

机器人双手协调运动中的误差分析及补偿

贺昱曜

(西安公路学院自动化系)

陆漾生

(Clemson 大学电机系, 美国南卡罗来纳州)

摘要 本文首次分析了机器人双手协调运动中的动态与控制误差, 导出了误差矩阵方程, 据此提出了补偿算法, 实验验证了算法的有效性. 由于本算法并不局限于某一特定类型的机器人, 因而具有较普遍的意义. 算法已应用于机器人双手协调运动的实时控制. 文中并对误差引起的目标物体变形进行了讨论.

关键词: 机器人; 协调运动; 误差分析; 补偿算法; 实时控制

1. 引言

在近几年的机器人研究中, 机器人双手协调运动及控制, 已受到人们的关注. 主要是机器人双手协调运动可以完成许多单个机械手不能完成的操作. 例如, 抓举较重的物体, 动态装配以及一些只有双手协调才可以完成的操作等. 此外, 双手协调运动还可以增加被抓物体的稳定性, 处理本身具有若干个自由度的物体等.

机器人双手协调运动过程一般是, 在两个机械手协调移动一个物体之前, 已事先设计好被移动物体的起点位置, 运动轨线及终点位置. 这样, 根据物体的移动轨线, 便可以设计两个机械手之一 (称为 L) 的路径; 而第二个机械手 (称为 F) 的路径, 并不需要事先设计. 因在双手协调运动中, 物体, 两个机械手及其基坐标架之间的基变换阵形成了一个齐次约束条件. F 的路径及关节速度便可以由约束矩阵方程导出. 这样设计的好处在于, 一旦物体改变或移动路径改变, 仅需修改或重新设计 L 的路径即可.

大多数机械手的位移都是点到点移动方式. 在每个设置点, 由关节坐标位置可以得到精确的末端夹持器的笛卡尔坐标位置, 反之亦然. 因此, 当双手协调移动一个物体时, 在每个设置点, 可以保证物体在预定的轨线上和约束矩阵方程成立. 但在两个设置点之间, 由于关节坐标的线性变化, 反应在末端夹持器的笛卡尔坐标上一般并不是直线运动 (见文献 [1] P137), 再加上机械手的机械误差、控制误差以及基变换阵的测量误差、计算误差等, 使得机械手末端夹持器的实际运动轨线偏离了规划的轨线. 结果, 使得被移动物体不能沿预定的轨线运动, 约束矩阵方程也不一定成立. 而约束条件的稍稍违背 (亦即极小的位置与速度误差), 将可能在被移动的物体上产生一个巨大的力或力矩, 轻则使物体产生变形, 重则使之损坏. 所以, 对误差分析与补偿, 是一件很有意义并有实用价值的工作.

本文首次对双手协调运动中的运动和控制误差进行了分析, 导出了误差矩阵方程,

据此提出了补偿算法. 对于误差引起的目标物体变形进行了讨论. 该算法已用于机器人双手协调运动的实时控制, 实验结果是满意的.

2. 约束矩阵方程

对于具有 $n+1$ 个杆件的机械手, 采用文献[2]中的方法, 可以得到末端夹持器到基坐标架之间的变换阵 T 为

$$T = A_0^n(q) = A_0^1(q_1) A_1^2(q_2) \cdots A_{n-1}^n(q_n) \\ = \begin{bmatrix} n(q) & s(q) & a(q) & p(q) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中广义坐标 q 是由 n 个节点位移 q_1 ,

$q_2, \dots, q_n$ 组成的 n 维向量. $n(q)$ 是手的法向量, $s(q)$ 是手的滑动向量, $a(q)$ 是手的搜索向量, $p(q)$ 是从基坐标架原点到末端夹持器坐标架原点的位置向量. 以下为了叙述方便, 设手的方位矩阵和位置向量分别为 T_0 和 T_p

$$T_0 = \{n(q) \quad s(q) \quad a(q)\}, \quad (2)$$

$$T_p = p(q) = \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

T_0 是 3×3 矩阵, T_p 是三维向量.

考虑各具有 n 个节点的两个机械手移动一个刚体, 如图 1 所示. 为了方便地描述系统之间的关系, 配置了相应的坐标系 (见图 1), 其中机械手 L 的基坐标系 $\{x_{l_0}, y_{l_0}, z_{l_0}\}$ 为自然坐标系; $\{x_l, y_l, z_l\}$ 和 $\{x_f, y_f, z_f\}$ 分别是机械手 L 和 F 的末端夹持器的坐标系. 令 R 是坐标系 $\{x_f, y_f, z_f\}$ 到坐标系 $\{x_l, y_l, z_l\}$ 的齐次变换阵, B 是坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 到坐标系 $\{x_l, y_l, z_l\}$ 的齐次变换阵, 而坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 的原点定义在 $1/2R_p \left(= [R_{x/2}, R_{y/2}, R_{z/2}]^T \right)$ 处, 其方位在初始位置时与自然坐标系相同. $\{x, y, z\}$ 为固连在目标物体上的坐标系, 当目标物体不发生变形时, 与坐标系 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 完全重合. 因此, 两个机械手, 目标物体及其基变换阵 z 之间的齐次约束矩阵方程为

$$LR = ZF, \quad (4)$$

位置约束为

$$L_p + L_0 R_p = Z_p + Z_0 F_p, \quad (5)$$

而方位约束矩阵方程为

$$L_0(q^l)R_0 = Z_0 F_0(q^f), \quad (6)$$

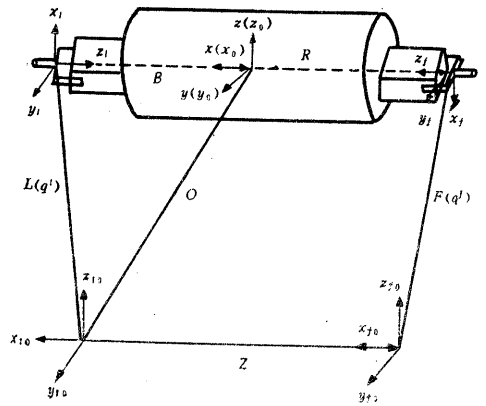


图 1 坐标架配置与约束的关系

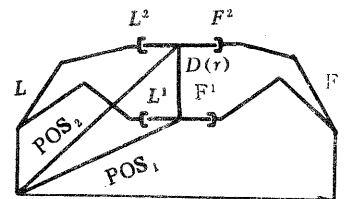


图 2 两个机械手移动目标物体沿直线运动

式中 q^l , q^f 分别是机械手 L 和 F 的 n 维节点位移向量, L_0 , R_0 , Z_0 , F_0 是相应的方位矩阵. 其中 Z , R 是常阵, 而 R 的元素取决于两个末端夹持器的相对位置和相对方位.

3. 目标路径规划

我们用 Paul 的笛卡尔运动(见文献 [1] P133-135)来规划目标路径. 由于目标物体运动的初始位置, 运动轨线及终点位置已事先给定, 因此, 可以根据运动轨线特点, 将其近似为若干个直线段. 用这种方法规划每段直线, 可以得到一个受控的线速度和两个受控的角速度, 即运动由一个平移和两个转动组成. 第一个转动先将目标对准所要求的最终方向, 第二个转动控制目标绕它自己的 z 轴转动. 令驱动变换 $D(r)$ 是将目标物体从位置 POS_1 移动到位置 POS_2 的变换 (其中 POS_1 和 POS_2 是位置 1 和位置 2 相对于自然坐标系的 4×4 变换阵). 则 $D(r)$ 为

$$D(r) = T(r)R_a(r)R_0(r)$$

$$= \begin{bmatrix} ? & -S(r\Phi)[S\psi^2 V(r\theta) + C(r\theta)] + C(r\psi)[-S\psi C\psi V(r\theta)] & C\psi S(r\theta) & rx \\ ? & -S(r\Phi)[-S\psi C\psi V(r\theta)] + C(r\Phi)[C^2\psi V(r\theta) + C(r\theta)] & S\psi S(r\theta) & ry \\ ? & -S(r\theta)[-C\psi S(r\theta)] + C(r\Phi)[-S\psi S(r\theta)] & C(r\theta) & rz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$0 \leq r \leq 1, \quad (7)$$

式中左边第一列可由第二列和第三列叉乘得到. $T(r)$ 表示目标物体原点由位置 1 到位置 2 的平移, $R_a(r)$ 和 $R_0(r)$ 分别表示两个转动, 其具体表达式见文献 [1] P141-142. 因此, 根据 POS_1 和 POS_2 , 可以求出上式中的 x , y , z , ψ , θ , Φ , 以获得 $D(r)$. 其中 $r = t/T$, t 是从一段开始计时, T 是一段路径运动的总时间. 若 r 对时间呈线性变化, 亦即对路径各段可以线性分点, 则 $D(r)$ 的运动将相应于一个恒定的线速度和两个恒定角速度. 图 2 表明了两个机械手和目标物体移动时的关系. 当目标物体从一段路径过渡到另一段路径时, 仍采用 Paul 的笛卡尔路径段过渡法.

一旦规划好目标物体路径, 便可以据此来规划机械手 L 的路径. 由于变换阵 R 在目标物体确定后为一常阵, 所以 L 的路径规划与目标物体路径规划完全相仿. 而 F 的路径及关节速度可以由约束矩阵方程导出.

4. 误差矩阵与补偿算法

如第 1 节所述, 当双手协调移动一个物体时, 在两个设置点之间存在误差. 图 3 表明了误差之间的关系.

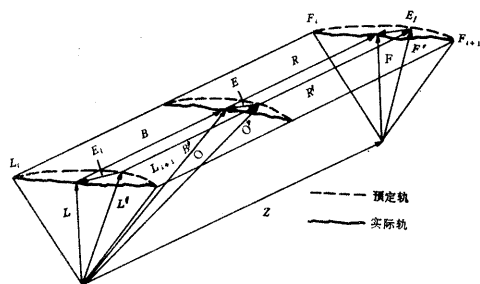
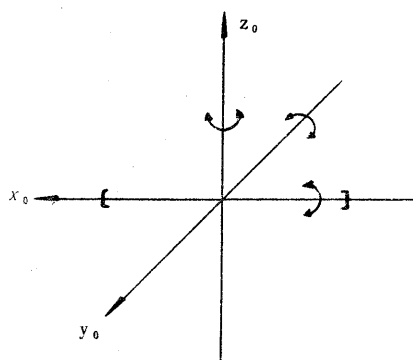
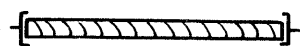


图 3 误差关系示意图

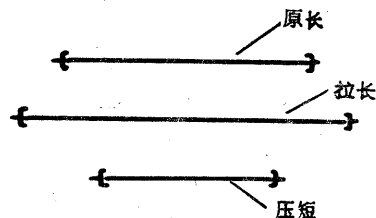
图中符号带撇者为预定变换矩阵，不带撇者为实际关系示意图



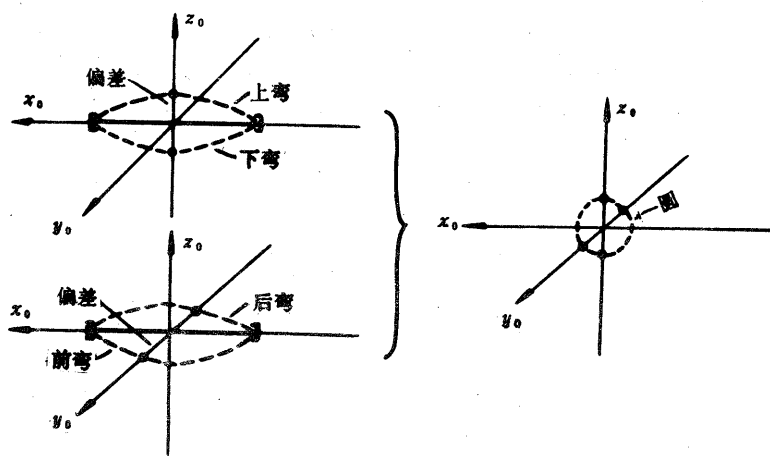
a) 坐标系 \$\{x, y, z\}\$ 原点不变，方位变化



b) 目标物体被扭曲



c) 坐标系 \$\{x, y, z\}\$ 的原点及方位不变，物体被拉长或压短



d) 坐标系 \$\{x, y, z\}\$ 的方位不变，原点移动

图 4 由误差引起的目标物体变形

由图 3 可以得到如下误差矩阵方程

$$E_i = L'^{-1} L = B'O'^{-1} L, \quad (8)$$

$$E_f = F'^{-1}F = R'^{-1}L'^{-1}ZF = R'^{-1}B'O'^{-1}ZF, \quad (9)$$

$$E = O'^{-1}O. \quad (10)$$

由图 2 可知 $O' = \text{POS}_1 \cdot D(r)$, 因此

$$E_l = B'D^{-1}(r)\text{POS}_1^{-1}L, \quad (11)$$

$$E = D^{-1}(r)\text{POS}_1^{-1}O = D^{-1}(r)\text{POS}_1^{-1}LB. \quad (12)$$

为了保证目标物体沿预定的轨线移动, 应尽可能使 E 接近单位矩阵.

在讨论误差矩阵方程之前, 首先分析一下由误差引起的目标物体变形. 各种变形如图 4 所示.

现在来分析误差矩阵方程 (12), 并导出补偿算法, 亦即在何种情况下, 应在两个设置点之间加一新点. 矩阵 E 可以分为方位误差矩阵 E_0 和位置误差向量 E_p 两部分. 由图 3 和图 4 a)、b), 可以用 E_{10} 代替 E_0 来求方位误差 (这样可以包含目标物体被扭曲情况), 以使求解过程简化. 由方程 (11) 可得

$$E_0 = B'_0 D_0^{-1}(r)\text{POS}_{10}^{-1}L_0. \quad (13)$$

由 E_{10} 可以求得误差欧拉角 Φ, θ, ψ 的最大绝对值 (见文献 [1] P65-70), 然后确定其是否超过预定误差指标 (预定误差指标根据目标物体允许最大变形而定).

为了求位置误差, 首先必须确定目标物体是否已经变形. 为此仅需确定 R_z 是否大于或小于 R'_z . 根据方程 (5) 有

$$R_p = L_0^{-1}\{Z_p + Z_0 F_p - L_p\}, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z \\ s_x & s_y & s_z \\ a_x & a_y & a_z \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} Z_x \\ Z_y \\ Z_z \end{bmatrix} + Z_0 \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} \right\}. \quad (15)$$

如果在 $\dot{R}_z = 0$ 时, $|R_z - R'_z| > \varepsilon$ (ε 是预先给定的一个较小的正数), 如图 4 c)、d) 所示, 则认为目标物体已经变形 (产生偏差). 对于目标物体被拉长 ($R_z - R'_z > \varepsilon$) 的情况, 需在两个设置点之间加一新点. 对于目标物体被压缩 ($R_z - R'_z < -\varepsilon$) 的情况, 还需求位置误差向量 E_p . 由方程 (12) 可得

$$E_p = D_0^{-1}(r)\text{POS}_{10}^{-1}L_0 B_p. \quad (16)$$

按定义 $B_p = \frac{1}{2}L_0^{-1}Z_0 F_p$, 所以

$$E_p = \frac{1}{2}D_0^{-1}(r)\text{POS}_{10}^{-1}Z_0 F_p. \quad (17)$$

此处是按 B_p 的定义得到的误差. 在求得最大误差 E_p 后, 仍需将偏差 (可以认为目标物体变形后中心线为一段圆弧) 分别加到 E_x 和 E_y , 然后确定其是否超过预定的指标. 以上求方位误差 Φ, θ, ψ 和位置误差 E_x, E_y, E_z 及 $R_z - R'_z > \varepsilon$ 时, 只要其中任一误差最大绝对值大于预定指标, 则认为误差太大, 需在两个设置点之间加一

新点, 重新计算;

为了求方位误差 Φ , θ , ψ 和位置误差 E_x , E_y , E_z 的最大绝对值, 需要求 E_{10} , R_p , E_p 的导数, 其导数如下:

$$\dot{E}_{10} = B'_0 \dot{D}_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} L_0 + B'_0 D_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} \dot{L}_0. \quad (18)$$

$$\dot{R}_p = \dot{L}_0^{-1}(\theta) [Z_0 F_p + Z_p - L_p] + L_0^{-1}(\theta) [Z_0 \dot{F}_p + Z_p - \dot{L}_p], \quad (19)$$

$$\dot{E}_p = \frac{1}{2} \dot{D}_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} Z_0 F_p + \frac{1}{2} D_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} Z_0 \dot{F}_p. \quad (20)$$

令 (18) - (20) 式中的导数等于零, 则可求得 R_z 和方位误差 E_x , E_y , E_z 的最大的绝对值. 此处求 $\dot{E}_{10}$ 的原因是 $\dot{\Phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ 的表达式中要用到 $\dot{E}_{10}$ 的元素. 令 $\dot{\Phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ 分别等于零, 即可求得误差欧拉角 Φ , θ , ψ 的最大绝对值.

但是要求解矩阵方程 (18) - (20) 却是非常困难的. 因为误差矩阵 E_l , E 的表达式就非常复杂, 更不用说它们的导数了. 所以我们对误差矩阵方程加以线性化. 但不能直接线性化 E_l 和 E , 因为它们在每个设置点是单位阵. 所以在两个设置点之间, 必定是高度非线性的矩阵函数.

我们可以线性化 F 和 L , 因为在两个设置点之间, 关节转角 θ_i 的变化是非常小的. 以 PUMA560 机械手为例, 当速度设置在 10 - 60 之间时, θ_i 的最大变化量为 0.07rad, 最小变化量为 0.004rad. 所以可以认为

$$\left. \begin{aligned} \cos(\tau\Delta\theta) &= 1, \quad \sin(\tau\Delta\theta) = \tau\Delta\theta \\ \cos(\theta_0 + \tau\Delta\theta) &= \cos\theta_0 - \sin\theta_0 \cdot \tau\Delta\theta \\ \sin(\theta_0 + \tau\Delta\theta) &= \sin\theta_0 + \cos\theta_0 \cdot \tau\Delta\theta \end{aligned} \right\}, \quad 0 < \tau < 1,$$

所以有

$$F(\theta_0 + \tau\Delta\theta) = F(\theta_0) + \dot{F}(\theta_0) \cdot \tau\Delta\theta, \quad 0 < \tau < 1, \quad (21)$$

$$L(\theta_0 + \tau\Delta\theta) = L(\theta_0) + \dot{L}(\theta_0) \cdot \tau\Delta\theta, \quad 0 < \tau < 1. \quad (22)$$

对于 $D(r)$, 同样可以线性化. 因为在一直线段上 $0 \leq r \leq 1$, 而一段路径又有若干个设置点. 所以在两个设置点之间 Δr 是非常小的. 因而有

$$D(r_0 + \tau\Delta r) = D(r_0) + D(r_0) \cdot \tau\Delta r, \quad 0 < \tau < 1. \quad (23)$$

因此线性化后的各矩阵方程为

$$\begin{aligned} R_p &= \left[L_0^{-1}(\theta_0) + \dot{L}_0^{-1}(\theta_0) \cdot \tau\Delta\theta \right] \cdot \{ Z_0 [F_p(\theta_0) + \dot{F}_p(\theta_0) \cdot \tau\Delta\theta] \\ &\quad + Z_p - [L_p(\theta_0) + \dot{L}_p(\theta_0) \cdot \tau\Delta\theta] \}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$E_p = \frac{1}{2} \left[D_0^{-1}(r_0) + \dot{D}_0^{-1}(r_0) \cdot \tau \Delta r \right] \cdot \text{POS}_{10}^{-1} Z_0 \cdot [F_p(\theta_0) + \dot{F}_p(\theta_0) \tau \Delta \theta], \quad (25)$$

$$E_{10} = B'_0 \left[D_0^{-1}(r_0) + \dot{D}_0^{-1}(r_0) \cdot \tau \Delta r \right] \cdot \text{POS}_{10}^{-1} \cdot [L_0(\theta_0) + \dot{L}_0(\theta_0) \tau \Delta \theta], \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_p &= \dot{L}_0^{-1}(\theta) \{ Z_0 [F_p(\theta_0) + \dot{F}_p(\theta_0) \cdot \tau \Delta \theta] \\ &\quad + Z_p - [L_p(\theta_0) + \dot{L}_p(\theta_0) \tau \Delta \theta] \} \\ &\quad + \left[\dot{L}_0^{-1}(\theta_0) + \dot{L}_0^{-1}(\theta_0) \cdot \tau \Delta \theta \right] \cdot \{ Z_0 \dot{F}_p(\theta) + Z_p - \dot{L}_p(\theta) \}, \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_p &= \frac{1}{2} \dot{D}_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} Z_0 [F_p(\theta_0) + \dot{F}_p(\theta_0) \cdot \tau \Delta \theta] \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[D_0^{-1}(r_0) + \dot{D}_0^{-1}(r_0) \tau \Delta r \right] \text{POS}_{10}^{-1} \dot{F}_p(\theta), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{10} &= B'_0 \dot{D}_0^{-1}(r) \text{POS}_{10}^{-1} [L_0(\theta_0) + \dot{L}_0(\theta_0) \cdot \tau \Delta \theta] \\ &\quad + B'_0 \left[\dot{D}_0^{-1}(r_0) + \dot{D}_0^{-1}(r_0) \tau \Delta r \right] \text{POS}_{10}^{-1} \dot{L}_0(\theta). \end{aligned} \quad (29)$$

式(24)–(29)中 $0 < \tau < 1$. 这样在求方位误差 Φ , θ , ψ 和位置误差 E_x , E_y , E_z 的最大绝对值时, 仅需计算 F_p , L , D^{-1} , $\dot{F}_p$, $\dot{L}$, $\dot{L}_0^{-1}$, $\dot{D}^{-1}$ 等在每一设置点的值即可, 使得计算量减少, 对于实时控制, 尤为重要.

5. 双手协调运动实验

为了验证本算法的有效性, 类似于文献〔3〕中的实验采用本算法已在 Clemson 大学机器人与控制实验室中完成. 实验为由 DEC VAX 11/750 计算机控制的两个机械手(系统的详细描述见〔4〕)处理一桶液体. 首先两个机械手抓住桶的两边, 并将其提起, 然后改变它的方位, 再将液体倒入另一开口较小的容器中. 最后将空桶放回. 一开始用示教盒教每个机械手从原始位置抓住桶的两边, 然后运行驻留在 DEC VAX 11/750 计算机内的协调任务程序. 程序用 C 语言写成, 程序流程按如下步骤进行:

- 1) 分别读 L 和 F 的一组初始关节位置;
- 2) 求 R' 和 B' 矩阵;
- 3) 输入路径段节点数(nod);
- 4) 读目标物体下一个节点位置;
- 5) 规划目标物体的笛卡尔轨迹;
- 6) 按照目标期望轨迹, 规划 L 的笛卡尔轨迹, 然后将其笛卡尔坐标转换成关节坐标^{〔2〕};
- 7) 令 n = 步数;
- 8) 由 L 的轨迹和约束矩阵方程, 亦即协调算法计算 F 的下一个设置点;

- 9) 确定误差是否超过预定指标;
- 10) 如果没有, 将关节坐标转换成整量码, 调用微处理器之间的通信程序, 将其发送到 L 和 F 的关节控制器; 否则, 分别在 L 和 F 的两个设置点加一新点, 并令 $n=n+1$, 转到 9);
- 11) 检查是否 $n=0$, 如果 $n \neq 0$, 令 $n=n-1$, 转到 8);
- 12) 检查是否 $\text{nod}=0$. 如果 $\text{nod} \neq 0$, 转到 4); 如果 $\text{nod}=0$, 任务执行完毕, 机器人放开目标物体并回到它们的原始位置.

通过实验得知, 在奇异点附近, 误差较大, 需在两个设置点之间加一新点; 在其它情况下, 误差一般较小, 并不需要加点. 这主要是在奇异点附近, 机械手的精度下降的原故. 由于文献〔3〕中的实验并没有考虑误差补偿问题, 所以采用本算法后, 使控制精度得以提高. 实验结果是满意的.

6. 结 论

本文分析了机器人双手协调运动中的动态与控制误差, 导出了误差矩阵方程并加以简化. 由 DEC VAX 11/750 计算控制的两个工业机械手 PUMA 560 已进行了实时控制实验, 取得了预期的结果. 本算法经过扩展, 亦可用于其它双手协调任务中去. 对于其它类型的工业机器人双手协调时的误差分析及补偿, 有一定的参考价值.

参 考 文 献

- (1) Paul, R.P., Robot Manipulators, Mathematics, Programming, and Control, MIT Press, (1981), 63-154.
- (2) 贺昱曜, 机器人PUMA560逆运动方程的新解法, 机器人, 3,3,(1989), 19-26.
- (3) Luh, J.Y.S, Zheng Y.F., Constrained Relations Between Two Coordinated Industrial Robots for Motion Control, Int.J. Robotics Research, MIT Press, 6, 3,(1987), 60-70.
- (4) Zheng Y.F., Luh J.Y.S, Jia P.F, A Real-time Distributed Computer System for Coordinated-motion Control of Two Industrial Robots, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, March 31-April, 3,(1987), Raleigh, NC.

Kinematic and Control Errors Analysis and Compensation In Coordinated-motion Control of Two Industrial Robots

He Yuyao

(Department of Automation, Xian Institute of Highway)

Luh J.Y.S

(Department of Electrical and Computer Engineering, Clemson University, SC, U.S.A.)

Abstract: In this Paper, kinematic and control errors in coordinated-motion control of two industrial robots are analyzed, and error equations are derived as well as compensation algorithm is presented. Experiment demonstrates that algorithm is effective. Because the algorithm is not developed

for some special industrial robots, it can be widely applied to coordinated-motion control. The algorithm has been used in real time coordinated-motion control of two industrial robots. The object deforms resulted from kinematic and control errors are discussed in the paper.

Key words: robot; Coordinated-motion control; error analysis; compensation algorithm; real time control

控制理论专业杂志概述*

陆吉林

林云寰

(复旦大学数学系)

(中山大学数学系)

23. IEEE Control, Systems Magazine (IEEE 控制系统杂志), 1981—, 美国电气与电子工程师协会所属控制系统学会主办, 季刊, 刊载有关计算机控制系统研究和应用的论文.

24. IEEE Journal of Robotics and Automation (IEEE 机器人学与自动化杂志), 1986—, 季刊, 刊载机器人、生产控制自动化方面的理论和应用的原始研究论文.

25. IEEE Transactions on Automatic Control (IEEE 自动控制汇刊), 1956—, 月刊, 刊载有关自动控制系统的理论、设计与应用方面的研究论文、评论、新技术介绍等.

26. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE 系统、人与控制论汇刊), 1971—, 双月刊, 内容有大规模系统、最优化、判定分析、模拟、控制论基础、图像识别、自适应系统与学习系统、生物控制论和人机系统等方面.

27. IMA Journal of Mathematical Control and Information (IMA 数学控制与信息杂志), 1984—, 季刊, 英国牛津大学应用数学研究所编辑, 发表有关数学控制理论, 系统论及相关信息科学理论研究的文章.

28. Information and Computation (信息与计算), 1957—, 月刊, 美国 Academic 出版社出版, 原刊名为 Information and Control, 1988 年改为现名, 发表理论计算机科学、信息论、控制论等方面的原始研究论文和评论.

29. International Journal of Control (国际控制杂志), 1965—, 月刊, 英国 Taylor & Francis 出版社出版, 内容涉及控制、控制系统、模型简化、最优控制、灵敏度、稳定性、随机系统、线性系统、非线性系统等.

30. International Journal of Robotics Research (国际机器人研究杂志), 1982—, 季刊, 美国麻省理工学院出版社出版, 刊载有关机器人知觉、动作控制、自动机械作用, 以及造型、系统和应用等方面的研究论文.

31. Journal A: Quarterly Journal of Automatic Control (自动控制季刊), 1959—, 季刊, 比利时自动控制联合会、荷兰皇家工程师协会控制与工程部联合主办, 刊载自动控制理论与应用方面的研究论文, 内容涉及到仪表应用, 计算机控制, 过程控制, 逻辑系统, 伺服系统等. (下转第 74 页)

* 本文的前 22 条刊于本刊 1989 年第 3 期.