

Tripod 并联机器人运动学分析与样机实验

杨继东 万彪刚 高俊东 刘 昆 胡 敏 赵叶轮

(重庆大学机械工程学院, 重庆 400044)

摘要: 对 Tripod 并联机器人进行了运动学分析, 计算了机构自由度, 采用矢量代数法和数值法求出了运动学位置逆解和位置正解。利用 Jacobian 矩阵的条件数对其进行了运动性能评价, 分析了其可达工作空间。计算结果表明该机构具有优越的各向同性性能和广阔的可达工作空间。通过 ADAMS 和 Matlab 运动学仿真软件对正解和逆解分别进行了验证。仿真实验结果证明了所建模型的正确性。并对 Tripod 并联机器人样机进行了精确定位实验、直线插补实验和圆弧插补实验, 实验证明机构所建数学模型的正确性。

关键词: 并联机器人; 3 自由度; 运动学分析; 工作空间

中图分类号: TP242; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0390-08

Kinematic Analysis and Experiment of Tripod Parallel Robot

Yang Jidong Wan Biaogang Gao Jundong Liu Kun Hu Min Zhao Yelun

(School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Because of parallel mechanism has high rigidity, high speed, high carrying capacity, and not cumulative error, etc., it has been widely used in many fields. Especially less degrees of freedom parallel mechanism has become a hot research topic. The inverse and forward position model of Tripod parallel robot was established, through kinematic analysis of the Tripod parallel robot, the degree of freedom was derived. The inverse kinematics and forward kinematics were solved by using algebraic vector method and numerical method. The condition number of Jacobian matrix was derived and the workspace was analyzed. The calculation result showed that the mechanism owned perfect isotropic properties and spacious workspace. ADAMS and Matlab kinematics simulation software were used to verify the inverse and forward position model of this mechanism. The simulation results proved the correctness of the model. A model machine of Tripod parallel robot was developed and a series of experiments, such as accurate positioning, line/circle interpolation, continuous interpolation, were carried out. The results suggested that the mathematical model established for this parallel mechanism was correct. The research systemically solved the problem of theoretical analysis of Tripod parallel robot, set up the experimental prototype, and provided strong guidance for the engineering application.

Key words: parallel robot; 3-DOF; kinematic analysis; workspace

引言

并联机构因其具有高刚度、高速度、高承载能力以及误差累积等特点, 自 20 世纪 80 年代以来得到了广泛应用^[1]。典型的代表有 Steward 平台^[2]、

DELTA^[3]机构及其变异形式等。其中少自由度并联机构又以其结构简单、控制容易和制造成本低等优点, 成为当前并联机构研究热点^[4-12]。文献[13]提出了一种 3-SPR 并联平台机构, 依据机构的数学模型建立了机构的位置逆解模型, 并通过仿真验证了

模型的正确性,同时对其工作空间做了分析。文献[14]提出了一种 3-RRR 并联机器人结构,阐述了基于机构奇异和运动传递性能指标的高速并联机器人运动学优化设计策略,分析了可达工作空间,最后通过实例证明机构运动传递性能比较好。文献[15]提出了一种 3-UPS-S 型并联机构,进行了并联机构多目标尺度综合,建立一种并联机构多目标优化的方法。

本文系统解决 Tripod 并联机器人的理论分析问题,搭建实验样机,以期对工程化应用提供有力的指导。

1 Tripod 并联机器人运动学分析

1.1 Tripod 并联机器人简述

如图 1 所示,该机构由定平台、动平台、3 组同步带电动缸、3 组平行四边形支链连杆组成。3 组同步带电动缸在水平面上的投影夹角为 120° ,在周向均匀布置。3 组同步带电动缸与水平面的夹角为 38° ,中心导轨线在下端相交于一点。3 个伺服电机安装于 3 组同步带电动缸的上部,分别驱动 3 个滑块沿直线导轨运动。3 组平行四边形支链的连杆长度相等,一端用球铰与滑块连接,另一端用球铰与动平台连接,当 3 个伺服电机驱动同步带电动缸的时候,滑块沿导轨直线运动,并通过 3 组平行四边形支链驱动动平台运动。

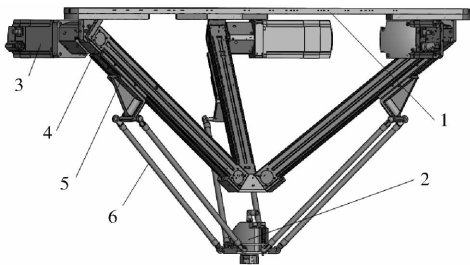


图 1 Tripod 并联机器人的 Solidworks 三维模型
Fig.1 Three dimensional model of Tripod parallel robot based on Solidworks

1. 静平台 2. 动平台 3. 交流伺服电机 4. 同步带电动缸
5. 滑块 6. 平行四边形支链连杆

该机器人的 3 个交流伺服电机安装在静平台上,且采用 3 组同步带电动缸进行驱动,平行四边形支链连杆使用轻质的碳纤维杆,整体结构紧凑,质量和体积小,具有一定的抗震性能,末端执行器(TCP)具有高的动态响应性和较大的工作空间。

1.2 自由度计算

对于空间机构自由度的计算可以采用马娄谢夫空间机构计算式,即

$$W = 6(n - 1) - 5P_5 - 4P_4 - 3P_3 - 2P_2 - P_1 \quad (1)$$

式中 n ——机构构件数

P_k ——第 k 类运动副的数目

对于 Tripod 并联机器人,由图 1 所示,机构的构件数目为 11,机构运动副总数为 15,每一条运动支链包括 1 个移动副和 4 个球面副,共 3 条运动支链。一个移动副具有 5 个约束,一个球面副具有 3 个约束。所以, $P_5 = 3, P_3 = 12$ 。代入式(1)得 $W = 6 \times (11 - 1) - 5 \times 3 - 3 \times 12 = 9$,此处值得注意的是,机构中 3 组平行四边形支链中的 6 根碳纤维杆具有 6 个绕自身轴线旋转的局部自由度。所以,机构的实际自由度为

$$F = W - F' = 9 - 6 = 3 \quad (2)$$

式中 F' ——机构局部自由度

由式(2)可以看出,由于使用了 3 组平行四边形闭环支链,限制了末端动平台的姿态,使其相对于静平台只具有 3 个方向的平动自由度,故使用 3 个交流伺服电动机作为原动件进行驱动,可以保证机构具有确定的运动。

1.3 位置逆解

为了便于位置分析,建立静平台坐标系 $oxyz$ 、动平台坐标系 $o'x'y'z'$ 以及轴坐标系 $\{E_i\}$ 。图 2 所示为 Tripod 并联机器人的坐标系俯视图,可以看到 y 正方向与 3 根同步带电动缸在 oxy 平面内的投影 (oA_1, oA_2, oA_3) 的逆时针方向夹角为

$$\beta_i = \frac{2\pi}{3}i - \frac{\pi}{6} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

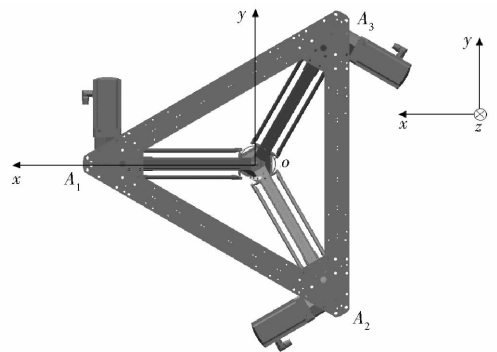


图 2 Tripod 并联机器人俯视图坐标系

Fig.2 Coordinate system of Tripod parallel robot on top view

由于 3 组运动支链对称布置,且每组平行四边形支链中的 2 个连杆始终保持平行,1 条运动支链可以简化,如图 3 所示。

图中, D_i 为同步带轮的中心点; B_i 为滑块与连杆的连接球铰中心; C_i 为过 D_i 的沿电缸轴向直线与过 B_i 的垂直于电缸导轨的直线的交点; d_i 为连杆与动平台的连接球铰中心; o' 为动平台的几何中心; E_i 为选定的驱动轴的轴原点; X_o 为 E_i 与同步带轮中心 D_i 的距离。

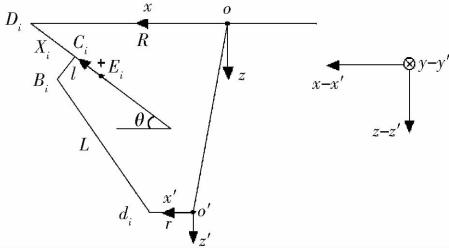


图3 Tripod 并联机器人主视图坐标系

Fig.3 Coordinate system of Tripod parallel robot on main view

从图3中可看出动平台坐标系 $o'x'y'z'$ 与静平台坐标系 $oxyz$ 坐标轴正方向一致,只是存在平移变换。

Tripod 并联机器人的位置逆解可以通过齐次坐标变换方法得到解析解^[16-17]。它的从动臂由3组平行四边形闭环支链组成,且3组平行四边形支链的连杆长度相等,所以,在每一运动支链中存在杆长约束条件 $|B_i d_i| = L$,则

$$|B_i d_i|^2 = (x_{B_i} - x_{d_i})^2 + (y_{B_i} - y_{d_i})^2 + (z_{B_i} - z_{d_i})^2 = L^2 \quad (4)$$

根据几何关系可得

$${}^o D_1 = \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad {}^o D_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2}R \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad {}^o D_3 = \begin{bmatrix} -\frac{R}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2}R \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

式中 ${}^o D_i$ —— D_i 点在坐标系 $\{o\}$ 中空间位置坐标
假设 $|D_i C_i| = X_i$,则

$${}^o C_i = \begin{bmatrix} (R - X_i \cos\theta) \sin\beta_i \\ (R - X_i \cos\theta) \cos\beta_i \\ X_i \sin\theta \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

式中 ${}^o C_i$ —— C_i 点在坐标系 $\{o\}$ 中空间位置坐标
已知 $B_i C_i = l$,则

$${}^o B_i = [x_{B_i} \quad y_{B_i} \quad z_{B_i}] = \begin{bmatrix} (R - X_i \cos\theta + l \sin\theta) \sin\beta_i \\ (R - X_i \cos\theta + l \sin\theta) \cos\beta_i \\ X_i \sin\theta + l \cos\theta \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

式中 ${}^o B_i$ —— B_i 点在坐标系 $\{o\}$ 中的空间位置坐标

由于末端动平台只具有3个平动自由度,所以,动平台坐标系 $\{o'\}$ 相对静平台坐标系 $\{o\}$ 只进行了平移变换。根据齐次坐标变换理论,动平台与连杆的连接球铰中心 d_i 在坐标系 $\{o'\}$ 与 $\{o\}$ 中的坐标存在以下变换关系

$$\begin{bmatrix} {}^o d_i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^o T \begin{bmatrix} {}^{o'} d_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad {}^o T = \begin{bmatrix} {}^o R & {}^o P_{o'} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 ${}^o d_i$ ——点 d_i 在坐标系 $\{o\}$ 中的位置坐标列向量

${}^{o'} d_i$ ——点 d_i 在坐标系 $\{o'\}$ 中的位置坐标列向量

${}^o T$ ——坐标系 $\{o\}$ 到 $\{o'\}$ 的 4×4 的齐次变换方阵

将式(8)代入式(7)可得

$${}^o d_i = {}^o R {}^{o'} d_i + {}^o P_{o'} \quad (9)$$

式中 ${}^o R$ ——坐标系 $\{o\}$ 到 $\{o'\}$ 的位姿旋转矩阵

${}^o P_{o'}$ ——坐标系 $\{o'\}$ 的原点 o' 在坐标系 $\{o\}$ 中的位置向量

由于动平台坐标系 $\{o'\}$ 只有相对于静平台 $\{o\}$ 的平移变换,所以旋转变换矩阵可简化为

$${}^o R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)得

$$\begin{bmatrix} x_{d_i} \\ y_{d_i} \\ z_{d_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{d_i} \\ y'_{d_i} \\ z'_{d_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (11)$$

由图3可以看出

$${}^{o'} d_i = \begin{bmatrix} x'_{d_i} \\ y'_{d_i} \\ z'_{d_i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} r \sin\beta_i \\ r \cos\beta_i \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得

$${}^o d_i = \begin{bmatrix} x_{d_i} \\ y_{d_i} \\ z_{d_i} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x + r \sin\beta_i \\ y + r \cos\beta_i \\ z \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

将式(6)和式(13)代入式(4)可得

$$X_i^2 + (2x \cos\theta \sin\beta_i + 2y \cos\theta \cos\beta_i - 2z \sin\theta + 2r \cos\theta - 2R \cos\theta) X_i + (x + r \sin\beta_i - R \sin\beta_i - l \sin\theta \sin\beta_i)^2 + (y + r \cos\beta_i - R \cos\beta_i - l \sin\theta \cos\beta_i)^2 + (z - l \cos\theta)^2 - L^2 = 0 \quad (14)$$

令

$$m_i = 2x \cos\theta \sin\beta_i + 2y \cos\theta \cos\beta_i - 2z \sin\theta + 2r \cos\theta - 2R \cos\theta$$

$$n_i = (x + r \sin\beta_i - R \sin\beta_i - l \sin\theta \sin\beta_i)^2 + (y + r \cos\beta_i - R \cos\beta_i - l \sin\theta \cos\beta_i)^2 + (z - l \cos\theta)^2 - L^2$$

则式(14)化简为

$$X_i^2 + m_i X_i + n_i = 0 \quad (15)$$

解式(15)得

$$X_i = \frac{-m_i \pm \sqrt{m_i^2 - 4n_i}}{2} \quad (i=1,2,3) \quad (16)$$

如图3所示,根据所建立的坐标系, $|D_i C_i| = X_i$ 为有效距离,应取正值,所以,在式(16)中,取有效解为: $0 < X_1 < D, 0 < X_2 < D, 0 < X_3 < D$ 。

根据图3中所建立的驱动轴坐标系 $\{E_i\}$, 得到3个滑块的驱动位置输入坐标为

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 - X_1 \\ X_0 - X_2 \\ X_0 - X_3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)即为 Tripod 并联机器人的位置逆解的解析解。

1.4 位置正解

由式(17)得

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 - A_1 \\ X_0 - A_2 \\ X_0 - A_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

令

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\beta_i (R - r - (X_0 - A_i) \cos\theta + l \sin\theta) \\ \cos\beta_i (R - r - (X_0 - A_i) \cos\theta + l \sin\theta) \\ (X_0 - A_i) \sin\theta + l \sin\theta \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (19)$$

将式(18)和式(19)代入式(14)可得

$$\begin{cases} (x - a_1)^2 + (y - b_1)^2 + (z - c_1)^2 = L^2 \\ (x - a_2)^2 + (y - b_2)^2 + (z - c_2)^2 = L^2 \\ (x - a_3)^2 + (y - b_3)^2 + (z - c_3)^2 = L^2 \end{cases} \quad (20)$$

式(20)即为正解的解析表达式,可以看出,它是一组三元二次的非线性方程组。

2 运动学评价

2.1 Jacobian 矩阵及机构运动学性能指标

采用微分变换法求取 Tripod 并联机器人的 Jacobian 矩阵^[18-19]。根据式(4)的杆长约束条件可得

$$|B_i d_i|^2 - L^2 = \mathbf{p}_i^T \mathbf{p}_i - L^2 = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (21)$$

其中

$$\mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} x_{d_i} - x_{B_i} \\ y_{d_i} - y_{B_i} \\ z_{d_i} - z_{B_i} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x + r \sin\beta_i - (R - X_i \cos\theta + l \sin\theta) \sin\beta_i \\ y + r \cos\beta_i - (R - X_i \cos\theta + l \sin\theta) \cos\beta_i \\ z - (X_i \sin\theta + l \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (22)$$

对式(21)求导,可得

$$\mathbf{p}_i^T \dot{\mathbf{p}}_i - \dot{\mathbf{p}}_i^T \mathbf{p}_i = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (23)$$

经过整理变换得到

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\dot{X}_1 \\ -\dot{X}_2 \\ -\dot{X}_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

将式(18)代入式(24)中得

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{A}_1 \\ \dot{A}_2 \\ \dot{A}_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

由式(25)可以看出雅可比矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中

$$\begin{cases} a_i = x + (X_0 - A_i) \cos\theta \sin\beta_i + r \sin\beta_i - R \sin\beta_i - l \sin\theta \sin\beta_i \\ b_i = y + (X_0 - A_i) \cos\theta \cos\beta_i + r \cos\beta_i - R \cos\beta_i - l \sin\theta \cos\beta_i \\ c_i = z - (X_0 - A_i) \sin\theta - l \cos\theta \\ d_i = (x + r \sin\beta_i - R \sin\beta_i - l \sin\theta \sin\beta_i) \cos\theta \sin\beta_i + (y + r \cos\beta_i - R \cos\beta_i - l \sin\theta \cos\beta_i) \cos\theta \cos\beta_i - (z - l \cos\theta) \sin\theta + X_0 - A_i \end{cases} \quad (27)$$

从式(26)可以看出, Tripod 并联机器人的 Jacobian 矩阵是一个 3×3 的方阵,且其各矩阵元素是关于末端执行器(TCP)的位置坐标 (x, y, z) 和轴位置坐标 (A_1, A_2, A_3) 的函数。

现以 Jacobian 矩阵的条件数 κ 作为机构的局部运动学性能指标^[20],该矩阵在二范数下的条件数为

$$\kappa = \text{cond}(\mathbf{J}) = \|\mathbf{J}\|_2 \|\mathbf{J}^{-1}\|_2 \quad (28)$$

Jacobian 矩阵的条件数越接近于1,机构各向同性性能越好,同时其灵活性及力学性能也越优越。当 $\theta = 20^\circ$ 时,求得 Tripod 并联机器人 Jacobian 矩阵的条件数为0.93左右,同理可求得其他角度时 Jacobian 矩阵的条件数,可知 Tripod 并联机器人具有优越的各向同性性能、良好的灵活性和力学性能。

2.2 可达工作空间分析

采用数值法中的基于运动学位置逆解的极限边界搜索法来求解可达工作空间。将末端执行器

(TCP)在静平台坐标系 $\{o\}$ 中的位置坐标 (x,y,z) 通过位置逆解计算出对应的各关节轴在轴坐标系 $\{E_i\}$ 中的坐标 (A_1,A_2,A_3) ,如果轴坐标 (A_1,A_2,A_3) 满足同步带电动缸的行程约束条件 $(A_{\min} < A_i < A_{\max})$,则认为末端点 (x,y,z) 处于工作空间范围内,否则,在工作空间外。这样,将所有边界点搜索出来,它们形成的空间曲面包络就是 Tripod 并联机器人的可达工作空间。

在 Matlab 中编写相应程序,运行结果显示 Tripod 并联机器人的可达工作空间是一带圆台的锥体,如图 4 所示。

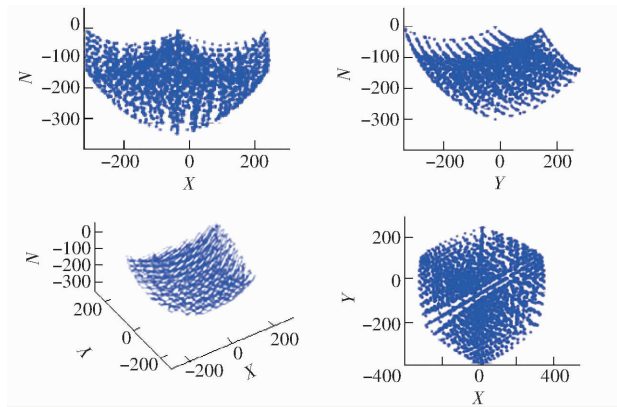


图 4 基于 Matlab 程序的可达工作空间分析

Fig. 4 Analysis of maximum working space based on Matlab program

3 运动学仿真实验

3.1 正运动学仿真

在 ADAMS/View 中,通过工具栏为 3 个驱动滑块添加平移驱动

$$\begin{cases} X_1 = 30\cos(1.5\pi t) \\ X_2 = 50t \\ X_3 = 20\sin(1.5\pi t) \end{cases} \quad (29)$$

设定仿真时间为 1 s,步数为 500,得到末端 TCP 在空间笛卡尔坐标系中的 3 个坐标方向的位移、速度、加速度曲线,如图 5 所示。为了验证前文正解算法的正确性,从驱动滑块的平移驱动函数和末端 TCP 的位移曲线上选取一系列的位置坐标对应点,对比正运动学仿真值和位置正解值,如表 1 所示。

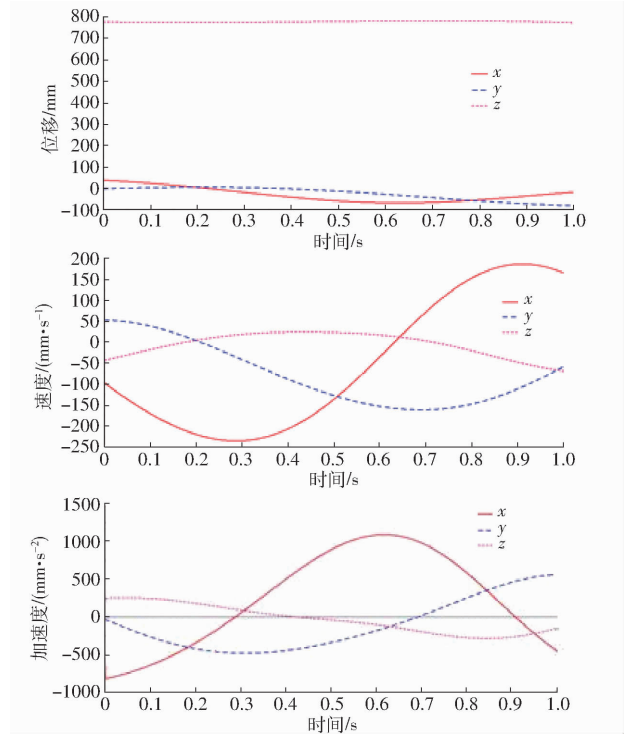


图 5 TCP 运动曲线

Fig. 5 Motion curves of TCP

表 1 位置正解算法验证

Tab. 1 Verification of forward solution algorithm

仿真时间 t/s	驱动滑块位置坐标 (A_1,A_2,A_3)	正运动学仿真值 (x,y,z)	位置正解值 (x,y,z)
0	(30.00,0,0)	(39.15,0,777.02)	(39.23,0.07,777.13)
0.10	(26.98,4.80,8.74)	(26.37,4.67,774.12)	(26.43,4.78,774.23)
0.25	(12.00,12.30,18.33)	(-4.37,6.87,773.93)	(-4.25,6.98,774.13)
0.33	(1.04,16.30,19.99)	(-23.03,4.13,775.34)	(-22.89,4.24,775.48)
0.48	(-18.68,23.80,15.65)	(-53.27,-8.92,778.98)	(-53.18,-8.81,779.16)
0.84	(-20.33,42.10,-14.71)	(-44.91,-63.23,781.08)	(-44.78,-63.33,781.19)
0.96	(-6.18,47.80,-19.57)	(-24.01,-75.79,775.79)	(-23.84,-75.59,776.03)
1.00	(-0.57,49.80,-20.00)	(-17.01,-78.66,773.23)	(-16.89,-78.47,773.38)

由图 5 和表 1 可得,正运动学仿真情况下,末端 TCP 的位移、速度、加速度曲线随时时间变化连续,过渡平滑,具有良好的运动学性能;正运动学仿真值与位置正解值基本一致,证明正解算法是正确的。

3.2 逆运动学仿真

利用 ADAMS 与 Matlab 的联合仿真来验证位置

逆解模型,在 ADAMS 中建立虚拟样机模型,定义描述虚拟样机系统方程的状态变量,通过 ADAMS/Controls 模块导出控制参数,生成可以在 Matlab 中调用的 Simulink 模块。在仿真计算过程中,ADAMS 与 Matlab 进行数据交换,由 Matlab 控制程序计算输入变量,并通过 ADAMS 的求解器求解输出变量。

图 6 为联合仿真模型,将 Inverse 模块中的机构参数设置为: $\beta_1 = 90^\circ$ 、 $\beta_2 = 210^\circ$ 、 $\beta_3 = 330^\circ$ 、 $\theta = 38^\circ$ 、 $r = 60 \text{ mm}$ 、 $R_- = 530 \text{ mm}$ 、 $l = 100 \text{ mm}$ 、 $L = 500 \text{ mm}$ 、 $X_0 = 398 \text{ mm}$ 、 $X_{0-} = 1$,经过 ADAMS 求解器和 Matlab 位置逆解算法程序的求解,得到 3 个关节轴驱动滑

块的位移。通过对图 7 的驱动滑块位移曲线的对比分析,可得 Matlab 位置逆解算法程序的求解曲线和 ADAMS 的仿真曲线十分接近,走势一致,证明前文推导的位置逆解算法是正确的。

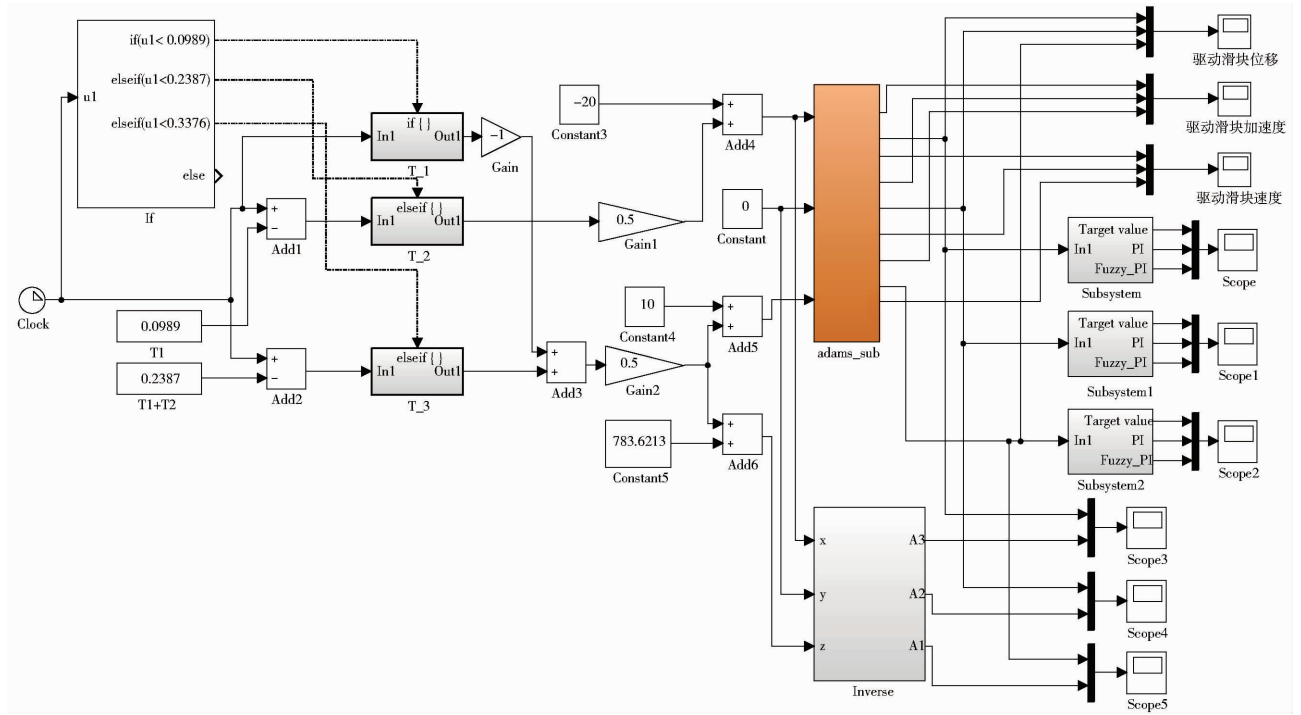


图 6 联合仿真 Simulink 模型

Fig. 6 Simulink model of joint simulation

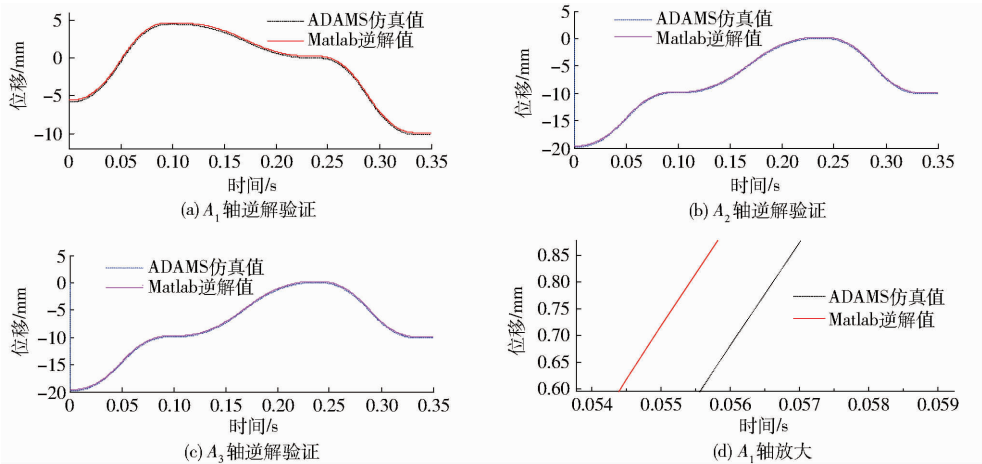


图 7 位置逆解算法验证

Fig. 7 Verification of inverse solution algorithm

4 样机实验

为验证以上所建立模型的正确性,设计了 Tripod 并联机器人样机进行实验。样机照片如图 8 所示,为实现抓取物品的功能,特意在末端执行器上装了 4 个吸盘。

系统控制方案采用的是基于 TwinCAT 软件的 PC 控制器的硬件架构,如图 9 所示。从控制器到

I/O 模块,再到伺服驱动系统都是通过 EtherCAT 总线连接,控制器为倍福 CX5010-0112 嵌入式 PC,伺服系统为 AX5000 系列的双通道伺服,I/O 模块为 EL1859。

图 10 为软件总体框架图,在 TwinCAT3 软件中包含:机器人算法模块(运动学位置正解和逆解)、NC 运算模块(轨迹规划和伺服控制)、PLC 模块(逻辑控制和运动控制的主控)。

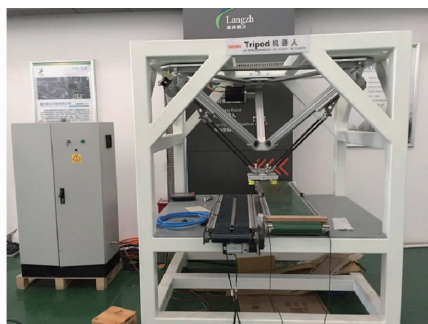


图8 Tripod 并联机器人样机

Fig. 8 Model machine of Tripod parallel robot

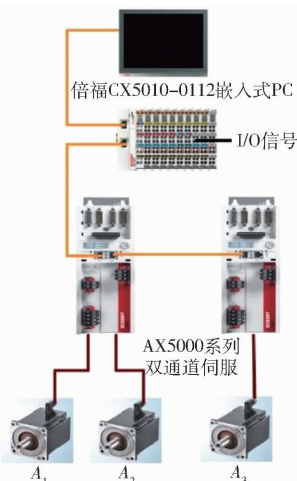


图9 基于 TwinCAT 的 PC 控制方案

Fig. 9 PC control scheme based on TwinCAT

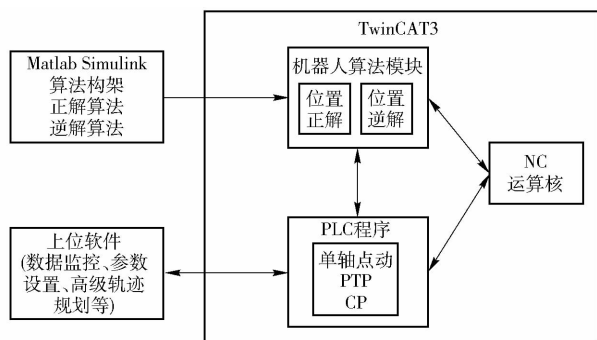


图10 软件总体框架

Fig. 10 Overall frame of software

在此基础上,对样机进行了精确定位实验、直线插补实验和圆弧插补实验。其中,使 Tripod 并联机器人末端 TCP 走典型的门字形抓取路径,循环运行,得到驱动滑块的实际位移、速度曲线以及 A_1 轴的电机扭矩测试曲线,如图 11 所示。

从图 11 可以看出末端 TCP 按照典型门字形抓取路径循环跑合时,位移、速度曲线连续光滑,电机扭矩测试曲线连续,存在很小的波动,机器人总体运

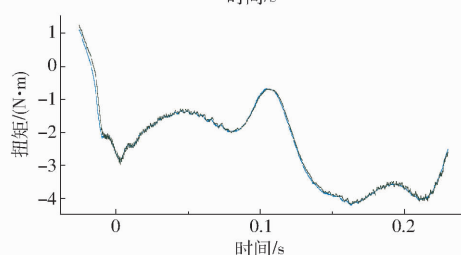
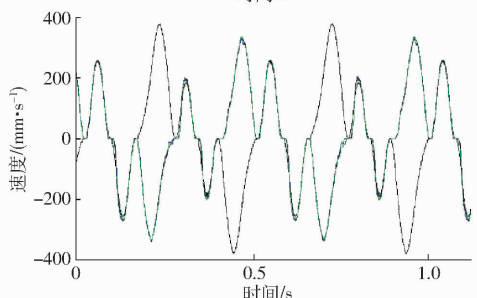
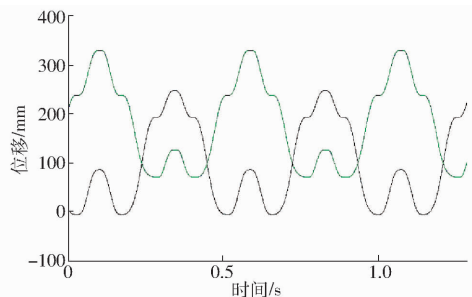


图11 驱动滑块测试曲线

Fig. 11 Test curves of driving slide

行平稳,具有良好的运动学特性。

5 结论

(1)对 Tripod 并联机器人进行了运动学分析,求出了机构自由度,采用齐次坐标变换方法推导了该机构的位置正解和逆解,并求出了机构的 Jacobian 矩阵,在此基础上对其进行了运动学性能评价、可达工作空间分析。计算结果表明该机构具有良好的各向同性、灵活性及力学性能,并具有广阔的工作空间。

(2)通过 ADAMS 和 Matlab 运动学仿真软件对正解和逆解分别进行了验证。仿真结果也证实了机构所建数学模型的正确性。

(3)制作了 Tripod 并联机器人样机,在基于 TwinCAT 软件的 PC 控制器的平台下开发了系统硬件和软件,对样机进行了精确定位实验、直线插补实验和圆弧插补实验,机器人总体运行平稳,具有良好的运动学特性,实验证明机构所建数学模型的正确性。

参 考 文 献

- 1 石岩,路懿. 运动副布置对 3-SPR 并联机构工作空间的影响分析[J]. 燕山大学学报,2008,32(4):304-310.
SHI Yan, LU Yi. Analysis about workplace of 3-SPR parallel manipulator influenced by the joints' distribution[J]. Journal of

- Yanshan University, 2008, 32(4): 304–310. (in Chinese)
- 2 STEWART D. A platform with six degrees of freedom[J]. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, 1965, 180(1): 371–386.
 - 3 CLAVEL R. Device for the movement and positioning of an element in space; US, 4976582[P]. 1990–12–11.
 - 4 张利敏, 梅江平, 赵学满, 等. Delta 机械手动力尺度综合[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 1–7.
ZHANG Limin, MEI Jiangping, ZHAO Xueman, et al. Dynamic dimensional synthesis of Delta robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3): 1–7. (in Chinese)
 - 5 张清华, 张宪民. 平面 3-RRR 柔性并联机器人残余振动主动控制[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 232–237, 266.
ZHANG Qinghua, ZHANG Xianmin. Active residual vibration control of planar 3-RRR flexible parallel robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 232–237, 266. (in Chinese)
 - 6 牛雪梅, 高国琴, 刘辛军, 等. 三自由度驱动冗余并联机构动力学建模与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 31–41.
NIU Xuemei, GAO Guoqin, LIU Xinjun, et al. Dynamics modeling and experiments of 3-DOF parallel mechanism with actuation redundancy[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(16): 31–41. (in Chinese)
 - 7 LU Yi, XU Jiayin. Using CAD geometric variation approach for lettering complicated letter on 3D free-form surface by a 3-DOF parallel machine tool[C]//Proceedings of 2007 10th IEEE International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics, 2007: 246–251.
 - 8 XIE Fugui, LIU Xinjun, WANG Liping, et al. Optimum kinematic design of the 4R 2-DOF parallel mechanism[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(5): 663–668.
 - 9 张彦斌, 张树乾, 吴鑫. 3-CRPa 移动并联机构运动学分析与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(7): 200–205.
ZHANG Yanbin, ZHANG Shuqian, WU Xin. Kinematic analysis and simulation of 3-CRPa translational parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7): 200–205. (in Chinese)
 - 10 VLADIMIR Lukan. Inverse kinematics, forward kinematic and working space determination of 3-DOF parallel manipulator with S-P-R joint structure[J]. Periodica Polytechnica: Mechanical Engineering, 2005, 49(1): 39–61.
 - 11 RENAUD P, ANDREFF N, LAVEST J M, et al. Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2006, 22(1): 12–22.
 - 12 冯李航, 张为公, 龚宗洋, 等. Delta 系列并联机器人研究进展与现状[J]. 机器人, 2014, 36(3): 375–384.
FENG Lihang, ZHANG Weigong, GONG Zongyang, et al. Developments of Delta-like parallel manipulators—a review[J]. Robot, 2014, 36(3): 375–384. (in Chinese)
 - 13 梅江平, 高奔, 谭杨, 等. 3-SPR 并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 215–220.
MEI Jiangping, GAO Ben, TAN Yang, et al. Kinematic analysis of 3-SPR parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 215–220. (in Chinese)
 - 14 高名旺, 张宪民, 刘晗. 3-RRR 高速并联机器人运动学设计与实验[J]. 机器人, 2013, 35(6): 716–722.
GAO Mingwang, ZHANG Xianmin, LIU Han. Experiment and kinematic design of 3-RRR parallel robot with high speed[J]. Robot, 2013, 35(6): 716–722. (in Chinese)
 - 15 崔国华, 周海栋, 王南, 等. 基于 Isight 的 3-UPS-S 并联机器人机构多目标优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 261–266.
CUI Guohua, ZHOU Haidong, WANG Nan, et al. Multi-objective optimization of 3-UPS-S parallel mechanism based on Isight[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 261–266. (in Chinese)
 - 16 ZUBIZARRETA A, CABANES I, MARCOS M, et al. Dynamic modeling of planar parallel robots considering passive joint sensor data[J]. Robotica, 2010, 28(5): 649–661.
 - 17 DOU R L. Optimum design of 3-RRR planar parallel manipulators[J]. Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224(2): 411–418.
 - 18 LEE K M, SHAH D K. Dynamic analysis of a three degrees of freedom inparallel actuated manipulator [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(3): 361–367.
 - 19 GUO Jianye, LIU Yongxian, SHI Jiashun, et al. Computer simulation analysis for the processing dexterity of parallel kinematic machine based on Matlab[C]//Proceedings of the 38th International Conference on Computers and Industrial Engineering, 2008: 859–864.
 - 20 GOSSELIN C, ANGELES J. Global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220–226.