

# 基于可操作性的串联机器人相对传动比优化<sup>\*</sup>

杨新刚 黄玉美 杨文栋 史恩秀

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

**【摘要】** 将串联机器人各关节传动链传动比的确定分解为相对传动比确定和绝对传动比确定,并从可操作性角度重点研究了前者。分析了条件数可操作性指标的实质,把相对传动比的确定归结为基于驱动空间的可操作性优化;给出了基于驱动空间全域可操作性的相对传动比优化模型;提出了考虑各动力元件速度驱动能力差异和末端位姿速度作业要求的优化模型中雅可比矩阵的获得方法。在此基础上对所设计的6自由度机器人的传动系统进行了相对传动比优化,提高了基于驱动空间的全域可操作性。

**关键词:** 机器人 雅可比矩阵 可操作性 条件数 传动比

**中图分类号:** TP242.2; TH112

**文献标识码:** A

## Relative Proportion of Serial Robot Transmission Ratios Optimization Based on Manipulability

Yang Xin'gang Huang Yumei Yang Wendong Shi Enxiu

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

### Abstract

Two steps are involved to determine transmission ratios of serial robot, i. e. relative proportion of transmission ratios determination and absolute transmission ratios determination, and the former is stressed from viewpoint of manipulability. Based on analyzing the essence of manipulability index related with condition number, the determination of relative proportion of transmission ratios was formulated as optimization of manipulability related to driving space. An optimization model on the basis of global manipulability related to driving space was given to determinate relative proportion of transmission ratios. A method to obtain Jacobi matrix in the optimization model was proposed with consideration of the difference of power elements' velocity driving capability and end-effector' pose velocity of job requirement. At last, an optimization process was conducted to determine relative proportion of transmission ratios of a 6-DOF serial robot, and its global manipulability related to driving space was increased.

**Key words** Robot, Jacobi matrix, Manipulability, Condition number, Transmission ratio

### 引言

串联机器人机械设计主要包括构型及杆件参数确定、传动系统设计及结构尺寸确定,机器人的性能评价贯穿于整个设计过程,一直是国内外学者关注的主要问题之一。为量化评价机器人运动及动力性能,学者们提出了可操作性的概念并给出了各种各

样的指标<sup>[1~3]</sup>。在机器人传动系统设计过程中,各关节传动链的传动方式确定后,一个重要的问题是各环节传动比的确定,其是否合理也可采用可操作性来评价。机器人的可操作性,是指机器人在其工作空间内沿各方向运动的能力和施加力的能力<sup>[4]</sup>。在机器人的各种可操作性指标中,雅可比矩阵类指标的研究最为广泛<sup>[1]</sup>。长期以来,基于雅可比矩阵

收稿日期: 2008-08-01 修回日期: 2008-10-08

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20050700007)

作者简介: 杨新刚,讲师,博士生,主要从事数控设备设计方法、参数标定及误差补偿等研究, E-mail: yxingang@xaut.edu.cn

的可操作性分析一般都是指关节空间到工作空间的可操作性分析,可用来进行机器人设计过程中的杆件尺度参数优化。然而机器人末端的运动一般并不直接由各关节提供,而是由动力源经过中间传动系统驱动关节来实现。中间各传动环节传动比的大小一方面会影响到末端的速度,另一方面会影响到末端的速度响应特性即可操作性。这种可操作性,不同于传统意义上的关节空间层面上的可操作性,而是驱动空间层面上的可操作性。另外,为减小大小臂和腕部的体积与质量,机器人普遍存在诱导运动<sup>[5]</sup>,因而在确定各环节传动比时还应考虑诱导运动的影响。目前,在关于机器人传动比确定方面还未见到系统的研究报告<sup>[6]</sup>。本文假定机器人杆件参数已经确定,动力源为旋转伺服电动机,传动系统的结构即传动环节的类型及布置已经确定,以此为前提对传动比确定的方法进行研究。

## 1 基于驱动空间的可操作性

机器人的雅可比矩阵通常被定义为从关节空间向操作空间运动速度传动的广义传动比,在本文中用  $J_q$  表示。若把  $J_q$  称为基于关节空间的雅可比矩阵,则可定义基于驱动空间的雅可比矩阵  $J$  为从驱动空间向操作空间运动速度传动的广义传动比,可描述为:  $\dot{x} = J\dot{m}$ , 其中  $\dot{x}$  为机器人末端在工作空间的速度,  $\dot{m}$  为驱动电动机的角速度。与基于关节空间雅可比矩阵的可操作性指标相对应,基于驱动空间雅可比的可操作性评价指标也可采用以下几种: ①  $J$  的条件数  $k$  或条件数的倒数  $1/k$ , 通常采用  $J$  的谱条件数即  $\text{cond}(J, 2) = \mu_1/\mu_r$  (其中  $\mu_1, \mu_r$  分别为  $J$  的最大、最小奇异值, 故  $1 \leq k \leq \infty, 0 \leq 1/k \leq 1$ )。②  $J$  最小条件数的倒数:  $1/k_{\min}$ 。③  $J$  的最小奇异值  $\mu_r$ 。④  $J$  行列式:  $\epsilon = \sqrt{\det[J(q)J^T(q)]}$ 。

设  $J$  的奇异值为  $\mu_i$ , 且  $\mu_1 \geq \mu_2 \geq \dots \geq \mu_r \geq 0$ ,  $J$  的奇异值分解为  $J = US_rV$ , 其中  $U, V$  为正交矩阵, 则

$$\dot{x} = US_rV\dot{m} \quad (1)$$

则  $\|\dot{x}\|_2 = \|US_rV\dot{m}\|_2 = \|S_rV\dot{m}\|_2$

令  $V\dot{m} = p = [p_1, p_2, \dots, p_r]^T$ , 由于

$$\|p\|_2 = \|\dot{m}\|_2$$

及  $\|\dot{x}\|_2 = \|\mu_1 p_1, \mu_2 p_2, \dots, \mu_r p_r\|_2$

则  $\mu_r \|p\|_2 \leq \|\dot{x}\|_2 \leq \mu_1 \|p\|_2$ , 得

$$\|\dot{x}\|_2 / \mu_1 \leq \|\dot{m}\|_2 \leq \|\dot{x}\|_2 / \mu_r$$

令  $\|\dot{x}\|_2 = 1$ , 则

$$1/\mu_1 \leq \|\dot{m}\|_2 \leq 1/\mu_r \quad (2)$$

由式(2)知,在上述各种指标中,最小奇异值指

标  $\mu_r$  反映的是驱动速度的上限;最小条件数倒数指标  $1/k_{\min}$  反映的是机器人操作性最好的情况;条件数或条件数的倒数指标反映的是在某一姿态下,末端位姿速度  $\|\dot{x}\|_2 = 1$  时所引起的  $\|\dot{m}\|_2$  的最大值  $\|\dot{m}\|_{2\max}$  与最小值  $\|\dot{m}\|_{2\min}$  之比,即驱动速度的变化范围,前者为  $\|\dot{m}\|_{2\max}/\|\dot{m}\|_{2\min}$ , 而后者为  $\|\dot{m}\|_{2\min}/\|\dot{m}\|_{2\max}$ 。由于矩阵行列式的值并不能代表求逆运算的稳定性,因此用  $J$  的行列式作为可操作性的指标有一定缺陷<sup>[2]</sup>。综上所述,条件数及条件数倒数指标所反映的信息比较全面,而条件数倒数指标在所有位姿点均为有限值,故本文采用  $1/k$  作为局部可操作性的评价指标。

设  $\dot{q}$  为关节速度,定义  $J_m$  为驱动空间到关节空间的广义传动比,则有  $\dot{q} = J_m\dot{m}$ 。机器人普遍存在诱导运动,所以  $J_m$  一般为一对角占优的矩阵,其主对角元反映的是各关节传动链不考虑诱导运动时的传动比,非主对角元反映的是诱导运动传动比。由于  $\dot{x} = J_q\dot{q}$ , 则基于驱动空间的雅可比矩阵可表示为

$$J = J_q J_m \quad (3)$$

一般情况下,  $J_m$  为一非正交矩阵,因此,  $\text{cond}(J, 2) \neq \text{cond}(J_q, 2)$ , 这说明基于驱动空间的可操作性一般不等价于基于关节空间的可操作性。因此在机器人各杆参数给定的情况下,基于驱动空间的可操作性还受  $J_m$  的影响。同时  $J_m$  中又包含了各环节传动比的信息,因此在完成关节空间的可操作性优化决定了杆件尺度参数之后,可通过驱动空间的可操作性优化以合理分配各关节传动链的传动比。在机器人设计的过程中,可操作性优化的过程应该是如上所述的一个递阶优化过程。

## 2 相对传动比全域优化模型

各关节传动链传动比的确定包含两部分内容:一是各环节传动比相对比例的确定即相对传动比的确定,另一个是各环节传动比具体数值的确定即绝对传动比的确定,而前者是后者的基础。由式(3)可以看出,在  $J_q$  给定的情况下,  $\text{cond}(J, 2)$  只与  $J_m$  中各元素的相对比例有关,因此基于雅可比矩阵条件数倒数  $1/k$  的可操作性优化只能决定由  $J_m$  各非零元素相对比例所代表的相对传动比。

机器人的可操作性指标  $1/k = 1/\text{cond}(J, 2)$  的位姿依赖性很强,因此它所反映的信息是局部的。从速度角度来看,在末端速度一定的情况下,相对传动比优化的目标应该是使得在全域内电动机速度的平均波动尽可能小,从而可通过选择合适的绝对传

动比使得电动机能工作在较经济的状态,同时也使得驱动空间的单位位置增量引起的工作空间的末端广义位置增量在全域范围内的波动尽可能小,从而为控制精度的提高奠定基础。所以确定相对传动比的过程可归结为基于驱动空间的全域可操作性优化问题。为评定机器人在其工作空间内的全域可操作性,Gosselin和Angeles在应用雅可比矩阵条件数指标进行各向同性机构设计时,定义了一个平均灵巧性 $\eta$ 作为全域性指标<sup>[7]</sup>。基于上述全域可操作性指标,定义基于驱动空间的全域可操作性指标为

$$\eta_c = \frac{\int_w \frac{1}{\text{cond}(\mathbf{J}, 2)} d\tau_w}{\int_w d\tau_w} = f(\mathbf{u}_x) \quad (4)$$

式中  $\mathbf{u}_x$ ——各环节相对传动比组成的向量

由此,相对传动比寻优模型可表述为

$$\max f(\mathbf{u}_x) \quad (5)$$

优化变量:各环节的相对传动比。约束条件:关节活动范围,已经确定的传动系统结构。

若将在每一位姿点的电动机速度波动范围记为  $l_i = \|\dot{\mathbf{m}}\|_{2\min} / \|\dot{\mathbf{m}}\|_{2\max}$ , 则优化目标等价于  $\max\left(\int_w l_i d\tau_w / \int_w d\tau_w\right)$ , 因此优化结果是使全域内  $l_i$  的平均值尽可能趋近于1,从而使机器人机构从驱动空间看尽可能接近各向同性。

### 3 优化用雅可比矩阵及绝对传动比的确定

$\mathbf{J}$  具有量纲依赖性,当  $\dot{\mathbf{m}}$  及  $\dot{\mathbf{x}}$  的量纲发生变化时,  $\mathbf{J}$  也会发生改变,从而使得  $\text{cond}(\mathbf{J}, 2)$  发生变化。在进行机器人速度分析时,这一特点对分析结果影响不大;在采用式(5)模型进行优化时则会影响到优化的结果。 $\dot{\mathbf{m}}$  与  $\dot{\mathbf{x}}$  的量纲对  $\mathbf{J}$  的影响是不同的,对于各关节都采用旋转伺服电动机驱动而言,  $\dot{\mathbf{m}}$  的量纲是统一的,均为角速度单位,因此其量纲统一变化时不影响  $1/k$  的值,但若  $\dot{\mathbf{m}}$  各分量选择不同的角速度单位则会改变  $1/k$  的值。而  $\dot{\mathbf{x}}$  是广义速度,包含角速度和线速度,二者量纲的不同组合将改变  $1/k$  的值从而影响到优化结果,因而合理确定  $\dot{\mathbf{x}}$  及  $\dot{\mathbf{m}}$  的量纲使其与实际相符合是确定优化模型中  $\mathbf{J}$  的前提。

机器人作业的速度要求常以末端的最大线速度  $\|\mathbf{v}\|_{2\max} = a$  及最大角速度  $\|\boldsymbol{\omega}\|_{2\max} = b$  形式或末端的平均线速度  $\|\mathbf{v}\|_{2\text{avg}} = a$  及平均角速度  $\|\boldsymbol{\omega}\|_{2\text{avg}} = b$  形式给出。 $a$ 、 $b$  为常数并有不同的量纲,二者反映了所要求的末端角速度与线速度的匹配关系,因此在相对传动比的优化过程中应体现这种匹配关系要求。可按照如下两种方法进行处理:

(1) 将角速度要求和线速度要求分别处理,由于

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_v \dot{\mathbf{m}} \\ \mathbf{J}_\omega \dot{\mathbf{m}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

则可利用  $\mathbf{J}_v$ 、 $\mathbf{J}_\omega$  分别建立位置和姿态的优化模型:首先基于  $\mathbf{J}_v$  建立优化模型,通过优化得到与末端线速度有关传动环节的相对传动比,在此基础上基于  $\mathbf{J}_\omega$  建立优化模型,通过优化得到其他传动环节的相对传动比。这种方法比较适合位置和姿态可分离的机器人。

(2) 把末端线速度和角速度的量纲进行匹配处理,在此基础上确定作为优化用的  $\mathbf{J}$ :保持线速度  $\mathbf{v}$  的量纲不变,  $\boldsymbol{\omega}$  的量纲以  $c = b/a$  倍的原量纲作为  $\dot{\mathbf{x}}$  各分量的新量纲,这样当  $\mathbf{v}$  及  $\boldsymbol{\omega}$  均为作业要求的最大值或平均值时,经匹配处理后在量值上  $\|\boldsymbol{\omega}\|_2 = \|\mathbf{v}\|_2$ 。这种方法适用的范围广,因此本文采用此方法处理  $\dot{\mathbf{x}}$  各分量的量纲。

对于关节驱动电动机转速的量纲,其确定应考虑到电动机速度驱动能力。额定速度高的电动机速度驱动能力强,而额定速度低的电动机速度驱动能力相对较弱。设各关节驱动电动机的额定速度分别为  $n_1, n_2, \dots, n_m$  (均为同一量纲),则分别取  $k_i = n_i/n_1$  倍的原量纲作为  $\dot{\mathbf{m}}$  各分量新量纲,其中  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

记  $k_{ic} = k_i c$ 。对于一个6自由度非冗余机器人,由  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{m}}$ , 得

$$[\mathbf{v}, c\boldsymbol{\omega}]^T =$$

$$\mathbf{J}_f [\dot{m}_1, k_2 \dot{m}_2, k_3 \dot{m}_3, k_4 \dot{m}_4, k_5 \dot{m}_5, k_6 \dot{m}_6]^T \quad (7)$$

其中

$$\mathbf{J}_f =$$

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12}/k_2 & J_{13}/k_3 & J_{14}/k_4 & J_{15}/k_5 & J_{16}/k_6 \\ J_{21} & J_{22}/k_2 & J_{23}/k_3 & J_{24}/k_4 & J_{25}/k_5 & J_{26}/k_6 \\ J_{31} & J_{32}/k_2 & J_{33}/k_3 & J_{34}/k_4 & J_{35}/k_5 & J_{36}/k_6 \\ J_{41}/c & J_{42}/k_{2c} & J_{43}/k_{3c} & J_{44}/k_{4c} & J_{45}/k_{5c} & J_{46}/k_{6c} \\ J_{51}/c & J_{52}/k_{2c} & J_{53}/k_{3c} & J_{54}/k_{4c} & J_{55}/k_{5c} & J_{56}/k_{6c} \\ J_{61}/c & J_{62}/k_{2c} & J_{63}/k_{3c} & J_{64}/k_{4c} & J_{65}/k_{5c} & J_{66}/k_{6c} \end{bmatrix} \quad (8)$$

以  $\mathbf{J}_f$  为式(4)中优化用的  $\mathbf{J}$  作为相对传动比寻优的依据。

在相对传动比确定的基础上,绝对传动比的确定应满足机器人的末端速度所确定的最大关节速度要求。在奇异位置附近,会导致某个或某几个的关节速度很大,因此可依据奇异位置附近的最大末端速度要求确定这些关节的最大速度,然后根据所选

电动机的速度来确定这些环节的绝对传动比,再根据相对传动比确定其他环节的传动比。通常绝对传动比大的环节可考虑采用较低速电动机以减小传动链长度或传动件尺寸,这种情况需要重新按式(8)写出  $J_f$  以式(5)进行优化计算。

### 4 算例

基于全域可操作性对所设计的一台6自由度机器人的相对传动比进行了寻优。机器人外观及传动系统布置方案如图1所示。

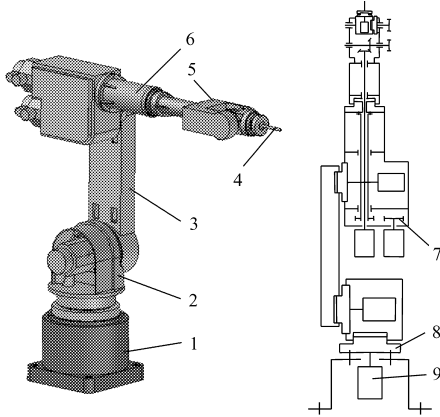


图1 机器人外观及传动系统布置

Fig.1 Robot appearance and arrangement of its transmission system

- 1. 基座 2. 腰部 3. 大臂 4. 末端执行器 5. 腕部 6. 小臂
- 7. 同步带轮 8. 谐波减速器 9. 电动机

为提高机器人末端的精度,在传动系统的设计上采用了具有高重复精度、小反向间隙的谐波减速器作为主要减速元件;采用短传动链,并将大传动比的谐波减速器置于传动链末端。采用DH法建立连杆坐标系,如图2所示,其中  $\Sigma_0$  为基座坐标系,  $\Sigma_i$  为连杆坐标系,  $q_i$  为各关节变量,  $a_2 = 600$  mm,  $a_3 = 90$  mm,  $d_4 = 815.5$  mm。

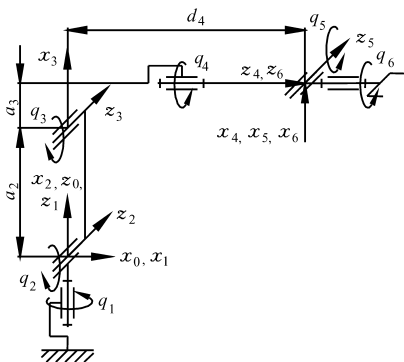


图2 机器人坐标系

Fig.2 Coordinate systems of robot

为便于分析,对该机器人的传动系统采用图3描述,与实际机构相对应的在结构上相互独立的各环节传动比在图中均以单独的一个符号表示。图中

$m_i$  为电动机转速,  $q_i$  为各关节转速,  $u_i$  为不考虑诱导运动的各关节传动比;关节4和5之间存在诱导运动,其传动比为  $u_{45}u_5$ 。文中的传动比为驱动端速度与末端速度之比。

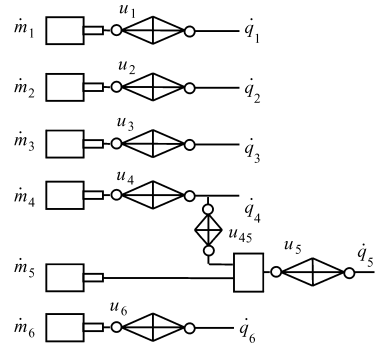


图3 传动系统框图

Fig.3 Block diagram of driving system

设电动机转向以正视顺时针为正,各关节正转向以图2为准。则可得关节空间到驱动空间的雅可比矩阵如下:

令  $\dot{q} = J_m \dot{m}$ , 则

$$J_m = \begin{bmatrix} 1/u_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/u_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/u_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/u_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(u_4 u_{45}) & 1/u_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/u_6 \end{bmatrix}$$

为减小腕部尺寸,取  $u_{45} = -1$ 。以下对  $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$  的相对比例进行寻优。记基于关节空间的雅可比矩阵为

$$J_q = [J_{q1} J_{q2} J_{q3} J_{q4} J_{q5} J_{q6}] = [J_{qv} J_{qw}]^T$$

记  $s_i = \sin q_i$ ,  $c_i = \cos q_i$ ,  $s_{ij} = \sin(q_i + q_j)$ ,  $c_{ij} = \cos(q_i + q_j)$ , 以 rad/s 为角速度单位, mm/s 为线速度单位,得  $J_q$  各组成部分如下

$$J_{q1} = \begin{bmatrix} -s_1(c_{23}a_3 - s_{23}d_4 + c_2a_2) \\ c_1(c_{23}a_3 - s_{23}d_4 + c_2a_2) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{q2} = \begin{bmatrix} -c_1(s_{23}a_3 + c_{23}d_4 + s_2a_2) \\ -s_1(s_{23}a_3 + c_{23}d_4 + s_2a_2) \\ -c_{23}a_3 + s_{23}d_4 - c_2a_2 \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{J}_{q3} &= \begin{bmatrix} -c_1(s_{23}a_3 + c_{23}d_4) \\ -s_1(s_{23}a_3 + c_{23}d_4) \\ -c_{23}a_3 + s_{23}d_4 \\ -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{J}_{q4} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -c_1s_{23} \\ -s_1s_{23} \\ -c_{23} \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}_{q5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ c_1c_{23}s_4 - s_1c_4 \\ s_1c_{23}s_4 + c_1c_4 \\ -s_{23}s_4 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{J}_{q6} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -(c_1c_{23}c_4 + s_1s_4)s_5 - c_1s_{23}c_5 \\ -(s_1c_{23}c_4 - c_1s_4)s_5 - s_1s_{23}c_5 \\ s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

设机器人各驱动电动机额定速度相同,各关节变量取值范围为:  $-175^\circ \leq q_1 \leq 175^\circ$ ,  $-190^\circ \leq q_2 \leq 10^\circ$ ,  $-240^\circ \leq q_3 \leq 70^\circ$ ,  $-360^\circ \leq q_4 \leq 360^\circ$ ,  $-105^\circ \leq q_5 \leq 105^\circ$ ,  $-360^\circ \leq q_6 \leq 360^\circ$ ,末端的要求速度为:最大线速度  $\|\mathbf{v}\|_{2\max} = 2\,000\text{ mm/s}$ ,最大角速度  $\|\boldsymbol{\omega}\|_{2\max} = 9\text{ rad/s}$ 。对末端速度量纲规格化处理:取末端线速度单位为  $\text{mm/s}$ ,角速度单位为  $0.004\,5\text{ rad/s}$ ,有  $\mathbf{J}_f = [\mathbf{J}_{qv} \ 222.222\ 2\mathbf{J}_{q\omega}]^T \mathbf{J}_m$ 。以  $\mathbf{J}_f$  作为式(4)中优化用的  $\mathbf{J}$  并按式(5)建立全域内的优化模型。对上述模型离散化并采用遗传算法进行寻优,经过 800 代后,得最优的相对传动比为:  $u_1 : u_2 : u_3 : u_4 : u_5 : u_6 = 1 : 1.650\,6 : 1.289\,4 : -0.522\,6 : -0.403\,4 : 0.333\,4$ 。优化过程中全域可操作性  $\eta_z$  变化如图 4 所示,可以看出,随着优化过程的进行,基于全域内的可操作性得到逐步改善。优化前各环节传动比的初选值为:  $u_1, u_2 = 100$ ,  $u_3 = -100$ ,  $u_4 = -50$ ,  $u_5, u_6 = 50$ ,  $u_{45} = -1$ ,此时  $\eta_z = 0.14$ ,采用优化后的相对传动比,则  $\eta_z = 0.21$ 。另外,仅就绝对值来说,从优化结果可以看出,相对

$u_1$  而言,  $u_2, u_3$  较大,而  $u_4, u_5, u_6$  相对较小。一般情况,因为关节 2 的负载最大,要求关节 2 的输出扭矩也最大,所以关节 2 的传动比  $u_2$  最大。这与许多具有类似结构的商品化机器人是一致的。例如,按照安川 MOTOMAN 机器人 EH80 提供的各关节最大速度数据,若假定各驱动电动机额定速度相同,则可大致确定 EH80 机器人各关节的传动比,从而计算获得:  $u_2 = 1.217\,2u_1$ ,  $u_3 = 1.064\,5u_1$ ,  $u_4 = 0.740\,6u_1$ ,  $u_5 = 0.740\,6u_1$ ,  $u_6 = 0.486\,1u_1$ 。可以看出,相对于  $u_1$  而言,  $u_2, u_3$  较大,且  $u_2$  最大,而  $u_4, u_5, u_6$  相对较小。

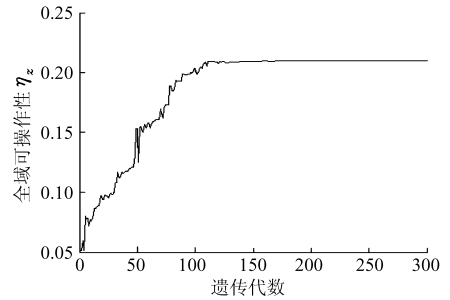


图 4 优化过程可操作性均值变化图  
Fig. 4 Mean manipulability changing in optimization

### 5 结论

- (1) 基于驱动空间的条件数或条件数倒数的可操作性指标反映的是在某一位姿下,末端位姿速度给定时所引起驱动速度的变化范围,其一般不等价于基于关节空间的可操作性。相对传动比的优化可归结为基于驱动空间的全域可操作性优化问题。
- (2) 用条件数倒数构造了全域可操作性指标,并在此基础上给出了相对传动比寻优模型。
- (3) 用于相对传动比优化的雅可比矩阵具有量纲依赖性,须依据末端位置和姿态速度要求及电动机额定速度的大小来综合确定。
- (4) 对一台 6 自由度机器人的相对传动比建立了优化模型,并采用遗传算法进行了寻优,改善了基于操作空间的可操作性。本文对于其他坐标运动类多轴制造装备的传动系统设计也具有一定借鉴的意义。

### 参 考 文 献

- 1 石志新, 罗玉峰, 陈红亮, 等. 机器人机构的全域性能指标研究[J]. 机器人, 2005, 27(5): 420~422.
- 2 刘迎春, 余跃庆, 姜春福. 机器人可操作性研究进展[J]. 机械设计与研究, 2003, 19(4): 34~37.  
Liu Yingchun, Yu Yueqing, Jiang Chunfu. Survey of robot manipulability[J]. Journal of Machine Design and Research, 2003, 19(4): 34~37. (in Chinese)

摄像机标定技术研究。通过试验与分析可知,基于改进的Harris角点提取方法提高网络训练样本集的数据精度,综合采用归一化、提前终止等多种策略,合理选择隐层神经元个数和网络训练函数,从而改

善网络的泛化能力,可以显著提高摄像机的标定精度,并能大大降低传统方法操作的复杂程度,减少坐标间转换造成的累计误差。本文研究方法可应用于高精度的三维测量工作。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Haojun, Zhang Guilin. Feature correlation tracking algorithm using SUSAN operator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 34~37.
- 2 Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector [C] // *Proceedings Fourth Alvey Vision Conference*, Manchester, 1988: 147~151.
- 3 刘阳成,朱枫.一种新的棋盘格图像角点检测算法[J]. *中国图像图形学报*, 2006, 11(5): 656~660.  
Liu Yangcheng, Zhu Feng. A new kind of arithmetic of chessboard corner detection [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2006, 11(5): 656~660. (in Chinese)
- 4 Martin T H, Howard B D, Mark B. Neural network design [M]. Beijing: China Machine Press, CITIC Publishing House, 2008.
- 5 Mark B L, Cihan H D, Mahesh V. The use of feed forward neural networks for machine vision calibration [J]. *International Journal of Production Economics*, 1999, 60~61: 479~489.
- 6 周开利,康耀红.神经网络及其MATLAB仿真程序设计[M].北京:清华大学出版社,2005.
- 7 Tsai R. A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses [J]. *IEEE Journal of Robotics & Automation*, 1987, 3(4): 323~344.
- 8 张健新,段发阶,叶声华.“两步法”求取双目视觉传感器中摄像机位置关系[J]. *光电工程*, 1998, 125(5): 38~42.
- 9 崔岸,刘业峰,袁智,等.摄像机参数的三线性插值误差补偿标定方法[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 187~190.  
Cui An, Liu Yefeng, Yuan Zhi, et al. Camera calibration method of tri-linear interpolation error compensation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 187~190. (in Chinese)

#### (上接第 174 页)

- 5 Henten E J, Tuijl B J, Hoogaker G J, et al. An autonomous robot for de-leafing cucumber plants grown in a high-wire cultivation system [C] // *Biosystems Engineering*, 2006, 94(3): 317~323.
- 6 Xu Huirong, Zhu Shengpan, Ying Yibin, et al. Application of multispectral reflectance for early detection of tomato disease [C] // *Proc. of SPIE 2006 Optics for Natural Resources, Agriculture, and Foods*, 2006, 6381: 63810R.1~63810R.8.
- 7 毛罕平,张红涛.储粮害虫图像识别的研究进展及展望[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(4): 175~179, 186.  
Mao Hanping, Zhang Hongtao. Research progress and prospect for image recognition of stored-grain pests [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(4): 175~179, 186. (in Chinese)
- 8 Tsai W. Moment-preserving thresholding: a new approach [J]. *CVGIP*, 1985, 29(3): 377~393.
- 9 罗诗途,罗飞路,张■,等.基于梯度调整的矩不变自动阈值图像分割算法[J]. *计算机应用*, 2004(6): 11~13.
- 10 Arlma S, Kondo N, Shibaxo Y. Studies on cucumber harvesting robot: II [J]. *Journal of the Japanese Society of Agriculture Machinery*, 1994, 56(6): 69~76.

#### (上接第 213 页)

- 3 陈敏华.机器人操作手运动能力指数的应用[J]. *机床与液压*, 2003(2): 102~104.  
Chen Minhua. Applications of moving capability index of robotic manipulator [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2003(2): 102~104. (in Chinese)
- 4 理查德·摩雷,李泽湘,夏恩卡·萨里特里.机器人操作的数学导论[M].北京:机械工业出版社,1998.
- 5 林义忠,黄玉美,程祥.串联机器人诱导运动的分析和研究[J]. *中国机械工程*, 2004, 15(15): 1 323~1 326.  
Lin Yizhong, Huang Yumei, Cheng Xiang. Analysis and research of inductive motion in serial robots [J]. *China Mechanical Engineering*, 2004, 15(15): 1 323~1 326. (in Chinese)
- 6 Goritov A N, Korikov A M. Optimality in robot design and control [J]. *Automation and Remote Control*, 2001, 62(7): 1 097~1 103.
- 7 Gosselin C M, Angeles J. A globe performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators [J]. *ASME J. Mech. Des.*, 1991, 113(3): 220~226.