

# 多机械手协同的无内力抓取及动载的分配<sup>\*</sup>

赵永生 任敬轶 黄真  
(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

**摘要** 讨论了多机械手协同系统的无内力抓取及相应的动载分配方法。对两个 PUMA 机械手协同操作同一物体的情况,进行了无内力分配原则下系统动载在关节空间的分配的数值分析。

**关键词** 多机械手 内力 动载

## 1 引言

由于多机器人协同工作系统在工业自动化、军事、航天等高新技术领域及其它特种行业中具有巨大的应用潜力和广泛的应用前景,而倍受各国学者的关注,是机器人领域的一个热点。多机器人在协同工作时,通过被操纵物体构成具有封闭位形的运动链(在这一点上它与多指灵巧手系统、多足步行机及并联机器人机构相似)。由于它们所构成的封闭多回路系统的活动度(也可称自由度)少于系统的驱动输入关节的数目,使这种系统具有冗余驱动的特性(我们称之为超确定输入<sup>[1]</sup>)。国内外学者在各自的文章中对这个系统已作了大量的、比较系统的研究工作。如运动分析、运动协调、动力学建模、动载协调分配、控制算法与实验及系统在目标空间、接触空间和关节空间内的各种运动与动力学性能分析及优化设计等<sup>[2-8]</sup>。

一般来说物体的内力是由于各个操作臂的末端抓手施加给物体的力的方向不一造成的。如果被操纵的物体是刚体,那么这个问题并不重要。但是如果物体具有一定的柔度,为防止物体在搬运过程中产生太大的变形,我们就需要考虑到物体所受到内力。

对多机械手协调系统的建模、动载最优协调分配等问题,我们在文献[8]中已作过较详细的讨论。本文是在文献[8]的基础上,讨论了多机械手协同系统动载的无内力分配原则,并选用较常见的 PUMA262 机械手,用数值方法研究了两机械手协同操纵一重物时,应用无内力分配原则在关节空间内协调分配系统动载的情况。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助

## 2 物体动载的分配方式及内力的产生

我们知道  $L$  个机械手协同系统各分支末端抓手施加给物体的合力矢  $F$  与作用于被操纵物体质心的物体动载  $P$  的关系为<sup>[2,3]</sup>

$$P = WF \quad (1)$$

式中  $W$  为抓取矩阵,  $F = [f_1^T, n_1^T, \dots, f_L^T, n_L^T]^T$  是各机械手末端施加给物体的力和力矩的合矢。

由式(1)可得

$$F = W^+ P + (I - W^+ W) \epsilon \quad (2)$$

式中  $W^+$  是矩阵  $W$  的一个广义逆,  $I$  是单位矩阵;  $\epsilon$  是一个可任意选取的向量, 它决定了  $F$  可以有多组解。式中的第一项  $W^+ P$  所对应的力主要包含有驱动物体运动所需的动力, 式中的第二项  $(I - W^+ W) \epsilon$  对应的就是使物体产生内力的项, 它对物体运动不产生任何影响, 即  $W(I - W^+ W) = 0$ 。但研究表明式(2)中第一项同样包含有内力项<sup>[3]</sup>。

如何选取  $\epsilon$  这个向量直接涉及到关节力矩分配的结果, 许多学者对这个问题都做过比较深入的研究。根据所需要解决的问题的不同, 一般从两方面来对  $\epsilon$  进行选取。一方面根据物体需要受到的内力的大小来选择  $\epsilon$ 。比如被夹持物体具有一定柔度, 此时应将内力降至最小; 又比如在多指协调操作中, 指端和物体之间是靠摩擦力来维持相对不动的, 为确定摩擦力的大小先要知道内力的大小。另一方面不考虑物体所受到的内力而根据系统的某些性能要求来选择  $\epsilon$ 。比如对那些关节额定输入力矩较小的关节适当减少它的输入力矩。对应后一种情况在文献[2]中作了较详细的讨论。文献[3]中讨论了零内力情况, 但在实时控制中很难应用。下面我们将讨论多机械手协调操作系统一种新的无内力分配原则。

## 3 无内力分配方式

单个机械手的动力模型为<sup>[2,3]</sup>

$$\tau_{\theta} = [M_i(\theta)] \ddot{\theta}_i + \dot{\theta}^T [N_i(\theta)] \dot{\theta} + g_i(\theta) - [J_{\theta i}(\theta)]^T F_i \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (3)$$

$F_i = \{f_i^T, n_i^T\}^T$  为机械手的末端施加给物体的合力矢。将各机械手的动力学模型组合得多机械手协同系统的动力学模型<sup>[2,3]</sup>

$$\tau_{\theta} = [M(\theta)] \ddot{\theta} + \dot{\theta}^T [N(\theta)] \dot{\theta} + g(\theta) - [J_{\theta}(\theta)]^T F \quad (4)$$

式中  $F$  为式(1)中的各机械手末端施加给物体的合力矢。

从上面的讨论已经知道, 当我们取  $\epsilon = 0$  时, 式(2)中完全产生内力的那一项将为0, 此时这里所得到的末端抓手应施加给物体的合力矢  $F$  为最小范数解, 它同样会对物体产生内力, 只不过此时的内力比较小罢了<sup>[3]</sup>。将所得到的力  $F$  应用系统的动力学方程(4)就可以将系统的动载分配到关节空间, 好得到各关节所需要的输入力矩  $\tau_{\theta}$ 。

上面介绍的关节力矩的内力最小范数解虽然大大降低了物体所受到的内力, 但是并没有把内力完全消除。这是因为在等式(2)式等号右侧第一项  $W^+ P$  中一般仍含有对物体运动不产生任何影响的内力<sup>[3]</sup>。为了进一步降低物体被操纵时所受到的内力, 这里我们给出一种新的无

内力的分配方式。

式(3)中右侧的最后一项,  $[J_{\theta}(\theta)]$  代表了该分支的末端抓手坐标系到基坐标系之间的雅可比矩阵,  $F_i$  为末端抓手施加给物体的作用力。设  $u$   $R^h$  为原点在物体质心且固连在物体上的坐标系, 我们可将式(3)中的最后一项改写为

$$[J_{\theta}^h(\theta)]^T F_i$$

其中  $[J_{\theta}^h(\theta)]$   $R^{di \times h}$  为该分支由物体坐标系到关节坐标系之间的雅可比矩阵,  $F_i = \{f_i^T, n_i^T\}^T$  表示了末端抓手作用力转化到物体质心上的合力矢。这样应用虚位移原理, 式(3)又可表示成如下形式:

$$\tau_{\theta} = [M_i(\theta)] \ddot{\theta}_i + \hat{G}[N_i(\theta)] \dot{\theta}_i + g_i(\theta) - [J_{\theta}^h(\theta)]^T F_i \quad (i = 1, 2, \dots, L) \quad (5)$$

在物体的质心处物体的动载  $P$  和各分支作用在物体质心上的力  $F_i (i = 1, 2, \dots, L)$  之间的关系可表示成:

$$P = F_1 + F_2 + \dots + F_L \quad (6)$$

将式(2)和式(6)相比较可以发现将物体的动载在质心处分配要比在各分支末端抓手的作用点之间分配简单得多, 因为在质心处  $F_i$  与  $P$  之间只是代数和的关系。此时要想使物体所受到的内力最小, 只需使各分支作用在物体质心上的合力矢  $F_i$  的方向与物体动载  $P$  的方向相同。将所得到的力  $F_i (i = 1, 2, \dots, L)$  应用动力学方程(5)就可以将系统的动载分配到关节空间, 即得到各关节所需要的输入力矩  $\tau_{\theta}$ 。

下面我们用实例数值分析方法研究多机械手无内内力力矩分配方式。并对照最小力矩分配原则和最小功率分配原则<sup>[8]</sup>的数值结果进行讨论。

## 4 实例数值分析

图1是两个 PUMA 262 型机器人组成的双手协调操作系统。被操纵的物体是一个实心圆盘。每个机器人的抓手和物体之间认为是无相对滑动刚性抓取。PUMA 262 机器人各关节变量的值和机器人的结构参数请参见表 1。

假设被操纵的物体是一半径为 180mm, 厚度为 10mm, 密度为  $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  的实心圆盘。固连于物体的坐标系的三个坐标轴与物体的惯性主轴相重合。

图1中,  $S$  是固连于地面的坐标系也就是系统的基坐标系, 系统中所有杆件和被操纵物体的速度、

加速度最终都是在这个坐标系上来表示的。 $G$  是固连于物体的坐标系;  $W_1, W_2$  分别代表与每个分支末端抓手相固连的坐标;  $B_1, B_2$  分别代表了每个操作臂的基坐标系。每个坐标系的三个坐标轴方向在图中已经被明确的标出。

我们将系统的两个操作臂分成一个主臂、一个从臂。根据物体运动轨迹的起点和终点位置求出主臂各关节相应的关节变量, 通过对其进行插值可得出各关节变量随时间变化的函数。然

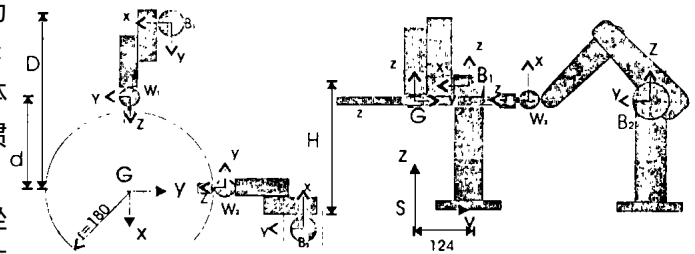


Fig. 1 Two PUMA 262 cooperating manipulators system

后通过 PUMA262 机器人的运动学正解和反解, 就可以求出任意时刻物体的位置和从臂各关节变量的值。

Table 1 Mechanism parameters of PUMA260 manipulator

linkage	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$	joint rotating
$i$	(mm)	( $^\circ$ )	(mm)	( $^\circ$ )	range( $^\circ$ )
1	0	0	0	90	308
2	0	- 90	73	0	314
3	198.1	0	51	- 90	292
4	19.1	- 90	203	0	578
5	0	90	0	0	244
6	0	- 90	0	0	534

在本例中被操纵物体运动轨迹的起点和终点如下:

$$\text{起点: } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 547.2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{终点: } \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 100 \\ 0 & 1 & 0 & - 100 \\ 0 & 0 & 1 & 350 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中前三行三列描述了物体的姿态, 最后一列描述了物体质心在基坐标系上的位置。从起点到终点物体所运动的时间为 10s。

本实例分别根据关节输入力矩最小原则<sup>[8]</sup>, 瞬时输入功率最小原则<sup>[8]</sup>及无内力分配原则进行数值分析。为减少工作量, 在具体计算过程中我们进行了一些简化。为了减少这种简化所带来的误差, 我们适当地降低了物体的运动速度和加速度, 从而使各关节的速度和加速度变得很小。

图 2 到图 7 表示了三种分配方式下从臂各个关节在运动轨迹的各点处瞬时输入力矩的大小。从这六个图表中我们能够明显看出, 运用最小关节力矩分配原则在大部分时间里的确降低了各个关节的输入力矩。

从图中可以看出无内力分配方式所得到的关节驱动力矩要比按照另外两种分配方式所得到的关节力矩大, 但有一个关节例外, 就是从臂的第六个关节。从图 7 可以看出该关节驱动力矩几乎为零(相对而言)。因此我们可以推断这个关节的输入力矩的大部分是增加了物体所受到的内力。

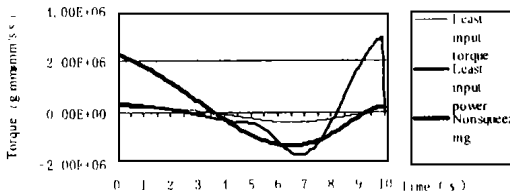


Fig. 2 Variation of 1st joint input torque of slave arm

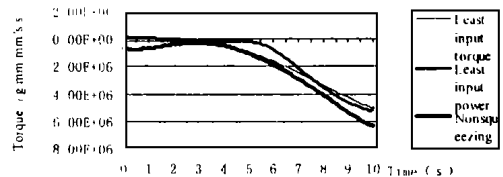


Fig. 3 Variation of 2nd joint input torque of slave arm

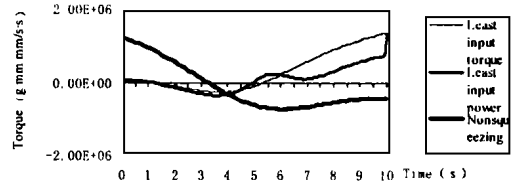
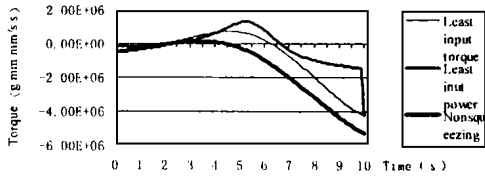


Fig. 4 Variation of 3rd joint input torque of slave arm

Fig. 5 Variation of 4th joint input torque of slave arm

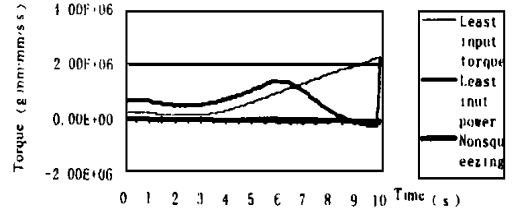
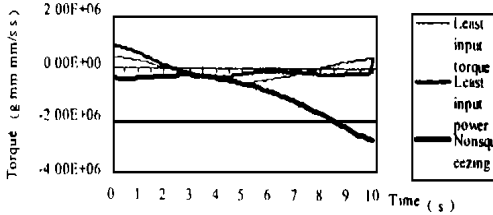


Fig. 6 Variation of 5th joint input torque of slave arm

Fig. 7 Variation of 6th joint input torque of slave arm

最后,我们来看看运用关节力矩的无内力分配原则是否真的消除了物体所受到的内力。为此我们在轨迹上选择一点,计算出物体运动到该点时所产生的动载,及在最小关节力矩分配原则和无内力分配原则下每个机械手的支座上所产生的支反力。我们之所以用支座的支反力来进行检验是因为直接由关节力矩来计算各个分支作用的物体质心上的力只是分配关节力矩的一个逆过程,其结果必然与在质心处所分配到的动载一样,不能证明是否降低了物体的内力。而支座反力与物体的动载之间是一种力平衡的关系,因此我们可以用支座反力来进行验证。表 2 列出了计算结果。表中的前三行是力矩,后三行是力,因为物体动载的受力点和各支反力的受力点不同,所以从力矩的数值上我们不能直接看出结果,但是从力的数值可以看出:虽然在两种分配方式下所产生的支座反力的合力都与物体的动载相等,但在最小力矩原则下计算出的两个分支的支反力在某些方向

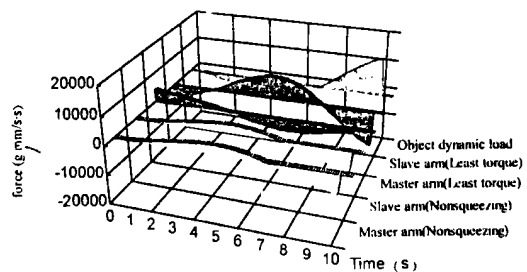


Fig. 8 Object dynamic load and arm's base reacting forces(Y-axis)

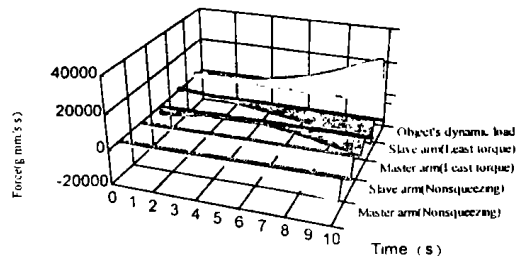


Fig. 9 Object dynamic load arm's base reacting forces(Z-axis)

上是不同向的。这说明每个分支施加给物体的力在某些方向上也是不同向的,即物体受到了内力。从关节力矩的无内力分配的计算结果可以看出这种由于方向不同而产生内力的现象被消除了。为了充分说明问题,我们求出整个轨迹上在两种分配原则(最小力矩原则和无内力原则)下各个点处的支反力。图 8 到图 9 给出了在轨迹各个点处主臂和从臂的基座支反力。因为

从力矩分量上我们很难看出结果,所以在图中我们只画出了支反力中的力分量。从图中可以看出按照无内力分配原则所求出的主、从臂支座反力在整条轨迹上都具有相同的方向,从而消除了物体所受到的内力。而按照最小力矩原则所得到的主、从臂支座反力往往在某些点具有相反的方向,这说明在这些点处被操纵物体受到了对物体运动不产生任何作用的内力。另外,由于在这个双手协调操作系统中物体的动载是被平均分配给双臂的,因此所得到的主、从臂支反力也分别是动载的一半,这从图中可以明显看出。

**Table 2 Comparison of manipulators base reacting forces**

dynamic load of object	manipulators base reacting forces under least input torque criteria		manipulators base reacting forces under nonsqueezing criteria	
	master arm	slave arm	master arm	slave arm
	7473.38	3.33556E+06	2.62063E+06	357372
20138.8	457192	2.79812E+06	1.62761E+06	1.6276E+06
-214285	449386	70958.3	259395	259089
-4975.44	3007.39	1962.7	2487.79	2483.52
-137.933	-3789.51	3926.74	68.9315	68.5199
13283.5	-4491.24	-8793.68	-6641.77	-6643.32

\* (unit of torque:  $g \cdot mm^2/s^2$ , unite of force:  $g \cdot mm/s^2$ )

本文讨论了多机械手协同操作系统的无内力分配原则,并应用数值实例证明了该方法的正确性。本文的结果对进一步研究多机械手协同操作系统的协调控制和实际应用有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- Huang Zhen, Zhao Yongsheng. The accordance and optimization-distribution equations of the over-determinate inputs of walking machine. The Int J of Mechanism and Machine Theory, 1994, 29(2): 327 ~ 332
- Walker I D, Marcus S I. Distribution of dynamic loads for multiple cooperating robot manipulators. Journal of Robotic Systems, 1989, 6(1): 35 ~ 47
- Walker I D, Freeman R A, Marcus S I. Analysis of motion and internal loading of objects grasped by multiple cooperating manipulators. The Int J of Robotics Research, 1991 10(4): 396 ~ 407
- Walker I D. Impact configurations and measures for kinematically redundant and multiple armed robot systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5): 670 ~ 683
- 熊有伦, 丁汉, 刘恩沧. 机器人学. 北京: 机械工业出版社, 1993
- Hsu P. Coordinated Control of Multiple Manipulator Systems. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1993, 9(4): 400 ~ 410
- Shimoga K B. Robot grasp synthesis algorithms: a survey. The Int J of Robotics Research, 1996, 15(3): 230 ~ 266
- Zhao Yongsheng, Du Yonghui, Zhao Tieshi, Huang Zhen. The novel approach for the optimal dynamic loads distribution of multiple cooperating manipulators. Proceeding of International Conference on Mechanical Transmission and Mechanisms, Tianjin, P R Chian, 1997

## Nonsqueezing Grasp and Dynamic Load Distribution for Multiple Cooperating Manipulators

ZHAO Yong-Sheng, REN Jing-Yi, HUANG Zhen

(*Mechanical Engineering Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004*)

### Abstract

For multiple cooperating manipulators system, the new method for object nonsqueezing grasp is introduced, and the related dynamic load distribution in the joint space is discussed. For the case of two PUMA262 manipulators handling a single object, the numerical research is conducted.

**Key words:** Multiple cooperating manipulators, Internal load, Dynamic load

赵永生 男, 1962年生, 副教授, 在职博士。主要从事机器人学领域的研究(包括并联机器人、多足步行机、多机械手协同系统等方向); 曾获国家教委科技进步一等奖一项、河北省科技进步二等奖一项, 参加完成国家自然科学基金、国家'863'等高科技研究课题6项, 在国际和国内各种科技刊物和会议上发表论文30余篇。