

多自由度机器人抓取末端振动自动稳健性控制技术

姚莹

(陕西机电职业技术学院 智能制造学院, 陕西 宝鸡 721001)

摘要:针对多自由度机器人抓取末端控制精度低、稳定性差、控制延迟长的问题,提出抓取末端振动自动稳健性控制技术。建立符合惯性力项、重力项、离心力项与哥式力项的动力学模型,分析多自由度机器人的动力学变量;选择自适应增益比例、位置加权因子、速度加权因子作为优化目标参数,补偿位置阻抗环境刚度与位置估算的参数误差;设计稳健的多自由度机器人抓取末端自动控制方法。实验结果表明:所提方法的抓取末端振动抑制效果更佳,完成控制指令时间短,控制精度高。

关键词:动力学模型;参数分析;自适应自动控制器;多自由度机器人;抓取末端

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0164-05

Automatic Robustness Control Technology for Vibration of Multi DOF Robot Grasping End

YAO Ying

(College of Intelligent Manufacturing, Shaanxi Institute of Mechatronics Technology, Baoji 721001, China)

Abstract: For low control accuracy, poor stability and long control delay of the grasping end, an automatic robustness control technology of multi degree of freedom (DOF) robot grasping end vibration is proposed. A dynamic model conforming to the inertia force term, gravity term, centrifugal force and Coriolis force term is established, and the dynamical variables of the multi DOF robot are analyzed. Adaptive gain ratio, position weighting factor, velocity weighted factor are selected as optimized target parameters, the parameter errors of the position impedance environmental stiffness and position estimation are compensated, and a robust automatic control method for the grasping end of the multi DOF robot is designed. The experimental results show that the vibration suppression effect of the multi DOF robot is better with shorter time in completing control command and better control accuracy.

Keywords: dynamic model; parameter analysis; adaptive controller; multi-DOF robot; gripping end

0 引言

具有3个及以上可编程轴的机器人称为多自由度机器人。多自由度机器人的运动自由度是指能够独立运动的关节数目,反映机器人动作的灵活性^[1-2]。多自由度机器人的应用减轻了劳动作业强度,但抓取末端受振动影响而稳定性不足。针对多自由度机器人抓取的研究较多,例如:郑文昊等^[3]建立了动力学模型控制约束区域,基于自适应律与力矩约束,设计机器人自适应控制系统。但是该方法的振动抑制效果不佳,存在控制不稳定的情况。蒋沅等^[4]将非线性反馈与自适应模糊系统相结合,基于自适应模糊补偿系统构建了机器人自动控制器,利用非线性逼近补偿控制项,完成控制系统的设计。但是该方法的末端指令控制时间长,效率低。冯浩等^[5]建立了机器人数学模型,采用神经网络逼近不利因素,提升稳态误差,设计神经网络自动控制器系统完成机器人的末端控制。但是该方法的控制精度不高,控制效果不佳。以上方法在应用到多自由度机器人抓取过程时,受到末端振动干扰,导致抓取与跟踪过程存在较大误差。

为此,本文研究多自由度机器人抓取末端振动自动控制。根据多自由度机器人的动力学变量分析结果,选取优

化目标,构建自适应阻抗自动控制器;基于自适应跟踪方法,实现准确跟踪目标;利用 Lyapunov 理论获得最稳定的运动轨迹,实现多自由度机器人抓取末端振动的高精度控制。实验结果证明本文方法可以提高精度和效率。

1 多自由度机器人抓取中振动动力学因素计算

在多自由度机器人抓取过程中,每个关节轴在运动时都会影响其他关节的输出,形成惯量耦合效应,造成异常振动。多角度机械臂转动关节时的动力学方程中不仅含有惯性力项、重力项,还有哥式力项和离心力项,关节之间的耦合关系比较复杂,振动干扰因素较多。在机器人末端抓取过程中,独立运动关节数目和多关节的运动速度是动力学模型的主要振动影响参数,所以本文选用易于编程的 Lagrange 法求取多自由度机器人的惯性力项、哥式力项、离心力项、重力项,以构建机器人抓取过程的动力学模型^[6-8]。

1.1 惯性力项

速度传递可比矩阵 $\begin{bmatrix} b \\ e \end{bmatrix}$ 公式表达如下:

$$\begin{bmatrix} b \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_z \\ k_s \end{bmatrix}_{6 \times 6} \dot{\Theta} \quad (1)$$

式中: k_z 表示运动关节矩阵的线速度; k_s 表示角速度; $\dot{\Theta}$ 表示机器人关节速度参数。

动能 Y 公式表达如下:

$$Y = \frac{1}{2} \dot{\Theta}^T Q \dot{\Theta} \quad (2)$$

式中: Q 表示机器人自身质量; J 表示运动时间系数。进一步得到质量矩阵, 如下:

$$K_Q = \sum_{o=1}^m (K_z^{(o)T} K_z^{(o)} + K_s^{(o)T} O_o K_s^{(o)}) \quad (3)$$

角速度与线速度表达公式如下:

$$\begin{cases} K_z^{(o)} = [k_{z1}, k_{z2}, \dots, k_{zo}] \\ K_s^{(o)} = [k_{s1}, k_{s2}, \dots, k_{so}] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $o=1, 2, \dots, m$, 表示机器人多关节控制函数 O_o 的第 o 个关节; K 表示连杆质心速度; z 和 j 表示关节力矩与关节变量。

1.2 离心力项与哥式力项

根据 Christoffell 符号法和质量矩阵求得哥式力项矩阵, 其公式表达如下:

$$V_{ok} = \sum_{o=1}^m V_{ok,l} \dot{w}_l \quad (5)$$

式中: \dot{w}_l 表示同时运动 l 个关节的速度; $V_{ok,l}$ 表示离心力系数。

计算多自由度机器人抓取末端重力势能 $b(w)$, 其公式表达如下:

$$b(w) = \sum_{o=1}^m q_o g t_o(w) \quad (6)$$

式中: g 表示重力, 重力势能受关节轴变化切线速度 t 的影响; q_o 表示关节运动方向自由度; $t_o(w)$ 表示状态空间方程。

在时间 J 的约束下, k_{io} 为补偿摩擦力, 计算重力项 G_o 公式表达如下:

$$G_o = \sum_{o=1}^m q_o g^J k_{io} \quad (7)$$

最终得到完整动力学模型表达公式如下:

$$Dg = F_o t_o(w) + F_d \text{sgn}(\dot{w}) - G_o \quad (8)$$

式中: F_d 表示静摩擦系数对角矩阵; F_o 表示黏性摩擦系数对角矩阵; $\text{sgn}(\dot{w})$ 表示关节速度函数。

基于此, 完成多自由度机器人抓取末端动力学模型构建。

2 振动控制的参量分析

构建完成多自由度机器人抓取的运动学模型后, 通过振动控制参数分析, 可进一步分析振动的控制关键因素。

多自由度机器人抓取过程中, 末端振动控制满足关节约束条件^[9], 其公式表达如下:

$$\Theta = [w'_0, w'_1]^T = [\vartheta_1, \dots, \vartheta_{10}]^T \quad (9)$$

式中: $[w'_0, w'_1]^T$ 表示多自由度机器人手臂连杆运动标记矩阵; Θ 表示关节夹角; T 为转置符号。将多自由度器

人自由空间控制集合倾斜化操作, 设置停止标记以获得路径映射, 当路径映射 $v[0, 1] \rightarrow V_{free}$, $v[0] = \vartheta_{start}$, $v[1] = \vartheta_{goal}$, $(P_{obj}, h_v) \rightarrow f(\vartheta_{goal})$ 时, 目标位姿方程 $P_r = f(\Theta)$ 的状态约束矩阵⁻¹ $Y_o(w_o)$ 表达式如下:

$${}^{o-1}Y_o(w_o) = \begin{bmatrix} v & v_s d & d_s d & s v \\ d & v_s v & d_s v & s d \\ 0 & d_s & v_s & f_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: v 表示位移; d 表示方向; s 表示旋转角度; f 表示平移距离。建立多自由度分层子维空间振动模型, 其公式表达如下:

$$\begin{cases} q \frac{fB}{fy} = A \cos \beta - C - q g \sin \vartheta, q b \frac{f\vartheta}{fy} = A \sin \beta + U - q g \cos \vartheta \\ K_x \frac{f e_x}{fy} + (K_u - K_c) e_u e_c + K_{cu} (e_u^2 - e_c^2) = Q_x \\ \frac{f x}{fy} = B \cos \vartheta, \frac{f u}{fy} = B \sin \vartheta, \frac{f \rho}{fy} = e_x \\ \beta = \rho - \vartheta, \psi = g(r_o) \end{cases} \quad (11)$$

式中: c, u 表示质心坐标位置; r_o 表示控制系统误差; e_u, e_c 表示角速度; ψ 表示多角度关节位形; q 表示多自由度机器人质量; g 表示重力; K 表示连杆质心速度; A, B, C 表示子层空间; β 表示约束角度; ρ 表示关节活动角度; $\sin \vartheta, \cos \vartheta$ 表示初始角度设置。

依据阻尼加权最小二乘范数 K_{WLN}^+ 计算多自由度机器人关节振动最优表达 $\dot{\vartheta}$ 公式如下:

$$\dot{\vartheta} = K_{WLN}^+(\Theta) \cdot \dot{p}_r \quad (12)$$

式中: \dot{p}_r 表示位姿。计算正向运动矩阵 E , 其公式表达如下:

$$E = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e_{10} \end{bmatrix}, \quad e_o = \begin{cases} 1 + \left| \frac{\chi J(\Theta)}{\chi \vartheta_o} \right|, & \Delta \left| \frac{\chi J(\Theta)}{\chi \vartheta_o} \right| \geq 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $J(\Theta)$ 表示角位置; χ 表示关节角度。用 4×4 的坐标矩阵⁰ $Y_o(\beta_0, \chi_0, \eta_0)$ 表达机器人的惯性运动, 振动控制量观测值 $(c_{o1}, c_{o2}, \dots, c_{o,q-1}, u_o)$ 由机器人振动控制参量 h_r 得到, 计算多自由度机器人振动因素的集合表达如下:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & c & \dots & c \\ 1 & c & \dots & c \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & c_{m1} & \dots & c_{m,q-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \chi_0 \\ \chi_1 \\ \vdots \\ \chi_{q-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_m \end{pmatrix} \quad (14)$$

最后得到多自由度机器人抓取中的振动控制约束参量, 其公式表达如下:

$$\begin{cases} c_1 = c_s + s \sin w \\ c_2 = c_s + z \sin w_1 + s \sin w_2 \\ c_3 = c_s + z \sin w_1 + z \sin w_2 + s \sin w_2 \\ c_4 = c_s + z \sin w_1 + s \sin w_1 + s \sin w_2 + z \sin w_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: w 表示待分体的转动惯量; $\sin w_1$ 、 $\sin w_2$ 表示投影矩阵线性同构变换前的位置。

3 抓取末端自动控制优化模型

根据分析结果选取重要振动参量作为优化目标, 构建自适应阻抗自动控制器。基于自适应跟踪方法, 补偿位置阻抗环境刚度与位置估算的参数误差, 计算实际跟踪目标。

计算多自由度机器人自适应控制补偿的跟踪误差函数 $c_i(y)$, 其公式表达如下:

$$c_i(y) = h(y) + l_a(y)r(y) + l_f(y)\dot{r}(y) \quad (16)$$

式中: $h(y)$ 表示位置轨迹信号; $l_a(y)$ 表示自适应比例; r 表示轨迹跟踪值; $l_f(y)$ 表示微分反馈增益。

计算被控对象方程 $g(y)$, 其公式表达如下:

$$\begin{cases} \ddot{r}(y) + s(y)\dot{r}(y) + n(y)r(y) = g(y) \\ s(y) = \frac{[n + ll_f l_f(y)]}{q} \\ n(y) = \frac{[l + l_r + ll_r l_f(y)]}{q} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $s(y)$ 、 $n(y)$ 表示自适应控制参数; q 表示质量; $\dot{r}(y)$ 表示力稳定误差。

设力跟踪误差 $\dot{r}(y)$ 的最优表达式如下:

$$\dot{r}_q(y) + 2\gamma\mu\dot{r}_q(y) + \mu^2 r_q(y) = 0 \quad (18)$$

式中: μ 表示无阻尼自然频率; γ 表示自定义阻尼; $r_q(y)$ 表示频率响应误差。

建立 Lyapunov 正标量函数公式表达如下:

$$B = R^T AR + W_1 (f - f^*)^2 + W_2 (\mu^2 - n + n^*)^2 + W_3 (2\gamma\mu - s + s^*)^2 \quad (19)$$

式中: W_1 、 W_2 、 W_3 均表示正标鲁棒目标函数; f 、 μ 、 n 表示待定时间函数; A 、 R 表示满足 Lyapunov 方程的正定对称矩阵。

保证 Lyapunov 函数为负数, 求导其函数, 其公式表达如下:

$$\begin{cases} \dot{g}^* = -W_1^* w \\ \dot{n}^* = W_2^* w r \\ \dot{s}^* = W_3^* w \dot{r} \end{cases} \quad (20)$$

由 Lyapunov 理论可知, 此时系统可达到稳定程度。进一步求出参考轨迹 $c_i(y)$, 其表达式如下:

$$c_i(y) = L_o^* \int_0^1 r(y)fy + L_a^* \dot{r}(y) \quad (21)$$

式中 L_o^* 表示自适应控制参数。设定自适应控制参数, 其公式表达如下:

$$\begin{cases} h(y) = h(0) + \beta_1 \int_0^1 w(y)fy + \beta_2 w(y) \\ L_a(y) = L_a(0) + \chi_1 \int_0^1 w(y)r(y)fy + \chi_2 w(y)r(y) \\ L_f(y) = L_f(0) + \eta_1 \int_0^1 w(y)\dot{r}(y)fy + \eta_2 w(y)\dot{r}(y) \\ w(y) = \mu_a r(y) + \mu_f \dot{r}(y) \end{cases} \quad (22)$$

式中: β_2 、 χ_2 、 η_2 表示自适应增益比例; μ_a 表示速度加权因

子; μ_f 表示位置加权因子; β_1 、 χ_1 、 η_1 表示积分自适应增益。

最终基于以上自适应抗阻控制策略, 实现多自由度机器人抓取末端振动高精度自动控制。

4 实验

验证研究方法的整体有效性, 测试使用的多自由度机器人是 Franka Emika 6 轴协作机械臂。该机器人的参数如表 1 所示。

表 1 实验机器人参数

项目	参数
自由度(关节轴数)	6
编程操作系统	支持 C++、ROS
应用程序	Research app
负载/kg	3
自身质量/kg	≈ 18
关节力矩/(N/m)	0.85
抓取末端速度/(m/s)	2
关节范围/(°)	A1: -166~ 166 A2: -101~ 101 A3: -166~ 166 A4: -176~ -4 A5: -166~ 166 A6: -1~ 215
控制器	AC 电压: 100~240 V 功耗: 80 W
夹爪	力/N: 70(持续)/140(峰值) 自身质量/kg: ≈ 0.7 行程/mm: 80 速度/(mm/s): 50

4.1 振动抑制

搭建多自由度机器人末端加速度振动幅值实验系统, 描述机器人末端抓取振动状态。

该实验系统硬件使用了振动测量仪(优利德 UT315A)、加速度传感器(MMA8452Q)、中心处理器。中心处理器集成了实时处理器、可重新配置的现场可编程门阵列和 I/O, 具有 266 MHz CPU, 90 条数字 I/O 线, 16 位分辨率通道, 可满足多传感器正交采集、力信号滤波采集、数字 I/O 通信等功能。软件使用了 DSpace 作为仿真平台, 实现记录测量点坐标、建立空间坐标系。拟合几何要素、导出数据处理测量结果。将振动测量仪安装于机器人末端法兰盘中心位置处, 将加速度传感器放置于机器人基座合适位置, 保证加速度传感器在机器人运动期间不会被障碍物干扰。中心处理器通过 TCP/IP 网络协议的以太网与局域网计算机、振动测量仪、加速度传感器相连, 并传送、显示和保存相关运行数据。选取机器人的 6 组关节角对应的 6 个点作为采集样本点, 在 DSpace 软件中建立以机器人底座

坐标系为基坐标系的测量坐标系,如图 1 所示。

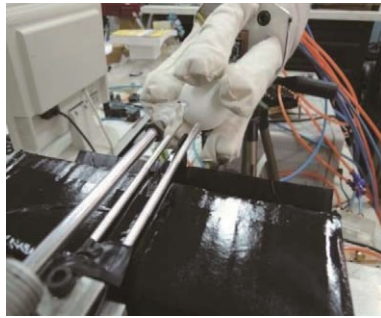


图 1 实验平台设计

采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法通过 MATLAB,分析振动信号及振动抑制效果,结果如表 2 所示。

表 2 末端振动抑制结果

参数名称	所提方法	文献[3]方法	文献[4]方法
振动抑制/%	24.12	18.90	17.59
方根幅值	0.502	0.512	0.522
绝对均值	0.41	0.48	0.51
歪度	0.002 5	0.036 0	0.026 0

由表 2 可知,在实行多自由度机器人抓取末端振动控制系统的测试时,所提方法的振动抑制值更高,抑制效果较文献[3]方法和文献[4]方法效果更好,表明文献[3]方法和文献[4]方法的振动抑制及稳定性较差。

4.2 多自由度机器人姿态跟踪误差测试

测试多自由度机器人振动控制补偿后,本文对其姿态目标跟踪的效果如图 2 所示。

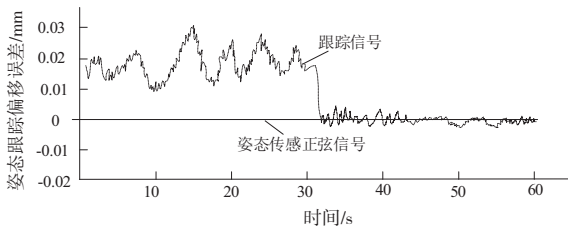


图 2 姿态跟踪误差

从图 2 可以看出,当未进行振动控制补偿时,跟踪姿态传感正弦信号会产生大于 0.01 的姿态误差,且有大约 1s 的相位滞后。当 30s 使用本文方法振动控制补偿位置阻抗环境刚度后,姿态偏移误差小于 0.005,相位滞后也被消除,姿态波动非常小,说明信号干扰被补偿,能够精确跟踪目标姿态。

4.3 完成指令时间对比

采用所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法对其进行上下左右平移、旋转、抓取、放开等操作,PLC 分配地址分为上升、下降、夹紧、松开、移动按钮和移动、夹紧、松开按钮,其输出部分原理图如图 3 所示。

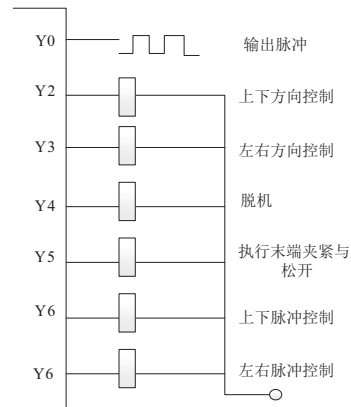


图 3 输出部分原理图

基于此完成动作编程,然后通过组态软件完成 3 种方法的测试,通过 MCGS 软件系统完成所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法的远程操作及监控,其完成指令动作时间如图 4 所示。

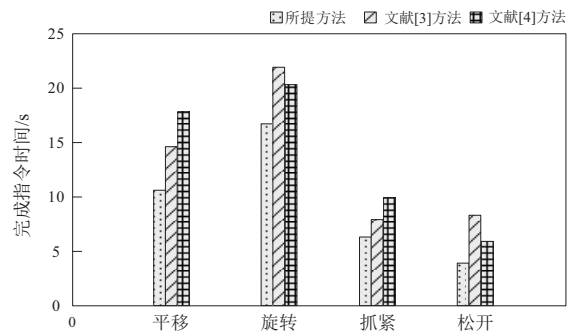


图 4 完成指令动作时间

分析图 4 可知,采用所提方法完成多自由度机器人抓取末端自动控制时,完成左右平移、旋转、抓紧、松开 4 项操作的时间均小于文献[3]方法和文献[4]方法的时间,表明所提方法的完成指令时间短,效率高。

4.4 抓取精准度对比

通过 MCGS 软件系统完成所提方法、文献[3]方法和文献[4]方法的远程操作及监控,抓取精准度如图 5 所示。

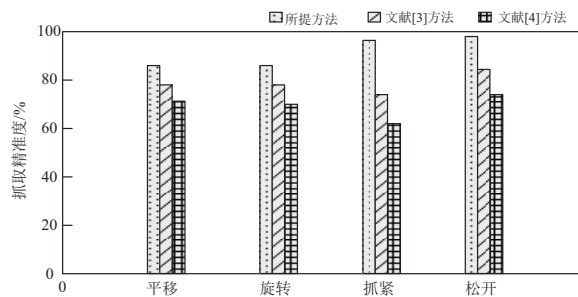


图 5 抓取精准度

分析图 5 可知,所提方法的 4 项操作精准度均高于文献[3]方法和文献[4]方法的精准度,验证了所提方法抓取精准度更好。

综上所述,通过参数变量分析,提高了自动控制器模型的精准度及稳定度,最终构建了高效、高精度的多自由度机器人抓取末端振动自动控制器,改进了传统方法中存在的不足,具有较好的应用性能。

5 结语

本文提出了多自由度机器人抓取末端振动自动控制研究方法,建立机器人动力学模型,构建机械臂运动规划模型,分析运动过程参量,选取重要参量作为优化目标,构建自动控制器,最终完成多自由度机器人的自动控制。解决了机器人双臂不稳、指令控制度低、控制延迟长的问题。

参考文献:

[1] 孔凡国,谭水生. 两臂二指智能魔方机器人执行控制系统设计[J]. 机床与液压,2020,48(23):40-44.

[2] 庞海. 基于 DTN 算法的采摘机器人控制系统可行性研究[J]. 农机化研究,2022,44(5):119-123.

[3] 郑文昊,贾英民. 具有状态约束与输入饱和的全向移动机器

人自适应跟踪控制[J]. 工程科学学报,2019,41(9):1176-1186.

[4] 蒋沅,公成龙,吕科,等. 基于自适应模糊补偿的不确定性机器人 CNF 控制[J]. 振动与冲击,2020,39(8):106-111.

[5] 冯浩,殷晨波,曹东辉,等. 挖掘机器人伺服系统神经网络滑模控制[J]. 液压与气动,2021,45(10):104-110.

[6] 张建华,许晓林,刘璇,等. 双臂协调机器人相对动力学建模[J]. 机械工程学报,2019,55(3):34-42.

[7] 李京文,韩行. 基于系统动力学的工业机器人产业发展路径研究[J]. 东北大学学报(社会科学版),2019,21(2):132-138.

[8] 韩江,汪鹏,董方方,等. 基于 Udwardia-Kalaba 方法的平面冗余并联机器人建模与轨迹跟踪控制[J]. 应用数学和力学,2020,41(11):1183-1196.

[9] 胡章芳,程亮,张杰,等. 多约束条件下基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2021,33(6):999-1006.

收稿日期:2022-07-01

(上接第 151 页)

算时间 Scripting(黄色部分)、布局时间 Rendering(紫色部分)、绘制时间 Painting(绿色部分)、系统消耗 System(灰色部分)占比情况,其中 Rendering(紫色部分)和 Painting(绿色部分)是与算法相关的,这两部分占比越小代表算法的性能越好(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。由于传统力导向布局算法要计算每一个节点的作用力,因此在算法开始时,上述 Rendering 和 Painting 部分占比情况对比,图 5 中的 Rendering(紫色部分)和 Painting(绿色部分)明显大于图 6。

针对 3.1 节 2) 中给出的实验设置,实验参数和结果如表 3 所示。

表 3 不同参数下算法的执行时间

实验编号	参数	执行时间/s	R
1	$k=5, n=50$	2.01	15
2	$k=5, n=100$	2.80	17
3	$k=10, n=50$	2.50	20
4	$k=7, n=100$	1.90	22
5	$k=20, n=100$	2.12	40

通过实验表明,不同的参数对本文提出的算法有较大影响,经过多次实验证明,将作用力参数 k 设置为式(6),算法有较好的性能和布局表现。

$$k = \sqrt{S/|V|} \tag{6}$$

式中: S 表示矩形画布的面积; $|V|$ 表示拓扑图中节点的个数。

4 结语

本文提出了一种高效的大量节点的网络拓扑图布局算法。在传统力导向模型布局的基础上,对图中的节点进

行分类预处理,创新地提出了节点之间的距离度量办法,利用 K -邻近分类算法将节点归类,在每一个类中并行地使用 FR 模型布局算法,从而提高算法程序的性能。

然而本文所提出的方法还存在不足地方:若分类中节点数目不均导致最后布局节点分布不均匀,可视化效果不好。未来将进一步将工作重心放到处理数量巨大并且分布不均匀的问题上。

参考文献:

[1] 刘召朝,张丹,周琛,等. 基于改进粒子群算法的多分支电缆自动布线技术[J]. 机械制造与自动化,2021,50(1):177-179.

[2] 程远,严伟,李晓明. 基于斥力-张力模型的网络拓扑图布局算法[J]. 计算机工程,2004,30(3):104-105,188.

[3] 水超,陈涛,李慧,等. 基于力导向模型的网络图自动布局算法综述[J]. 计算机工程与科学,2015,37(3):457-465.

[4] 陈昌娜,王雅娟,晏平. 网络拓布局技术研究[J]. 信息通信,2018,31(10):73-76.

[5] TUTTE W T. How to draw a graph[J]. Proceedings of the London Mathematical Society,1963,(1):743-767.

[6] COHEN R F, BATTISTA G D I, TAMASSIA R, et al. A heuristic for graph drawing[J]. Congressus numerantium, 1984, 24(3):149-160.

[7] FRUCHTERMAN T M J, REINGOLD E M. Graph drawing by force-directed placement[J]. Software:Practice and Experience, 1991,21(11):1129-1164.

[8] 刘红岩,陈剑,陈国青. 数据挖掘中的数据分类算法综述[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(6):727-730.

[9] 平雪良,徐荣礼,孔俊,等. 基于空间划分的海量数据 K 邻近新算法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(5):65-69.

收稿日期:2022-02-10