压并联机器人的结构特点, 在对其运动学、动力学各相关项进行合理有效分解的基础上, 将其 Newton-Euler 动力学解耦归结为一个 6 阶线性方程组, 有效地减化了计算, 满足了实时要求。

2 改进的 Newton-Euler 动力学模型

2.1 液压缸和液压杆加速度分解

6 自由度并联机器人由 6 个液压支路连接上下平台构成, 其结构及坐标系建立如图 1 所示。图中坐标系建立及所用符号意义与文献[4]中相同。

在文献[4]中已经求得各支路液压缸、液压杆相对于下平台固定坐标系的加速度 a_{li} 、 au_i ($i=1 \dots 6$) 及相关参数。为求解动力学模型, 还需要对 a_{li} 、 au_i ($i=1 \dots 6$) 在沿支路矢量方向和与支路矢量正交平面方向进行分解。

设 a_{li} 、 au_i 在沿支路矢量方向和与支路矢量正交平面方向的分解分别用 a_{li}^n 、 a_{li}^t 、 au_i^n 和 au_i^t 表示; 沿支路矢量方向的单位矢量为 s_i ;

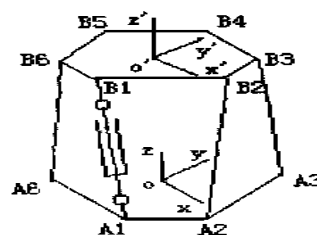


图 1 6 自由度并联机器人结构图

* 基金项目: 中国科学院机器人学开放研究实验室基金资助项目。

收稿日期: 1999-03-25

$$\text{则} \quad a l_i^n = (a l_i s_i) s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (1)$$

$$a l_i^{\perp} = a l_i - a l_i^n \quad i = 1 \dots 6 \quad (2)$$

$$a u_{i_i}^n = (a u_i s_i) s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (3)$$

$$a u_i^{\perp} = a u_i - a u_i^n \quad i = 1 \dots 6 \quad (4)$$

2.2 机构的力学分析

动力学问题的求解在于计算施加在机器人主动副上的驱动力/力矩. 6 自由度液压并联机器人的主动副是并行安排在各支路上的液压机构, 缸体对液压杆的作用力就是所要计算的驱动力.

机构的分体力学分析见图 2. 在图 2(a) 中展示了所有作用于上平台的力. 每个支路都通过 3 个轴线交于一点的 3 个转动副与上平台相连, 即没有力矩由支路作用于上平台. 上平台与各支路的触点力均分解成一个作用在沿支路矢量方向的力 f_i ; 一个作用在与支路矢量正交平面方向的力 g_i . f_i 的方向为 s_i , 其大小未知. 力 g_i 的方向和大小均未知. 因此上平台有 18 个未知量.

在图 2(b) 中, 展示了第 i 个支路上部(液压杆)的分体图. 力 f_i, g_i 仍然存在, 满足 Newton 第三定律. 由液压缸体作用在液压杆的力和力矩如下标记:

d_i —— 作用于与支路矢量正交平面方向的力;

h_i —— 作用于支路矢量方向的力, 也就是所要求的驱动力;

n_i —— 作用在支路矢量正交平面方向的力矩;

o_i —— 作用在支路矢量方向的力矩.

在图 2(c) 中, 展示了第 i 个支路下部(液压缸缸体)的受力/力矩情况. 由于缸体通过一个虎克铰与下平台固连, 则只有一个沿支路矢量方向的力矩由下平台作用于缸体, 记为 l_i ; 由下平台作用于液压缸缸体的力分解为两个力: c_i 是作用在支路矢量方向的力, e_i 是作用在与支路矢量正交平面方向的力.

作用在支路矢量方向的力/力矩有一个未知量, 作用在与支路矢量正交平面方向的力/力矩有两个未知量.

从全局上看, 整个问题是由 13 个分体图, 包括 78 个未知量组成的系统. 运用通常的 Newton-Euler 方程可以建立一个 78 元的方程组, 但求解困难.

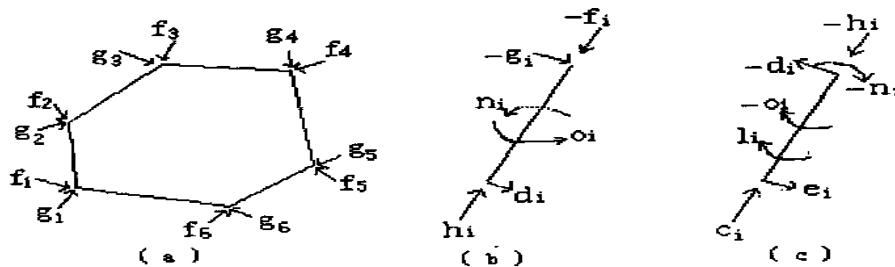


图 2 上平台及一个液压支路的分解图

2.3 改进的 Newton-Euler 动力方程

仔细分析上述方程就会发现, 所有的方程并非完全耦合. 一个方程中只占用一部分变量. 即使出现变量最多的上平台也只有 18 个未知量. 因此有将整个分解成若干小问题求解的

可能性. 本文采用上面的分解方式, 将力和力矩分解成沿各支路矢量方向和与支路矢量正交平面方向, 并首先在与支路矢量正交平面方向运用 Newton-Euler 方程, 求解部分关键参数, 再在支路矢量方向建立 Newton-Euler 方程, 从而求解驱动力 h_i . 具体如下:

令:

mu_i, ml_i 为液压杆、液压缸体的质量;

Iu_i, Il_i 为液压杆、液压缸体的惯性矩阵;

$r1_i, r2_i$ 分别为液压杆质心到 d_i, g_i 作用点的向量;

$r3_i, r4_i$ 分别为液压缸体质心到 d_i, e_i 作用点的向量;

q_i 为各支路的长度;

ξu_i 为底铰点 A_i 到液压杆质心的距离;

ξl_i 为底铰点 A_i 到液压缸体质心的距离;

对于支路上部(液压杆)的分体图而言, 作用在与支路矢量正交平面方向的力/力矩满足:

$$d_i - g_i = mu_i a u_i^\perp \quad i = 1 \dots 6 \quad (5)$$

$$r1_i \times d_i - r2_i \times g_i + n_i = Iu_i w_i + w_i \times Iu_i w_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (6)$$

对于支路下部(液压缸体)也有类似的方程:

$$-d_i + e_i = ml_i a l_i^\perp \quad i = 1 \dots 6 \quad (7)$$

$$-r3_i \times d_i - r4_i \times e_i - n_i = Il_i w_i + w_i \times Il_i w_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (8)$$

由(5)~(8)式可得到如下仅包含 g_i 的表达式:

$$\begin{aligned} (r1_i - r2_i - r3_i + r4_i) \times g_i &= (Iu_i + Il_i) w_i + w_i \times (Iu_i + Il_i) w_i + \\ (r3_i - r1_i - r4_i) \times mu_i a u_i^\perp &+ (-r4_i) \times ml_i a l_i^\perp \quad i = 1 \dots 6 \end{aligned} \quad (9)$$

由于 $r1_i, r2_i, r3_i, r4_i$ 的方向均为支路矢量方向, 所以有

$$-(r1_i - r2_i - r3_i + r4_i) = q_i s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (10)$$

$$(r3_i - r1_i - r4_i) = \xi u_i s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (11)$$

$$(-r4_i) = \xi l_i s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (12)$$

把式(10)~(12)代入(9)式得

$$\begin{aligned} q_i s_i \times g_i &= (Iu_i + Il_i) w_i + w_i \times (Iu_i + Il_i) w_i + \xi u_i s_i \times mu_i a u_i^\perp + \\ \xi l_i s_i \times ml_i a l_i^\perp &\quad i = 1 \dots 6 \end{aligned} \quad (13)$$

用 s_i 与上式作叉积得

$$g_i = \frac{(s_i \times z_i)}{q_i} \quad i = 1 \dots 6 \quad (14)$$

其中

$$z_i = (Iu_i + Il_i) w_i + w_i \times (Iu_i + Il_i) w_i + \xi u_i s_i \times mu_i a u_i^\perp + \xi l_i s_i \times ml_i a l_i^\perp \quad i = 1 \dots 6 \quad (15)$$

既然 g_i 已经求出, 对于上平台分体图, 仅有 6 个未知量, 即 f_i 的大小用 x_i 来表示

则 $f_i = x_i s_i \quad i = 1 \dots 6 \quad (16)$

对上平台可建立如下的 Newton-Euler 方程:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^6 f_i + \sum_{i=1}^6 g_i + F_e = m p a p \\ \sum_{i=1}^6 (f_i \times r_{bi}) + \sum_{i=1}^{6p} (g_i \times r_{bi}) + F_e \times r_e = I p e p + w p \times I p w p \end{cases} \quad (17)$$

其中: F_e 为外部作用在上平台质心的力;

r_{bi} 为上平台中心 o' 到铰点 B_i 的向量;

r_e 为上平台中心 o' 到 F_e 作用线的垂直量, 一般为 0;

mp 为上平台质量;

ap 为上平台的加速度;

ep 为上平台的角加速度;

I_p 为上平台的惯性矩阵;

wp 为上平台的转动角速度;

由式(17)解出 $x_i (i=1 \dots 6)$, 即可求得 $f_i (i=1 \dots 6)$.

则驱动力

$$h_i = f_i + m u_i a u_i^{\text{II}} \quad i = 1 \dots 6 \quad (18)$$

上面的计算过程通过化简, 消除了大量非关键的中间变量 d_i, n_i, o_i, c_i, e_i 等, 只保留了 g_i, f_i, h_i , 从而优化了计算过程, 确保了算法的高效率. 该算法一个计算周期大约 4500 个浮点乘法, 3300 个浮点加法, 在 PENTIUM-133 微机上运行需要 2.26 μ m, 基本上满足了实时计算的要求.

3 结论

本文在 6-DOF 并联机器人逆运动模型的基础上, 提出一种高效、简化的 Newton-Euler 动力学模型, 基本上满足了实时计算的要求, 为进一步深入研究更高性能的并联机器人系统奠定了基础.

参 考 文 献

- 1 黄真. 空间机构学. 机械工业出版社, 1991
- 2 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 机械工业出版社, 1997
- 3 Huan Z. Modeling Formulation of Six-DOF Multiloop Parallel Manipulator. Part 2-dynamic Modeling and Example. In: Fourth Symposium Linkage and CAD Design Methods, Romains, 1985, 2-1: 164-170
- 4 赵立强. 6 自由度并联机器人运动学、动力学并行算法研究. 燕山大学硕士论文, 1997

THE IMPROVED NEWTON-EULER DYNAMICS MODEL OF 6-DOF PARALLEL ROBOT

HAN Peifu¹ WANG Chang-wu¹ KONG Ling-fu¹ HUANG Zhen¹ ZHAO Liqiang²
(1. Yanshan University, Qinhuangdao; 2. Agriculture Technology Teacher-training Institute, Changli Hebei)

Abstract: Based on kinematics model of 6-DOF parallel robot, this paper adopts orthogonal analysis method on acceleration and force, and summarizes the Newton-Euler dynamics model into a simple model that can be used for real-time calculation.

Keywords: Parallel robot, Newton-Euler dynamics model, simple algorithm

作者简介:

韩佩富 (19-), 副教授. 研究领域: 数控技术.

王常武 (19-), 讲师, 硕士. 研究领域: 实时信息并行处理技术.

孔令富 (19-), 教授, 博士. 研究领域: 机器人技术、分布式计算机控制、实时信息并行处理技术.