

基于预测补偿模型的绳索并联机构预松弛控制^①范 银^② 金惠良^③ 叶 骞

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘 要 本文分析了含绳长误差的绳索并联机构运动控制过程,设计了一种基于长短期记忆(LSTM)神经网络预测误差补偿模型的预松弛控制方法,提高了绳索并联机构末端位姿在运动过程中的准确性与连续性。本文基于矢量闭环原理建立了系统运动学模型,得到了绳索末端位姿的非线性误差模型,采用 LSTM 神经网络进行非线性误差的预测补偿。基于离散控制周期分配主、从控制绳,实现系统的预松弛控制,减小绳索末端的无序晃动。仿真结果表明,误差补偿之后,末端位姿精度有了明显的提高,而预松弛控制的位姿与索力相较于传统控制也更加连续,验证了该方法的可行性。

关键词 绳索并联机构;误差预测补偿;长短期记忆(LSTM)神经网络;预松弛控制

0 引 言

绳索并联机构是一种特殊的并联机器人,采用绳索代替传统并联机器人的刚性连杆,通过改变绳索的长度来控制绳索末端的运动状态。相较于传统并联机构,绳索并联机构结构简单、工作尺度大、高负载能力、易于拆装与重组、易于模块化^[1]。绳索并联机构目前已经取得了广泛的应用,如 FAST 大型射电望远镜^[2]、索并联摄像机器人^[3]、起重机器人^[4]等,但是运动过程中绳索张力必须为正^[5],这种单向受力的特性使得绳索末端的运动精度控制变得十分复杂。

针对绳索并联机构的高精度运动控制问题,由于绳索并联机构的自由度冗余特性,目前最常用的方式是基于运动学逆解的绳长控制方法。文献[6]分析了系统的李雅普诺夫稳定性,并基于此提出了 PD 反馈控制方法。文献[7]分析了绳索运动过程中的张力分配问题,提出一种非线性前馈控制。文献[8]针对绳索形变等因素造成末端运动误差问题,通过高精度视觉定位进行控制闭环。文献[9]

提出了神经网络 PID 控制方法,减小了绳索末端运动误差。但是多数文献把重点都放在了绳索末端位置误差上面,而忽略了姿态误差、运动连续性问题,而绳索末端位姿不连续,将造成索力分配不均、绳索震荡、末端晃动等一系列问题。

本文研究 6 绳索并联机构的高精度位姿控制问题。首先从理论角度推导了末端误差来源,建立基于神经网络预测模型的绳长误差校正机制来减小误差,但是不能完全消除误差。误差的存在将会导致 6 根绳索在运动过程中随机出现松弛状态,对末端造成冲击使得其运动不连续。本文提出一种预松弛控制方法进行含误差的位姿连续性运动控制。仿真结果表明,神经网络预测模型能够补偿 90% 左右的位置误差,预松弛控制能够很好地保持其位姿在运动过程中的连续性。

1 运动学建模

6 绳索并联机构的结构示意图如图 1 所示,由外部 6 边形排列机架(外框)与内部 6 棱柱型末端

① 973 计划(2015CB857011)资助项目。

② 男,1994 年生,硕士生;研究方向:绳索并联机器人;E-mail: fanyinfine@sjtu.edu.cn

③ 通信作者,E-mail: hljin@sjtu.edu.cn
(收稿日期:2019-06-06)

组成, $A_1 \sim A_6$ 为摆动式定滑轮位置, 即绳索与外部机架连接点, 沿圆周均匀分布; $B_1 \sim B_6$ 为绳索与末端连接点, 周向均匀分布, 竖直方向上交错布置。

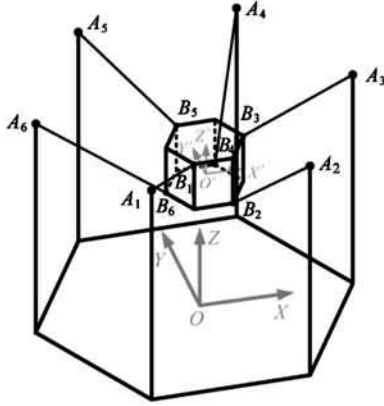


图1 6绳索并联机构结构示意图

针对该6绳索并联机构, 建立以底部6边形中心为原点的全局坐标系 $C: O-XYZ$, 在绳索末端上建立以末端质心为原点的局部坐标系 $C': O'-X'Y'Z'$, 其中 $A_1 \sim A_6$ 在全局坐标系中的位置, $B_1 \sim B_6$ 在局部坐标系中的位置均为已知。根据机器人运动学可以得到局部坐标系到全局坐标系的旋转矩阵为

$${}^C_R = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & s\alpha s\gamma + c\alpha s\beta c\gamma \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\alpha c\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, α, β, γ 为绳索末端绕全局坐标系3轴的旋转角。

1.1 运动学逆解

求解机构的运动学逆解, 即已知绳索末端位姿, 求解6根绳索长度 $l_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 。通过式(1)给出的旋转矩阵, 可以得到 ${}^C_O'B_i$ 在全局坐标系下对应的向量:

$${}^C_O'B_i = {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

式中, ${}^{C'}_O'B_i$ 为 B_i 在局部坐标系 C' 中的向量表示, ${}^C_O'B_i$ 为 B_i 在全局坐标系中的向量表示。

在运动过程中, 给定局部坐标系原点坐标 ${}^C_O'(x, y, z)$, 根据图2示意的矢量闭环法, 可以得到绳索 A_iB_i 在全局坐标系 $C: O-XYZ$ 下的向量表达式 $l_i = {}^C_Ai - {}^C_O'$, 将式(2)代入可得:

$$l_i = {}^C_Ai - {}^C_O' - {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_i, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

通过式(3)即可得到绳索长度 $l_i = |l_i| (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。

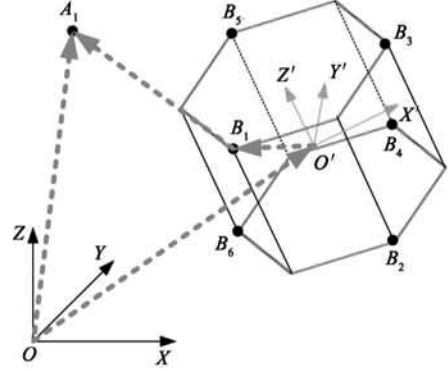


图2 绳索1闭合矢量法图解

1.2 运动学正解

求解机构的运动学正解, 即已知6根绳索长度 $l_i (i=1, 2, \dots, 6)$, 求解绳索末端的位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 。由运动学逆解可以得到方程组:

$$\begin{cases} |{}^C_A1 - {}^C_O' - {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_1| = l_1 \\ |{}^C_A2 - {}^C_O' - {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_2| = l_2 \\ \vdots \\ |{}^C_A6 - {}^C_O' - {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_6| = l_6 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)为非线性方程组, 一般采用数值迭代的方法去求解, 本文采用牛顿迭代法。首先对上述问题进行方程标准化处理, 由于涉及到向量的模长, 这里采用取模平方进行函数构造:

$$f_i(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = |{}^C_Ai - {}^C_O' - {}^C_R \cdot {}^{C'}_O'B_i|^2 - l_i^2 \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

得到6个构造函数。将函数在给定近似初值解 $X_0 = (x_0, y_0, z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ 处进行一阶泰勒展开:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x}(x - x_0) + \dots + \frac{\partial f_i}{\partial \gamma}(\gamma - \gamma_0) + f_{i0} = 0 \quad (6)$$

式中, f_{i0} 为构造函数初值, $f_{i0} = f_i(x_0, y_0, \dots, \gamma_0)$ 。将其写成矩阵形式, 并作变量替换, 可得:

$$F_0 = \begin{bmatrix} f_{10} \\ f_{20} \\ \vdots \\ f_{60} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x} & \frac{\partial f_6}{\partial y} & \dots & \frac{\partial f_6}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \vdots \\ \Delta \gamma_0 \end{bmatrix}$$

$$= \mathbf{J}_0 \cdot \Delta \mathbf{X}_0 \quad (7)$$

式中, $\mathbf{J}_0$ 为系统在该次迭代中的雅克比矩阵; $\Delta \mathbf{x}_0$ 为自变量 x_0 负增量, $\Delta \mathbf{x}_0 = x_0 - x$, 其余变量类似。

当数值解充分逼近真实解时候, $\Delta \mathbf{X}$ 与 F 均逼近 0, 给定允许误差 ε_1 (或 ε_2) 作为迭代过程的终止条件, 具体迭代求解过程如下。

步骤 1 已知第 n 次迭代时, 近似解为 $\mathbf{X}_{[n]}$, 将函数在此处一阶泰勒展开, 得到构造函数初值 $F_{[n]}$ 与对应的雅克比矩阵 $\mathbf{J}_{[n]}$;

步骤 2 求解线性方程组 $F_{[n]} = \mathbf{J}_{[n]} \cdot \Delta \mathbf{X}_{[n]}$, 得到其方程解 $\mathbf{X}_{[n+1]}$:

$$\mathbf{X}_{[n+1]} = \mathbf{X}_{[n]} - \Delta \mathbf{X}_{[n]} = \mathbf{X}_{[n]} - \mathbf{J}_{[n]}^+ \cdot F_{[n]} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{J}_{[n]}^+$ 为第 n 次迭代雅克比矩阵的广义逆, $\mathbf{J}_{[n]}^+ = (\mathbf{J}_{[n]}^T \mathbf{J}_{[n]})^{-1} \mathbf{J}_{[n]}^T$;

步骤 3 通过 $\mathbf{X}_{[n+1]}$, 将方程组再次一阶泰勒展开, 得到 $F_{[n+1]} \setminus \mathbf{J}_{[n+1]}$;

步骤 4 进行迭代终止条件判断 $\Delta \mathbf{X}_{[n+1]} < \varepsilon_1$ (或 $\Delta F_{[n+1]} < \varepsilon_2$), 若满足条件, 则终止迭代, 得到近似解 $\mathbf{X} = \mathbf{X}_{[n+1]}$; 否则, 返回步骤 1。

2 运动学误差建模

绳索并联机构的运动误差, 主要包含理论系统误差与机构系统误差两部分。理论系统误差, 主要是指在进行绳索长度计算时, 忽略悬链线效应, 直接看作直线处理的理论计算误差; 机构系统误差, 主要包含机构加工、安装产生的静态误差, 绕线过程中左右摆动、绳索重叠带来的动态误差。

对于理论系统误差, 可以通过式(9)直接修正。对于本文构建的小尺度绳索并联系统而言, 其误差小于 0.01%, 可以忽略。

$$\delta l_i^{(1)} = \sqrt{h_i^2 + \left(\frac{\sinh\left(\frac{\rho g L_i}{2T_{Hi}}\right)}{\frac{\rho g L_i}{2T_{Hi}}} \right)^2} L_i^2 - \sqrt{L_i^2 + h_i^2} \quad (9)$$

式中, T_{Hi} 为绳索 i 末端受到的水平拉力大小(N); ρ 为绳索的线密度(kg/m); h_i 、 L_i 为绳索 i 的竖直跨

度与水平跨度。

对于机构系统误差, 对式(3)取微元, 可以得到:

$$\begin{aligned} \delta(l_i) &= (\delta l_i) \mathbf{u}_i + l_i (\delta \mathbf{u}_i) \\ &= \delta^C \mathbf{A}_i - \delta^C \mathbf{O}' - (\delta^C R) \cdot {}^C \mathbf{B}_i - {}^C R \cdot (\delta^C \mathbf{B}_i) \end{aligned} \quad (10)$$

式中, $\mathbf{u}_i$ 为绳索 i 的方向向量, $\mathbf{u}_i = \mathbf{l}_i / \|\mathbf{l}_i\|$ 。

等式(10)两边同时左乘 $\mathbf{u}_i^T$ 可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i^T \delta(l_i) &= \mathbf{u}_i^T [\delta^C \mathbf{A}_i - {}^C R \cdot (\delta^C \mathbf{B}_i) \\ &\quad - \mathbf{u}_i^T [\delta^C \mathbf{O}' + (\delta^C R) \cdot ({}^C \mathbf{B}_i)] \end{aligned} \quad (11)$$

化简式(11)可以得到绳索机构系统误差:

$$\begin{aligned} \delta l_i^{(2)} &= [\mathbf{u}_i^T - \mathbf{u}_i^T {}^C R] \begin{bmatrix} \delta^C \mathbf{A}_i \\ \delta^C \mathbf{B}_i \end{bmatrix} \\ &\quad + [-\mathbf{u}_i^T - [({}^C R \cdot {}^C \mathbf{B}_i) \times \mathbf{u}_i]^T] \begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\delta \mathbf{x}$ 为绳索机构的空间位置误差, $\delta \mathbf{x} = [\delta x, \delta y, \delta z]^T$; $\delta \boldsymbol{\theta}$ 为绳索机构的空间姿态误差, $\delta \boldsymbol{\theta} = [\delta \alpha, \delta \beta, \delta \gamma]^T$;

$\begin{bmatrix} \delta^C \mathbf{A}_i \\ \delta^C \mathbf{B}_i \end{bmatrix}$ 为机构系统加工与安装产生的静态

误差; $\begin{bmatrix} \delta \mathbf{x} \\ \delta \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix}$ 为机构因为绕线左右摆动与重叠产生的动态误差。

3 误差预测补偿

本文研究的 6 绳索并联机构为小尺度绳索并联机构, 其分布圆直径为 1 100 mm, 高度 1 100 mm, 末端质量 0.5 kg, 钢丝绳直径 0.6 mm。由于忽略悬链线效应与弹性形变的理论系统误差小于 0.01%, 可以忽略, 因此绳长误差主要来自机构系统误差, 即 $\delta l_i = \delta l_i^{(2)}$, 主要包含绳索连接点的静态误差与绳索运动过程中的动态误差, 这两部分的误差共同决定了绳索的长度误差。

由式(12)可以看出, 在绳索连接点静态误差几乎不会变的情况下, 绳索长度的误差 δl_i 直接决定了绳索末端的位姿误差, 因此绳索长度误差的补偿显得尤为重要。由于绳索在绕线控制过程中左右摆动与重叠的随机性, 此误差为非线性误差, 无法通过计

算得到,只能通过非线性预测算法进行误差的预测与补偿。

3.1 绳索长度预测算法

针对非线性系统的预测问题,学术界提出了诸如模糊预测、回归预测等方法,其中最普适性的是神经网络预测方法^[10]。本文采用长短期记忆(long-short term memory, LSTM)神经网络进行绳索长度的预测。LSTM 神经网络是一种时间序列预测网络,即已知前 $(k-1)$ 时刻的所有输入输出值,预测第 k 时刻的输出值。相较于传统的循环神经网络而言,在处理时间序列过长时候存在很大的优势。

LSTM 神经网络引入了记忆单元与隐藏层状态的机制来进行隐藏层之间的信息传递,在结构中加了状态 C 来保存长期信息。如图3所示, LSTM 记忆单元内有3个门:输入门(Input Gate)、遗忘门(Forget Gate)、输出门(Output Gate)。其中,输入门能够控制新信号的加入;遗忘门能够忘记无用的信息并保留有用的信息;输出门能够控制记忆单元的输出。这3种门结构在记忆单元中通过矩阵乘法等运算,使无用的信息在迭代过程中衰减。

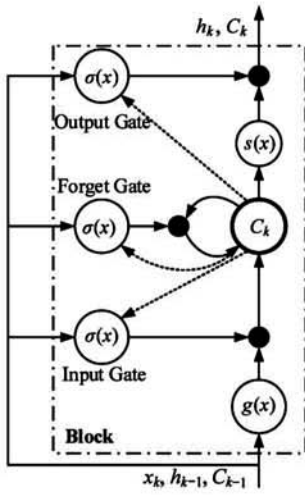


图3 LSTM神经网络记忆单元结构

在第 k 个时间点, LSTM 神经网络的记忆单元有3个输入:当前时刻的输入 x_k ,上一时刻的输出 h_{k-1} ,上一时刻的记忆单元状态 C_{k-1} 。2个输出:当前时刻的输出 h_k ,当前时刻的单元状态 C_k 。各个门与网络输出如下:

$$\begin{cases} f_k = \sigma(W_f x_k + U_f h_{k-1} + b_f) \\ i_k = \sigma(W_i x_k + U_i h_{k-1} + b_i) \\ o_k = \sigma(W_o x_k + U_o h_{k-1} + b_o) \\ \tilde{C}_k = g(W_C x_k + U_C h_{k-1} + b_c) \\ C_k = f_k \cdot C_{k-1} + i_k \cdot \tilde{C}_k \\ h_k = o_k \cdot s(C_k) \end{cases} \quad (13)$$

式中, f_k 、 i_k 、 o_k 为遗忘门、输入门、输出门的输出; σ 为3种门的激活函数,一般采用Sigmoid函数; U_f 、 U_i 、 U_o 、 U_C 为3种门与记忆单元对应前一时刻输出的权值矩阵; W_f 、 W_i 、 W_o 、 W_C 为3种门与记忆单元对应当前时刻输入的权值矩阵; b_f 、 b_i 、 b_o 、 b_c 为3种门与记忆单元对应的偏置矩阵; $\tilde{C}_k$ 为当前时刻记忆单元的输入向量; h_k 为记忆单元的最终输出。

对于6绳索并联机构,同一时刻存在6绳的控制输出量与实际长度共12变量,为12变量序列预测问题,因此在LSTM基础上构建多变量预测模型。网络的激活函数采用RELU函数,遗忘门、输入门、输出门的激活函数采用Sigmoid函数,权值更新采用自适应矩估计优化算法Adam,损失评价函数采用均方误差(MSE)函数。

实际运动中,在 kT 时刻,通过传感器得到末端执行器的位姿 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$,通过运动学逆解式(3)即可得到在该时刻的6根绳索长度的实际值 $l(k)$,加上该时刻6根绳索长度的理论值 $x(k)$,得到12变量序列。给定训练步长 N ,在 kT 时刻,将 $x(k-N+1) \sim x(k)$, $l(k-N) \sim l(k-1)$ 作为训练输入,将 $l(k)$ 作为训练输出,依次划分输入集与输出集,进行网络训练。

3.2 绳索长度误差补偿

网络训练完成之后,给定输入序列可以得到网络预测绳长 $l_m(k)$,在实际情况下,由于噪声等时变因素的影响,预测值存在预测偏差,利用前次预测偏差进行偏差修正,得到最终预测绳长 $l_p(k)$ 为

$$l_p(k) = l_m(k) + \zeta(l(k-1) - l_m(k-1)) \quad (14)$$

式中, ζ 为偏差修正系数。

通过预测的绳长 $l_p(k)$ 和理论计算的绳长 $x(k)$,可以得到绳长的误差值 $\delta l_i = l_{pi}(k) - x_i(k)$,

代入式(12)即可求得末端位姿误差 $X_e = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta \theta \end{bmatrix}$ 。给定位姿允许误差 ε , 并通过图 4 的迭代算法, 使得目标位姿 X_d 与实际位姿 X_r 尽可能接近, 实现误差的补偿。

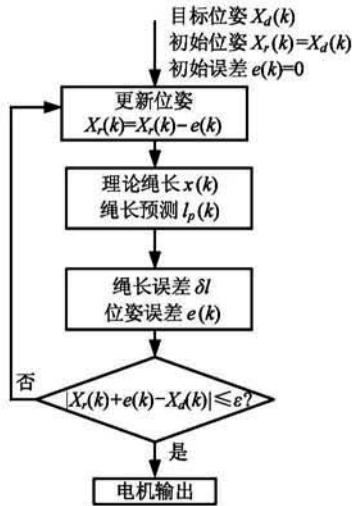


图 4 误差补偿迭代流程图

3.3 绳索长度预测仿真

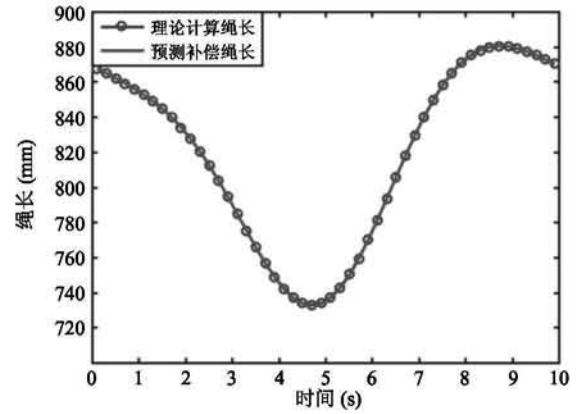
为了验证上述给出的 LSTM 神经网络预测模型的有效性, 在给定连续轨迹情况下, 使用 Python 对绳索并联机构的绳长预测算法进行了仿真。为了体现出机器人结构误差对末端运动误差的影响, 对绳索连接点 A_i 、 B_i 的误差进行了预设, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} [\delta^c A_i] = \begin{bmatrix} 4 & -3 & 2 & 4 & -2 & 1 \\ 1 & 2.5 & -1.5 & -2 & 3 & -1 \\ -1 & 1.5 & 1 & -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ [\delta^c B_i] = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & -1 & 0.5 & 0.5 \\ 1.5 & 2 & 1 & -1 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0.5 & 0 & -0.5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

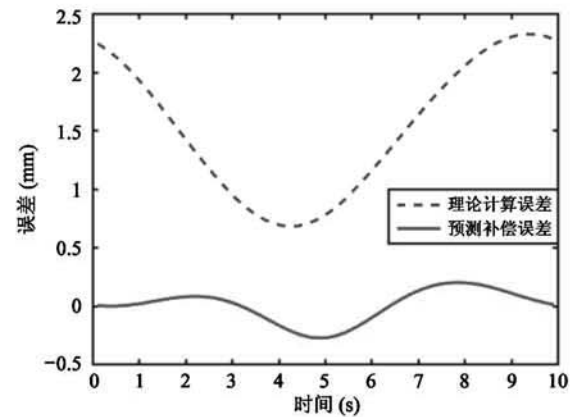
给定空间椭圆目标轨迹式(16), 末端匀速运动, 运动时间 10 s, 采样周期 10 ms, 共计算得出 1 000 个离散序列点。LSTM 神经网络由 3 层组成, 中间层单元数取 50, 训练步长取 10, 得到训练集的输入输出。

$$\begin{cases} x = 200\cos(0.2\pi t) \\ y = 300\cos(0.25\pi)\sin(0.2\pi t) \\ z = 300\sin(0.25\pi)\sin(0.2\pi t) + 500 \end{cases} \quad (16)$$

将上述轨迹重新采样, 得到测试集, 进行网络测试, 结果表明预测补偿算法能够有效减小绳长误差。图 5 给出了绳索 1 的长度预测结果, 可以看出预测补偿绳长曲线逼近真实绳长曲线, 其最大误差由 2.32 mm 减小到 0.24 mm, 误差减小了 89.65%。



(a) 长度变化曲线



(b) 误差变化曲线

图 5 绳索 1 预测补偿结果

4 预松弛控制

绳索并联机构存在冗余控制自由度, 由于控制量输出的离散特点, 可以将每个控制周期结束时刻的末端状态近似为准静态过程, 也就是说末端在离散点处于受力平衡状态。由于绳索长度存在不可忽略的误差, 6 根绳索中必然存在由于正向误差而松弛的绳索, 其数量不大于 3, 编号不定。

由于绳长误差的不确定性, 带来绳索张紧松弛状态的不确定性, 将会造成绳索张力突变, 使得绳索末端受到随机冲击, 产生晃动, 影响末位姿的稳定性。

和位姿变化的连续性。考虑到整个控制过程为离散化控制,重点关注离散点的位姿稳定性,对于控制周期内的短暂过程通常不甚关注。这里提出一种预松弛控制方法,在控制周期内指定3绳为控制主输出绳,其余3绳给定预松弛量,保持松弛状态,仅在控制周期结束时,补偿松弛量,使末端达到预定位姿。此方案通过牺牲控制周期内的位姿准确性换取运动的连续性,之后通过松弛量补偿得到相同的离散点精度。

4.1 预松弛控制方法

预松弛控制方法的目的是为了避免绳索张紧、松弛状态切换的随机性,尽量减少末端在运动过程中的晃动,减少绳索切换状态时对末端产生的冲击。该控制方法在某个控制周期内,将6绳分为3主输出绳、3从输出绳。3主输出绳作为控制周期内驱动绳,3从输出绳作为控制周期末调整绳。为了决定作为控制主输出的3绳,将末端运动区域划分为如下7个区域(图6):区域0由绳索1/3/5主输出,区域1由绳索1/4/5主输出,以此类推。

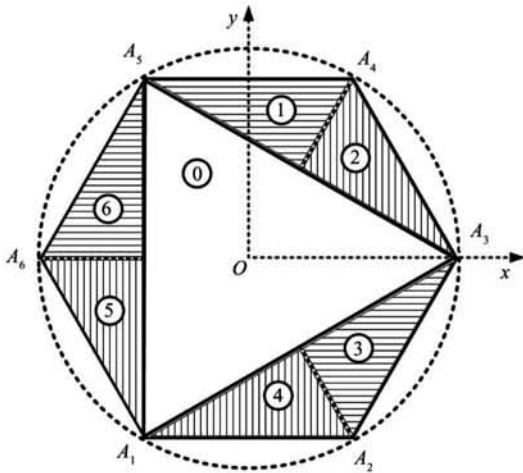


图6 预松弛控制区域划分

在第 k 个周期内,其预松弛控制主要流程如下:

步骤1 给定控制目标 X_k 和 $X_{(k+1)}$,通过预松弛分配方法得到主、从绳分配(主绳 $i_1 i_2 i_3$,从绳 $j_1 j_2 j_3$),通过运动学逆解得到理论绳索长度的变化量 $[dl_{i1}, dl_{i2}, dl_{i3}, dl_{j1}, dl_{j2}, dl_{j3}]$;

步骤2 将绳长变化量代入绳长误差预测模型,得到控制周期内控制量总输出 $[\delta l_{i1}, \delta l_{i2}, \delta l_{i3},$

$\delta l_{j4}, \delta l_{j5}, \delta l_{j6}]$;

步骤3 预松弛阶段, $0 \sim \sigma t$,主绳滞后,从绳预松弛,控制器输出 $[0, 0, 0, \sigma l_{j1}, \sigma l_{j2}, \sigma l_{j3}]$;

步骤4 运动执行阶段, $\sigma t \sim (T - \sigma t)$,主绳控制输出,从绳从动输出,控制器输出为 $[\delta l_{i1}, \delta l_{i2}, \delta l_{i3}, \delta l_{j4}, \delta l_{j5}, \delta l_{j6}]$;

步骤5 控制松弛补偿阶段, $(T - \sigma t) \sim T$,主绳滞后,从绳补偿松弛量,控制器输出为 $[0, 0, 0, -\sigma l_{j1}, -\sigma l_{j2}, -\sigma l_{j3}]$ 。

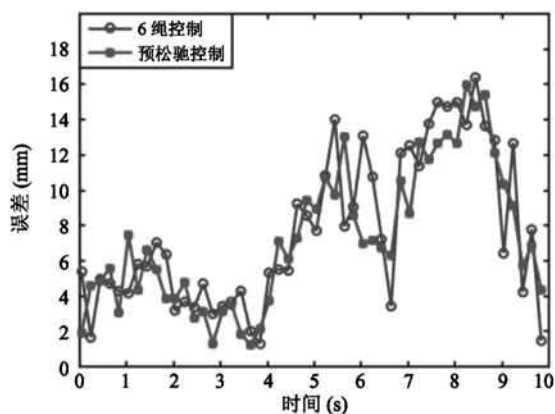
在控制过程中,将运动过程看作准静态过程,由于主绳一直保持张紧状态,索力变化连续,绳索末端姿态变化连续,不存在冲击等问题。值得一提的是,在控制执行阶段,从绳由于本身质量很轻,其重力对末端运动的影响可以直接忽略。

4.2 预松弛控制仿真

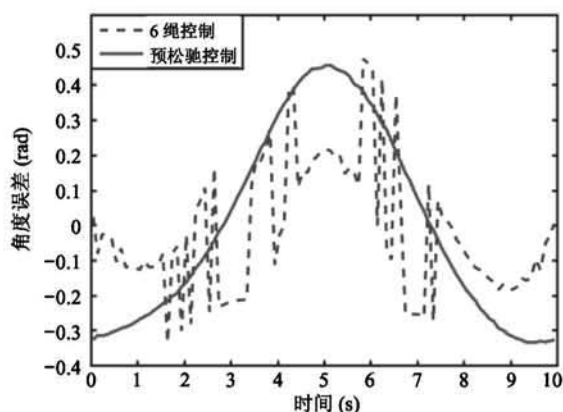
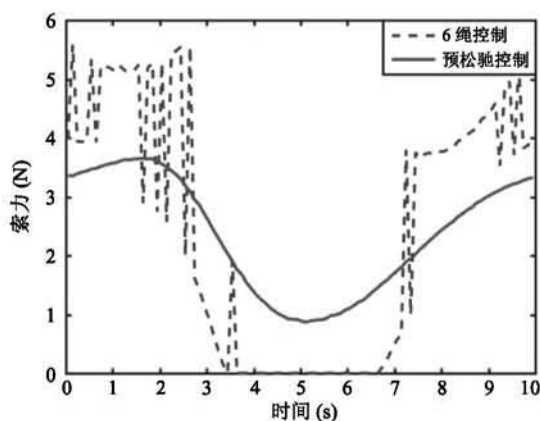
为了验证预松弛控制方法在运动连续性上的作用,使用 Matlab 对该方法进行仿真。仿真轨迹采用式(16)的空间椭圆轨迹,等距划分1000个离散点数据。仿真过程中,直接通过运动学逆解得到绳索长度,在绳长上添加 $[0, 5]$ 范围内的随机噪声,用来模拟实际运动中的绳长误差。图7给出了预松弛控制与含误差6绳控制的结果对比,从图7(a)可以看出在空间位置误差方面,两者没有明显的优劣之分。但是由于6绳控制过程中,存在绳索随机松弛的现象,其空间姿态角、绳索张力波动非常明显,相对而言,预松弛控制能够很好地保证空间姿态角与绳索张力的连续性。

5 控制过程分析与仿真

上文分别建立了6绳索并联机构的 LSTM 神经网络误差预测模型、预松弛控制方法。从仿真结果可以看出,神经网络误差预测补偿模型有效地减小了绳长误差,保证了末端空间位置的准确性;预松弛控制方法在控制周期内保证了绳索末端姿态变化的连续性,绳索拉力的连续性。基于上述2种方法的控制效果,将2种方法结合进行最终轨迹的控制,其主要控制流程如图8所示。



(a) 空间误差变化

(b) 末端姿态角 β 误差变化

(c) 绳索 3 的索力变化

图 7 预松弛控制方法仿真

为了验证绳索并联机构基于神经网络误差预测模型的预松弛控制方法的有效性,在 Matlab 中对该控制方法进行了仿真。仿真轨迹采用半径 200 mm 的圆形轨迹,高度平面 800 mm,误差预设值如式(15)所示,通过运动学正解牛顿迭代法进行末端位姿求解,分别进行了含误差 6 绳控制、误差补偿 6 绳控制与误差补偿预松弛控制 3 种方法的仿真。

图 9(a) 给出了 3 种控制方法的轨迹仿真图,可以看出误差补偿后的预松弛控制轨迹误差相较于传统 6 绳控制误差而言明显减小,仅比 6 误差补偿控制误差略大一些;图 9(b) 给出了 3 种控制方法的末端姿态角 β 的误差变化曲线,可以看出误差补偿预松弛控制方法能够很好地保证末端运动位姿的连续性,具有明显的优势;图 9(c) 给出了末端在 z 方向上的误差变化曲线,在运动过程中传统 6 绳控制最大误差为 7.4863 mm,误差补偿 6 绳控制最大误差为 1.0933 mm,误差补偿预松弛控制最大误差为 2.0565 mm,预松弛控制由于主动松弛了 3 绳,其运动过程中的精度必然会下降一点,但是换来了整个运动过程中的稳定性与连续性,同时在控制周期结束时可以通过松弛量补偿的方式确保离散点的位置精度。

6 结论

本文根据 6 绳索并联机构的运动学逆解建立了机构末端的误差模型,建立了末端位姿误差与绳索长度误差之间的关系。考虑到绳索长度误差的非线性特性,构建基于 LSTM 神经网络的绳长预测模型,给定人为误差之后进行模型的训练与预测,其绳长误差减小了近 90%。

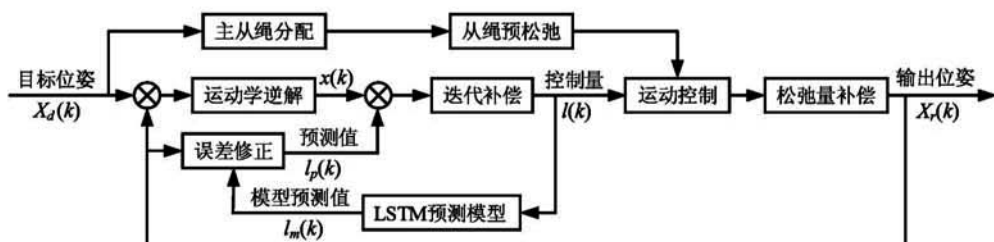
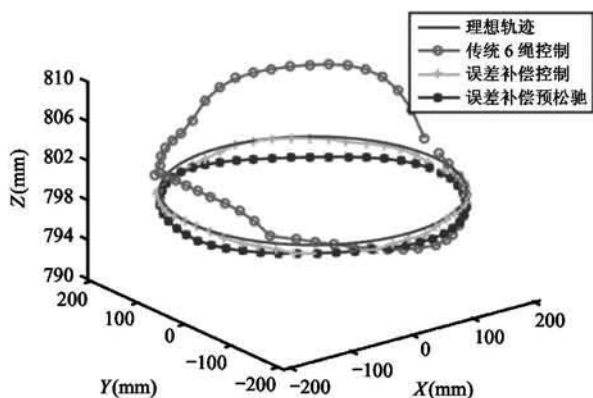


图 8 误差预测补偿预松弛控制流程图



(a) 误差补偿预松弛控制轨迹仿真

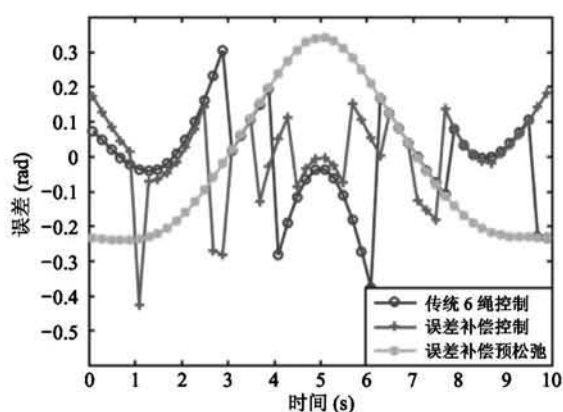
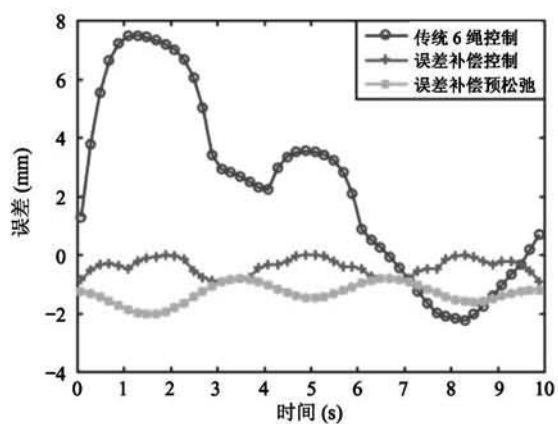
(b) 末端姿态角 β 误差变化(c) 末端位置 z 方向误差变化

图9 3种控制方法仿真结果

针对含绳长误差时,绳索冗余控制量将导致绳索随机松弛,出现末端运动位姿不连续、绳索张力突变,导致末端受到冲击等问题,提出一种预松弛控制方法,保证控制过程末端位姿与绳索张力的连续性。给定随机误差进行仿真,结果表明该方法能很好地

保证末端运动的连续性。

针对实际控制过程,将绳长误差预测补偿模型与预松弛控制方法相结合进行轨迹运动控制。给定人为误差之后进行仿真,仿真结果表明,相较于6绳误差补偿控制,误差补偿预松弛控制能够在适当牺牲精度的情况下得到更加连续光滑的运动轨迹,验证了该控制方法的有效性。

参考文献

- [1] Prestage R M, Constantikes K T, Hunter T R, et al. The Green Bank Telescope [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(8):1382-1390
- [2] 南仁东,姜鹏. 500m 口径球面射电望远镜 (FAST) [J]. *机械工程学报*, 2017(17):15-17
- [3] 胡余健. 一种索并联摄像机器人设计与建模分析 [D]. 成都:电子科技大学机械与电气工程学院, 2014:12-18
- [4] 訾斌,周斌,钱森. 双台汽车起重机柔索并联装备变幅运动下的动力学建模与分析[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(7):55-61
- [5] 欧阳波,尚伟伟. 6 自由度绳索驱动并联机器人力封闭工作空间的快速求解方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(15):34-41
- [6] Kawamura S, Kino H, Won C. High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots[J]. *Robotica*, 2000, 18(1):13-21
- [7] Fang S, Frantza D, Torlo M, et al. Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(3):561-568
- [8] 游虹,尚伟伟,张彬,等. 基于高速视觉的绳索牵引并联机器人轨迹跟踪控制[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(5):19-26
- [9] 何文凯,王江北,陈萌,等. 绳索牵引式并联机器人神经网络 PID 控制[J]. *高技术通讯*, 2018, 28(7):57-62
- [10] 陈增强,袁著祉,张燕. 基于神经网络的非线性预测控制综述[J]. *控制工程*, 2002, 9(4):7-11

Pre-slack control of cable-driven parallel mechanisms based on error prediction and compensation model

Fan Yin, Jin Huiliang, Ye Qian

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract

Based on the analysis of motion control process with cable length error, a pre-slack control method based on error compensation model is proposed to improve the accuracy and continuity of motion. According to the vector closed-loop principle, the kinematic and non-linear error model is established, and a long-short term memory (LSTM) neural network is used to predict and compensate the non-linear error. Then, the master and slave control cables are assigned based on the discrete control period to realize the pre-slack control of the system and reduce the shaking of the end-effector. The simulation results show that the accuracy of the end-effector pose is improved after the error compensation with the pre-slack control, and both the end-effector pose and the cable force are much smoother than the traditional control. This verifies the feasibility of this method.

Key words: cable-driven parallel mechanisms, error prediction and compensation, long-short term memory (LSTM) neural network, pre-slack control