

文章编号: 1002-0446(1999)06-0407-08

## 一类 Power 抓持接触力分解的一般表达式<sup>\*</sup>

李剑锋 张玉茹 张启先

(北京航空航天大学机器人研究所 北京 100083)

**摘要:** 与灵巧抓持相比, Power 抓持可承受较大的外部载荷, 能够更稳定地抓持物体. 但由于抓持机构与物体间的约束较多, 且接触点可出现在抓持机构中活动度有限的构件上, 因此不能采用已有的适用于灵巧抓持的接触力分解方法对其接触力进行分解. 本文在对一类 Power 抓持机构的结构特征进行分析的基础上, 适当地建立了接触坐标系和物体坐标系. 通过对接触力空间进行分解, 给出了抓持接触力分解的一般表达式. 并根据该表达式, 建立了此类 Power 抓持的外部载荷与关节力矩及接触力之间的显函数关系.

**关键词:** 一类 Power 抓持; 接触力空间; 接触力分解; 一般表达式

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

### 1 引言

多指手通过指节、手掌及指端与物体多点接触抓持物体时, 手与物体之间的约束数目较多, 物体相对于手掌的运动能力有限或不具有运动能力. 文[1]称这类抓持为 Power 抓持. 由文[2]知, 当物体相对于手掌的对动度  $N_c \leq 0$  时, Power 抓持能够承受较大的外部载荷, 可被动地抵抗外部载荷扰动的影响, 具有较好的抓持稳定性. 若对动度  $0 < N_c < 6$ , 则抓持机构除了能较稳定地抓持物体外, 还可对其进行一定的操作. 文[3]通过引入描述接触性质的选择矩阵, 并根据所建立的静力学约束关系, 对 Power 抓持的接触力提出一种矩阵运算的分解方法. 文[4]根据抓持矩阵和多指手雅可比矩阵转置阵的零空间和它们的正交补空间, 给出一种对接触力进行分解的方法. 此外, 文[5]和[6]还分别对 Power 抓持的稳定性和鲁棒性问题进行了研究. 在有关 Power 抓持机构选型的研究方面, 文[7~11]等提出一些有意义的抓持机构形式. 分析表明, 这些机构选型具有相同的结构特征. 当它们抓持空间物体时, 可归为同一类 Power 抓持进行有关的研究. 结合抓持机构的结构特征, 适当地建立坐标系, 本文首先给出抓持接触力分解的一般表达式. 然后, 从此表达式出发, 建立了外部载荷与关节力矩及接触力之间的显函数关系. 本文的结果对这类 Power 抓持的接触力优化和力控制有实际意义.

### 2 一类 Power 抓持机构的结构特征及坐标系的建立

基于机构组成相对简单, 控制上易于实现, 具有较好的抓持稳定性, 且抓持轮廓主动可控的考虑. 文[7~11]等提出了一些有意义的抓持机构(如图 1. a- 1. c 所示), 并介绍了它们在遥控臂手集成系统及作为超静定抓持装置等方面的应用. 类似地, 还可以给出一些其它的机构形式, (如图 1. d- 1. f) 等. 不难看出, 以上抓持机构具有下述相同的结构特征:

(1) 与多指灵巧手相比, 手指关节数目相对较少, 且手指各转动关节的轴线垂直于手掌平

面, 移动关节的轴线平行于手掌平面.

(2) 指端位于一个与手掌平面平行的平面(抓持平面)上.

(3) 通过指端与物体接触, 可抓持任意形状的空间物体.

(4) 由手指关节力矩(力)生成和控制的指端接触力位于抓持平面上.

当具有以上特征的抓持机构抓持空间物体时, 物体只能做任意(或有限)的平面运动, 或完全不能运动, 抓持机构与物体之间形成的抓持属于 Power 抓持. 为得到物理意义明确的接触力分解表达式, 根据抓持机构的结构特征, 如下建立坐标系(参看图 1. a)

(1) 基坐标系  $B-XYZ$  的  $Z$  轴与各转动关节轴线平行,  $X, Y$  轴位于手掌平面上.

(2) 物体坐标系  $o-xyz$  的原点  $o$  及  $x, y$  轴位于抓持平面上,  $z$  轴垂直于抓持平面. 相应地, 将作用于物体的外部载荷等效地移至物体坐标系  $o-xyz$  的原点  $o$  处.

(3) 第  $i$  个接触坐标系  $c_i-t_i n_i o_i$  的  $o_i$  轴与抓持平面垂直,  $n_i$  轴的取向为抓持平面与物体相截得的封闭曲线在第  $i$  个接触处的内法线方向.

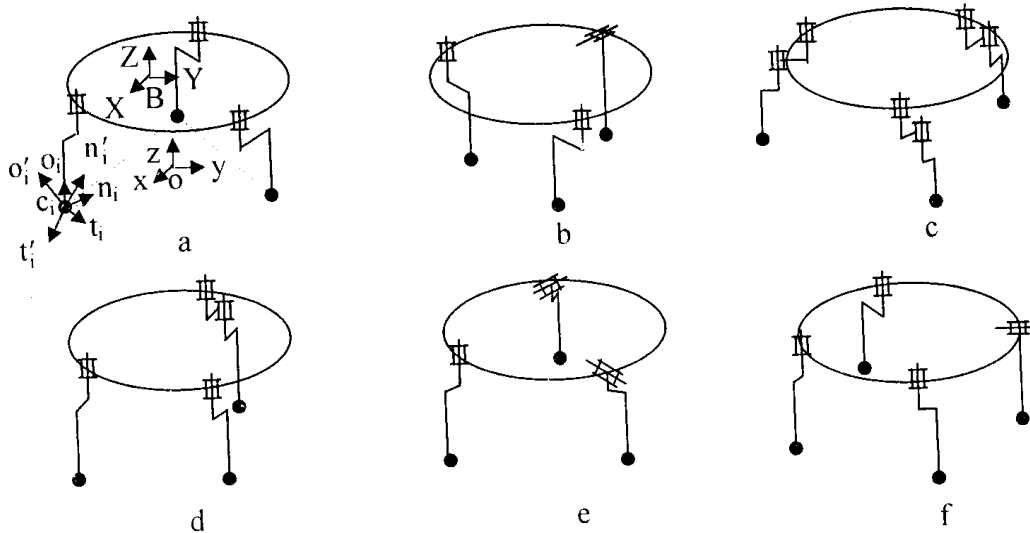


图1 一类 Power 抓持机构

值得注意的是, 按上述方法建立的接触坐标系  $c_i-t_i n_i o_i$ , 其  $n_i$  轴一般不与物体接触表面处的内法线  $n_i$  重合, 平面  $c_i t_i o_i$  也不与物体接触表面处的切面重合. 因此, 在给出接触约束不等式时, 应考虑两坐标系之间的相对姿态关系.

### 3 抓持接触力的分解

设抓持机构的手指数目为  $k$ , 各手指通过指端抓持物体且接触形式皆为硬指接触. 可将作用于物体的各接触力  $f_i$  沿  $t_i, o_i n_i$  (在基坐标系中表示) 分解如下

$$f_i = f_{t_i} + f_{o_i} + f_{n_i} \quad (i = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

由抓持的力平衡关系得

$$- \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{xy} \\ \boldsymbol{w}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1x} & t_{2x} & \dots & t_{kx} & 0 & 0 & \dots & 0 & n_{1x} & n_{2x} & \dots & n_{kx} \\ t_{1y} & t_{2y} & \dots & t_{ky} & 0 & 0 & \dots & 0 & n_{1y} & n_{2y} & \dots & n_{ky} \\ m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1k} & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nk} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & r_{1y} & r_{2y} & \dots & r_{ky} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -r_{1x} & -r_{2x} & \dots & -r_{kx} & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_t \\ \boldsymbol{f}_o \\ \boldsymbol{f}_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $\boldsymbol{w}_{xy} = (f_x \ f_y \ m_z)^T$ ,  $\boldsymbol{w}_z = (f_z \ m_x \ m_y)^T$ , 为在基坐标系中表示的, 等效至物体坐标系原点  $o$  处的外部载荷矢量.  $r_{ix}, r_{iy}$  为接触点在物体坐标系中的矢量位置  $r_i$  在基坐标系  $X, Y$  方向上的分量.  $\boldsymbol{f}_t = (f_{t1} \ f_{t2} \ \dots \ f_{tk})^T$ ,  $\boldsymbol{f}_o = (f_{o1} \ f_{o2} \ \dots \ f_{ok})^T$ ,  $\boldsymbol{f}_n = (f_{n1} \ f_{n2} \ \dots \ f_{nk})^T$ ,  $\boldsymbol{m}_{ti} = r_{ix} t_{iy} - r_{iy} t_{ix}$ ,  $\boldsymbol{m}_{ni} = r_{ix} n_{iy} - r_{iy} n_{ix}$ .

将式(2)分解成如下两部分

$$- [\boldsymbol{w}_{xy}] = \boldsymbol{G}_1 \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_t \\ \boldsymbol{f}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{1x} & t_{2x} & \dots & t_{kx} & n_{1x} & n_{2x} & \dots & n_{kx} \\ t_{1y} & t_{2y} & \dots & t_{ky} & n_{1y} & n_{2y} & \dots & n_{ky} \\ m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1k} & m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_t \\ \boldsymbol{f}_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$- [\boldsymbol{w}_z] = \boldsymbol{G}_2 \boldsymbol{f}_o = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ r_{1y} & r_{2y} & \dots & r_{ky} \\ -r_{1x} & -r_{2x} & \dots & -r_{kx} \end{bmatrix} \boldsymbol{f}_o \quad (4)$$

若关节力矩矢量  $\boldsymbol{\tau} \in \mathbf{R}^m$ , 抓持机构的雅克比矩阵  $\boldsymbol{J} \in \mathbf{R}^{2k \times m}$ . 有关节力矩与接触力之间的关系为

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{J}^T [\boldsymbol{f}_t^T \ \boldsymbol{f}_n^T]^T \quad (5)$$

设  $\Gamma \in \mathbf{R}^{3k}$  为接触力空间. 由于外部载荷分量  $\boldsymbol{w}_z$  只能由接触力分量  $\boldsymbol{f}_o$  平衡, 而  $\boldsymbol{f}_o$  不能由关节力矩生成. 因此, 可将抓持的接触力空间分解成如下 4 个子空间

$$\begin{aligned} \Gamma_{p1} &= \{ \boldsymbol{f}_{p1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{p11} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} \mid \boldsymbol{G}_1 \boldsymbol{f}_{p11} = \boldsymbol{w}_{xy}, \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f}_{p11} = \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{w}_{xy} \neq \mathbf{0}, \boldsymbol{\tau} \neq \mathbf{0} \} \\ \Gamma_{p2} &= \{ \boldsymbol{f}_{p2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{p21} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2k \times 1} \\ \boldsymbol{f}_{p22} \end{bmatrix} \mid \boldsymbol{G}_1 \boldsymbol{f}_{p21} = \boldsymbol{w}_{xy}, \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f}_{p21} = \mathbf{0}, \boldsymbol{G}_2 \boldsymbol{f}_{p22} = \boldsymbol{w}_z, \boldsymbol{w}_{xy} \neq \mathbf{0}, \boldsymbol{w}_z \neq \mathbf{0} \} \\ \Gamma_{h1} &= \{ \boldsymbol{f}_{h1} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{h11} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} \mid \boldsymbol{G}_1 \boldsymbol{f}_{h11} = \mathbf{0}, \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f}_{h11} = \boldsymbol{\tau}, \boldsymbol{\tau} \neq \mathbf{0} \} \\ \Gamma_{h2} &= \{ \boldsymbol{f}_{h2} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{h21} \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{k \times 1} \\ \boldsymbol{f}_{h22} \end{bmatrix} \mid \boldsymbol{G}_1 \boldsymbol{f}_{h21} = \mathbf{0}, \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f}_{h21} = \mathbf{0}, \boldsymbol{G}_2 \boldsymbol{f}_{h22} = \mathbf{0} \} \end{aligned} \quad (6)$$

根据文[4], 可得式(6)中各子空间的维数分别为

$$\begin{aligned} \dim \Gamma_{p11} &= m + 3 - \text{rank}(\boldsymbol{A}) - N_r - N_i \\ \dim \Gamma_{p21} &= m + \text{rank}(\boldsymbol{A}) + N_r \\ \dim \Gamma_{h11} &= 3 + \text{rank}(\boldsymbol{A}) + N_i \\ \dim \Gamma_{h21} &= 2k - \text{rank}(\boldsymbol{A}) \\ \dim \Gamma_{h22} &= k - 3 \\ \dim \Gamma_{p22} &= 3 \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $N_i = \dim N(\boldsymbol{G}_1^T)$  为系统的不定度,  $N_r = \dim N(\boldsymbol{J})$  为系统的冗余度, 矩阵  $\boldsymbol{A} = [\boldsymbol{G}_1^T \ \boldsymbol{J}]^T$ .

由式(6)知,  $f_{p11}$  为能由关节力矩生成和控制, 并对物体产生作用于  $X$ - $Y$  平面上的合力/矩的主动接触力分量.  $f_{p21}$  能生成作用于  $X$ - $Y$  平面上的抵抗合力/矩,  $f_{p22}$  可生成沿  $Z$  轴及绕  $X$ ,  $Y$  轴方向上的抵抗力和力矩, 它们是由外部载荷产生, 并由抓持系统机械结构被动地承受的被动接触力分量.  $f_{h11}$  的各个分量都在  $X$ - $Y$  平面上, 是可由关节力矩生成和控制, 但对物体作用的合力/矩为零的主动内力分量.  $f_{h21}$ ,  $f_{h22}$  为即不能由关节力矩控制, 又不平衡作用于物体的外部载荷的被动接触内力分量. 若系统的各构件及物体皆为刚性的, 则被动接触内力没有物理意义<sup>[3,4]</sup>. 相应地, 接触力  $f$  可分解为 4 个分量

$$f = f_{p1} + f_{p2} + f_{h1} + f_{h2} \quad (8)$$

根据式(3~5)及子空间定义式(6)得

$$\begin{aligned} G_1 f_{h21} &= 0 & J^T f_{h21} &= 0 \\ G_1 f_{h11} &= 0 & f_{h21}^T f_{h11} &= 0 \\ J^T f_{p21} &= 0 & f_{h21}^T f_{p21} &= 0 \\ f_{p21}^T f_{p11} &= 0 & f_{h11}^T f_{p11} &= 0 & f_{h21}^T f_{p11} &= 0 \\ G_2 f_{h22} &= 0 & f_{h22}^T f_{p22} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

进一步由式(9)得

$$f_{h21} = N_A x_A \quad f_{h11} = N_B x_B \quad f_{p21} = N_C x_C \quad f_{p11} = N_D x_D \quad f_{h22} = N_E x_E \quad f_{p22} = N_F x_F \quad (10)$$

式中,  $x_A \in R^{\dim \Gamma_{h21}}$ ,  $x_B \in R^{\dim \Gamma_{h11}}$ ,  $x_C \in R^{\dim \Gamma_{p21}}$ ,  $x_D \in R^{\dim \Gamma_{p11}}$ ,  $x_E \in R^{\dim \Gamma_{h22}}$ ,  $x_F \in R^{\dim \Gamma_{p22}}$ , 为任意的系数向量.  $N_A, N_B, N_C, N_E, N_F$  的列分别张成下述矩阵  $A, B, C, D, E, F$  的零空间

$$A = \begin{bmatrix} G_1 \\ J^T \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} G_1 \\ N_A^T \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} J^T \\ n_A^T \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} N_C^T \\ N_B^T \\ N_A^T \end{bmatrix}, \quad E = G_2, \quad F = N_E^T \quad (11)$$

综合式(8), (10), (11) 可得此类 Power 抓持接触力分解的一般表达式

$$f = \begin{bmatrix} f_t \\ f_n \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_D x_D \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_C x_C \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2k \times 1} \\ N_F x_F \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_B x_B \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N_A x_A \\ \mathbf{0}_{k \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{2k \times 1} \\ N_E x_E \end{bmatrix} \quad (12)$$

从以上接触力分解的过程可以看出, 充分利用抓持机构的结构特征, 将力平衡方程(2)分成(3), (4)两部分后再对接触力空间进行分解, 可避免维数较大矩阵的相关运算, 分解过程中的计算量相对较小. 得到的接触力分解表达式形式简洁, 各接触力分量的物理意义明确.

#### 4 外部载荷 $w$ 与接触力 $f$ 和关节力矩 $\tau$ 之间的关系

在抓持接触力分解的基础上, 本节建立外部载荷  $w$  与接触力  $f$  和关节力矩  $\tau$  之间的显函数关系.

根据式(3~5)和(12)有

$$\begin{bmatrix} w_{xy} \\ w_z \\ f_h \\ f_0 \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & -G_1 N_C & \mathbf{0} & -G_1 N_D & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -G_2 N_F & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ N_A & \mathbf{0} & N_C & \mathbf{0} & N_D & N_B \\ \mathbf{0} & N_E & \mathbf{0} & N_F & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & J^T N_D & J^T N_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_E \\ x_C \\ x_F \\ x_D \\ x_B \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $f_m = (f_t f_n)^T$ .

不失一般性, 设抓持系统的不定度和冗余度皆为零(若  $N_i > 0$ , 表明接触对物体的约束不充分, 物体存在不受控的运动, 在实际的抓持系统中, 这种情况不允许存在. 对于 Power 抓持而言, 系统具有冗余度无实际意义).

$$\begin{aligned} \text{由式(7)有 } x_f \in \mathbf{R}^3, \begin{cases} x_C \\ x_D \end{cases} \in \mathbf{R}^3 \text{ 再由式(13)第一, 二行得} \\ \begin{cases} x_C \\ x_D \end{cases} &= [-G_1 N_C - G_1 N_D]^{-1} w_{xy} = \begin{bmatrix} M_C \\ M_D \end{bmatrix} w_{xy} \\ X_F &= -[G_2 N_F]^{-1} w_z \end{aligned} \tag{14}$$

将上式代入式(13)的第三, 四, 五行得外部载荷与接触力和关节力矩之间的关系为

$$\begin{aligned} f_m &= N_A x_A + N_C M_C w_{xy} + N_D M_D w_{xy} + N_B x_B \\ f_0 &= N_E x_E - N_F [G_2 N_F]^{-1} w_z \\ \tau &= \tau_p + \tau_h = J^T N_D M_D w_{xy} + J^T N_B x_B \end{aligned} \tag{15}$$

若物体及抓持机构的构件皆为刚性的, 可设上式中的  $x_A = 0, x_E = 0$ .

上式给出了抓持的外部载荷  $w$  与接触力  $f$  和关节力矩  $\tau$  之间的显函数关系. 当外部载荷已知时, 可直接求得被动、主动接触力分量和平衡外部载荷的关节力矩  $\tau_p$ . 利用上式第一, 二式, 可对抓持接触力进行优化, 并将得到的系数向量  $x_B$  代入第三式确定生成主动内力分量的关节力矩  $\tau_h$ .

### 5 算例

图 2 所示为 3 指 4 关节抓持机构(参看图 1. d) 抓持一圆柱形物体的俯视图. 抓持机构各手指的第一个关节均布在一个半径  $R=2$  的圆周上, 被持物体的半径  $r=1$ . 5, 手指的杆长分别为  $l_1 = l_2 = 2, l_3 = l_4 = 1$ . 各坐标系建立如图所示, 其中基坐标系与物体坐标系的姿态相同, 基坐标系原点在抓持平面上的投影与物体坐标系的原点  $o$  重合. 取  $Z$  及  $o_i (i=1, 2, 3)$  轴垂直于纸面向外为正. 假设物体与抓持机构的构件皆为刚性的, 且各接触均为硬指接触. 令接触力矢量  $f = (f_{n1} f_{t2} f_{t3} f_{n1} f_{n2} f_{n3} f_{o1} f_{o2} f_{o3})^T$ , 外部载荷矢量  $w = (f_x f_y m_z f_z m_x m_y)^T$ .

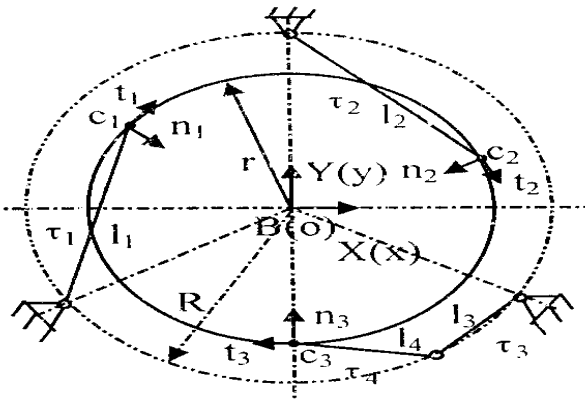


图 2 3 指 4 关节抓持机构抓持圆柱体

相对于图示坐标系, 有抓持矩阵  $G_1, G_2$  及雅可比矩阵的转置阵  $J^T$  分别为

$$\begin{aligned} G_1 &= \begin{bmatrix} 0.6143 & 0.3757 & -1 & 0.7891 & -0.9182 & 0 \\ 0.7891 & -0.9182 & 0 & -0.6143 & -0.3757 & 1 \\ -1.5 & -1.5 & -1.5 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ G_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.9217 & 0.5636 & -1.5 \\ 1.1837 & -1.3773 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{16}$$

$$J^T = \begin{bmatrix} 0.7485 & 0 & 0 & 1.8546 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7485 & 0 & 0 & 1.8546 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & -0.1660 & -1 & 0 & 0.9861 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式(11), (16)及(17)知,  $null(A)$  和  $null(E)$  不存在,  $N_B, N_C, N_D, N_F$  分别为

$$N_B = \begin{bmatrix} 0.1442 & 0.3082 & -0.4365 \\ -0.4642 & 0.1635 & 0.3453 \\ 0.3199 & -0.4717 & 0.0912 \\ 0.7801 & -0.0026 & 0.2370 \\ 0.2286 & 0.7846 & -0.0464 \\ 0.0251 & 0.2002 & 0.7897 \end{bmatrix}, N_C = \begin{bmatrix} 0 & 0.9273 \\ -0.9273 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -0.3743 \\ 0.3743 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$N_D = \begin{bmatrix} 0.1261 \\ -2.007 \\ -0.7641 \\ 0.3124 \\ -0.4973 \\ 0.1227 \end{bmatrix}, N_F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.9214 & 0.5636 & -1.5 \\ 1.1837 & -1.3773 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

此抓持系统的不定度  $N_i = 0$ , 冗余度  $N_r = 0$ , 由式(14), (16)及(18)得

$$x_F = \begin{bmatrix} -0.3208 & 0.0242 & -0.0499 \\ -0.0324 & -0.3010 & 0.0021 \\ -0.0044 & 0.0384 & -0.3093 \end{bmatrix} w_z,$$

$$\begin{bmatrix} x_C \\ x_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3735 & -0.5046 & -0.2752 \\ -0.0709 & -0.6156 & 0.2793 \\ -0.4914 & -0.1227 & -0.1818 \end{bmatrix} \quad (19)$$

再根据式(15)就可得到外部载荷与接触力和关节力矩之间的显函数关系.

$$f_{in} = \begin{bmatrix} -0.0657 & -0.5709 & 0.2590 \\ -0.3464 & 0.4679 & 0.2552 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.0265 & 0.2304 & -0.1045 \\ 0.1398 & -0.1889 & -0.1030 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} w_{xy} + \begin{bmatrix} -0.0620 & -0.0155 & -0.0229 \\ 0.0986 & 0.0246 & 0.0365 \\ 0.3755 & 0.0938 & 0.1389 \\ -0.1535 & -0.0383 & -0.0568 \\ 0.2444 & 0.0610 & 0.0904 \\ -0.0607 & -0.0151 & -0.0223 \end{bmatrix} w_{xy} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0.1442 & 0.3082 & -0.4365 \\ -0.4642 & 0.1635 & 0.3453 \\ 0.3199 & -0.4717 & 0.0912 \\ 0.7801 & -0.0026 & 0.2370 \\ 0.2286 & 0.7846 & -0.0464 \\ 0.0251 & 0.2002 & 0.7897 \end{bmatrix} x_B$$

$$f_0 = \begin{vmatrix} 0.3576 & 0.2384 & 0.3572 \\ 0.3073 & 0.2049 & -0.4291 \\ 0.3351 & -0.4433 & 0.0619 \end{vmatrix} \omega, \\ \tau = \begin{vmatrix} -0.3311 & -0.0827 & -0.1225 \\ 0.5271 & 0.1316 & 0.1950 \\ 0.0833 & 0.0208 & 0.0308 \\ -0.1218 & -0.0304 & -0.0451 \end{vmatrix} \omega_{xy} + \begin{vmatrix} 1.5547 & 0.2259 & 0.1128 \\ 0.0765 & 1.5776 & 0.1724 \\ 0.2034 & 0.1109 & 1.4133 \\ -0.0284 & 0.2757 & 0.7635 \end{vmatrix} x_B \quad (20)$$

## 6 结论

本文给出一类 Power 抓持接触力分解的一般表达式. 由于考虑了抓持机构的结构特征, 适当地建立了接触坐标系, 并将力平衡方程分成两部分后再对接触力进行分解. 得到的接触力分解表达式形式简洁, 各接触力分量的物理意义明确. 按该式对抓持接触力进行分解, 计算量相对较小. 还从此表达式出发, 建立外部载荷与接触力及关节力矩之间的显函数关系式. 可根据此关系式优化接触力和对抓持进行力控制.

## 参 考 文 献

- 1 Cutkosky M R. On Grasp Choice, Grasps Models and the Design of Hands for Manufacturing Tasks. IEEE Trans. On Robotics and Automation, 1989, 5(3): 267- 279
- 2 Yuru Zhang, Gruver W A. Classification of Grasps by Multifingered Robot Hands. In Proc. IEEE/RSI International Conf on Intelligent Robots and Systems, 1996: 1052- 1059
- 3 Melchiorri C. Static Force Analysis for General Cooperating Manipulations. Proc. of the 1994 IEEE Conf on Robotics and Automation, 888- 893
- 4 Yuru Zhang, F Gao, Gruver W A. Determination of Contact Forces in Grasping, Proc of the 1996 IEEE/RSI International Conf, on Intelligent Robots and Systems, 1379- 1384
- 5 Howard S W, Kumar V. Modeling and Analysis of the Compliance and Stability of Enveloping Grasps. Proc of the 1995 IEEE Conf, on Robotics and Automation, 1367- 1372
- 6 Zhang X Y. Robustness of Power Grasp. Proc of the 1994 IEEE Conf, on Robotics and Automation, 2828- 2835
- 7 Machidu K, Toda Y. Precise Space Telerobotic System Using 3-Finger Multisensory Hand. Proc of the 1995 IEEE Conf, on Robotics and Automation, 33- 38
- 8 Barkat B, Bessonnet G, Lallemand J P. Hyperstatic Grasping Optimization with Finger Deformability and Sliding Constraints. Proc of the 1994 IEEE Conf, on Robotics and Automation: 1923- 1930
- 9 Link *et al.* Device for Handling Workpieces. United States Patent, Number: 4,828,276 1989
- 10 Yakou. Hand Apparatus. United States Patent, Number: 5,161,846 1992
- 11 Yakou. Robot Hand. United States Patent, Number: 5,161,847 1992

## THE GENERAL FORMULA OF CONTACT FORCE DISTRIBUTION FOR A TYPE OF POWER GRASPS

LI Jian-feng ZHANG Yu-ru ZHANG Qixian

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

**Abstract:** Compared with dexterous grasps, power grasps can support larger external loads and grasp objects more steadily. Because there are more contact constraints between the object and the grasping mechanisms, and the contacts may occur on the parts with limited mobility of the grasping mechanisms, the proposed methods which are applicable to the contact force distribution for dexterous grasps can not be used to distribute the contact forces of power grasps. In this paper, based on the analysis of the structural characteristics of a type of power grasping mechanisms, the object and contact coordinates are suitably established. And then, the general formula of contact distribution for a type of power grasps is put forward through the decomposition of the contact force space. From the obtained formula, the function relation among the external loads, joint torques and contact forces is also set up.

**Keywords:** A type of power grasps; contact force space; distribution of contact forces; general formula

作者简介:

李剑锋: (1965-), 男, 博士研究生. 研究领域: 机器人机构运动学、动力学, 多指手(机器人)协调操作.

张玉茹: (1959-), 女, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机械系统运动学、动力学, 机器人学.

张启先: (1927-), 男, 院士. 研究领域: 机构学, 机器人学.

(上接第 406 页)

## THE ADAPTIVE CONTROL SCHEMES OF RESOLVED MOTION FOR SPACE-BASED MANIPULATOR TO TRACK THE DESIRED TRAJECTORY OF WORKSPACE

CHEN Li<sup>1</sup> LIU Yan-zhu<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002;

2. Department of Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** In this paper, the inverse kinematics of a free-floating space manipulator system is studied, and it is shown that the Jacobian matrix is nonlinearly dependent on inertial parameters. With the augmentation approach, we demonstrate that the augmented generalized Jacobian matrix can be linearly dependent on inertial parameters. According to the results, when the inertial parameters are unknown, two adaptive control schemes for a free-floating space manipulator system to track the desired trajectory of workspace are proposed. A two-link planar space manipulator system is simulated to verify both proposed control schemes.

**Keywords:** Space manipulator; multibody dynamics; adaptive control scheme

作者简介:

陈力: (1961-), 男, 副教授. 研究领域: 多体系统动力学; 空间机器人动力学与控制等.

刘延柱: (1936-), 男, 博导. 研究领域: 陀螺力学; 多体动力学; 航天器姿态动力学等.