文章编号:1000-582X(2008)09-0982-06

并联机构卫星通讯稳定平台运动学分析

陈兵奎,赵 骧,王永波
(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400030)

摘 要:根据空间机构学理论,通过地理坐标系的建立,联系稳定平台的位姿与运动载体,推导出在非稳定条件下的 3-RPS 并联机构上平台法向量与杆长之间的运算关系式,得到了机构的逆解方程;分析了速度和加速度特性,绘出了机构工作空间运动轨迹的曲线和曲面,结果显示:杆长值的时间函数曲线和机构的工作空间曲面平滑,机构在运行时无奇异位型。

关键词:并行处理系统;机构学;机器人;卫星通信系统
中图分类号:TH11;TP24 文献标志码:A

Kinematic analysis of a stabilized parallel mechanism platform for satellite communication

CHEN Bing-kui, *ZHAO Xiang*, *WANG Yong-bo*
(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The 3-RPS parallel mechanism under unsteady conditions was studied. By establishing geographical coordinate systems and connecting the position of the stabilized platform with the motive vector, operational formulas between normal vectors in upper and rod length were deduced, and the inverse solution derived. The character of velocity and acceleration was analyzed and the trajectory of work space plotted. Analysis indicates the time function of the rod length and the surface of the work space's trajectory are smooth, and no singular position has been found.

Key words: parallel processing systems; mechanisms; robotics; satellite communication system

基于车、船、飞机等载体的移动卫星通信系统具有高的机动性,因此在国防、民用领域得到了越来越广泛的应用。移动载体的机动性使得载体的方位、俯仰、横滚不断产生变化,从而导致天线主波束偏离卫星,影响通讯的质量并可能造成通信中断。因此,在载体上建立一个相对大地不动的稳定平台对于保证通讯的质量有着十分重要的意义。

稳定平台的实现方法目前有 2 种:自身内部稳定和外部稳定方式。自身稳定方式是依靠陀螺仪群克服载体在各个方位的摇摆,从而保持天线相对大地不动。外部稳定方式则由载体上的惯导元件提供载体的姿态,由伺服系统通过坐标变换后,控制平台运动来保持平台稳定。常见的外部稳定平台通常由纵摇驱动装置、横摇驱动装置、同步传动装置、平台、框架、基座等部件组成[1-2]。一般地,这类稳定平台只能实现两转轴的稳定。

1978 年澳大利亚的 Hunt 教授在提出了并联机构后,6 自由度的 Stewart 平台机构率先用于飞行模拟器;苏玉鑫等设计了一种大型 Stew art 型平台用于大射电望远镜(LT) 二级精调[3]; Arshad 等人提出了新的 6 自由度的并联机构的数学模型,进行了仿真分析[4];Pfreundschuh 等人利用 Jacobsen 矩阵对 3-RPS 并联机构作了运动学分析,并对系统进行了新的设计[5-10]。Lee 等用方向余弦代数法研究

收稿日期:2008-04-02
基金项目:新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0842)
作者简介:陈兵奎 (1966-),男,重庆大学研究员,博士生导师,主要从事精密传动及控制研究,(E-mail) bkchen@cqu.edu.cn。

了 3 − RPS 机器人上平台的运动性质[11-16]。由于多自由度的并联机构能在更大的空间范围内调节执行机构的运动，并能避免馈线缠绕，所以采用并联机构作为稳定平台具有良好的发展前景。考虑到天线稳定平台所需基本运动，简化平台的结构，笔者主要研究 3 − RPS 并联平台。

1　坐标系的建立

如图 1 所示，$B_1B_2B_3$ 分别是机构下平台的 3 个转动副所在点，确定的平面是机构与载体的接触平面。$B_1B_2B_3$ 构成一个正三角形。地理坐标系 $O\text{-}X_tY_tZ_t$（简称 t 系）与载体坐标系 $O\text{-}X_bY_bZ_b$（简称 b 系）原点均为三角形 $B_1B_2B_3$ 形心处。t 系中 Z_t 轴始终垂直于水平面，向上为正。X_t 指向正东，Y_t 指向正北。b 系中 Y_b 轴始终保持与载体前进方向平行，X_b 轴在平面 $P_1P_2P_3$ 内并且与 Y_b 轴垂直。Z_b 轴以右手定则判定。

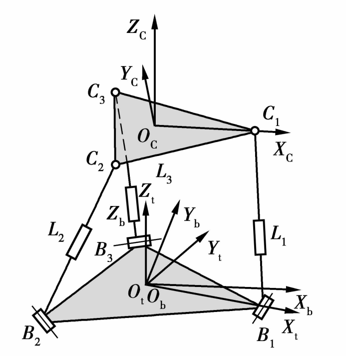

图 1　**3 − RPS** 并联机构简图

上平台坐标系（简称 c 系）$C\text{-}X_cY_cZ_c$ 原点 C 为正三角形 $C_1C_2C_3$ 形心处，Z_c 轴（与卫星电视接收系统的天线抛物面对称轴重合）垂直于平面 $B_1B_2B_3$，X_c 轴沿 CC_1 方向，Y_c 轴以右手定则判定。

2　坐标变换

c 系相对 t 系的旋转矩阵如图 2 所示。

依照左基右一原则，

$$\boldsymbol{R}_c^t = \mathrm{Rot}(z_t,\theta)\mathrm{Rot}(X_{c_1},\psi)\mathrm{Rot}(Z_{c_2},\varphi) =$$

$$\begin{bmatrix} c\varphi(c\theta - s\theta) - c\psi s\theta s\varphi & -c\varphi c\psi s\theta - (c\theta - s\theta)s\varphi & -s\theta s\psi \\ c\varphi(c\theta + s\theta) + c\theta c\psi s\varphi & c\theta c\varphi c\psi - (c\theta + s\theta)s\varphi & c\theta s\psi \\ c\varphi s\varphi + s\psi s\varphi & -s\varphi + c\varphi s\psi & c\psi \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中：

$$c = \cos, s = \sin（下同）;$$

$$\theta = 180^\circ + \mathrm{Arcsin}\left[\frac{\sin\Delta\lambda}{\sqrt{1-\cos^2\Delta\lambda\cos^2\phi}}\right](^\circ);$$

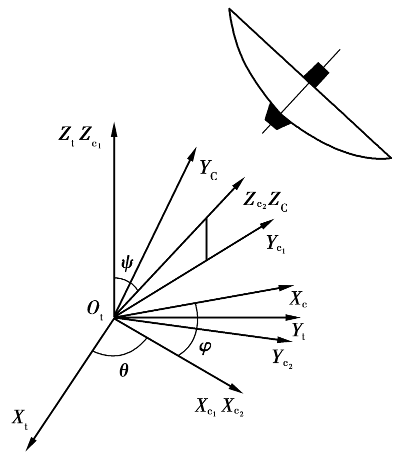

图 2　**3 − RPS** 并联机构方位示意简图

$$\psi = \mathrm{Arctan}\left[\frac{\cos\Delta\lambda\cos\phi - 0.151}{\sqrt{1-\cos^2\Delta\lambda\cos^2\phi}}\right](^\circ);$$

$\Delta\lambda$ 为地球站经度-卫星经度（°）；ϕ 为地球站纬度（°）；φ 为 c 系绕 Z_{c_2} 轴旋转的角度，记为

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}。\tag{2}$$

b 系相对 t 系的旋转矩阵为（依照左基右一原则）

$$\boldsymbol{R}_b^t = \mathrm{Rot}(Z_t,\alpha)\mathrm{Rot}(X_{b_1},\beta)\mathrm{Rot}(Y_{b_2},\gamma) =$$

$$\begin{bmatrix} c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\beta & c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma \\ s\alpha c\theta + c\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\beta & s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma \\ -c\beta s\gamma & s\beta & c\beta c\gamma \end{bmatrix}, \tag{3}$$

式中：α 为航向角；β 为俯仰角；γ 为滚转角。

c 系相对 b 系的旋转矩阵为

$$\boldsymbol{R}_c^b = (\boldsymbol{R}_b^t)^{-1}\boldsymbol{R}_c^t = (\boldsymbol{R}_b^t)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_c^t = \boldsymbol{R}_t^b\boldsymbol{R}_c^t =$$

$$\begin{bmatrix} c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma & s\alpha c\theta + c\alpha s\beta s\gamma & -c\beta s\gamma \\ -s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & s\beta \\ c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma & s\alpha s\gamma - c\alpha s\beta c\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} c\varphi(c\theta - s\theta) - c\psi s\theta s\varphi & -c\varphi c\psi s\theta - (c\theta - s\theta)s\varphi & -s\theta s\psi \\ c\varphi(c\theta + s\theta) + c\theta c\psi s\varphi & c\theta c\varphi c\psi - (c\theta + s\theta)s\varphi & c\theta s\psi \\ c\varphi s\varphi + s\varphi s\psi & -s\varphi + c\varphi s\psi & c\psi \end{bmatrix}, \tag{4}$$

记为

$$\boldsymbol{R}_c^b = \begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 \\ n_2 & o_2 & a_2 \\ n_3 & o_3 & a_3 \end{bmatrix};$$ $\boldsymbol{R}_c^b$ 是 α,β,γ 的函数矩阵，θ、ψ、ϕ 是常量。

c 系相对 b 系的位姿矩阵为

$$T_c^b=\begin{bmatrix} n_1 & o_1 & a_1 & x_c \\ n_2 & o_2 & a_2 & y_c \\ n_3 & o_3 & a_3 & z_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。\tag{5}$$

3 稳定平台机构逆解

α、β、γ 可以通过测量得出，θ、ψ 根据经纬度得出。由文献[3]知 3－RPS 机构的位置反解方程为

$$\begin{cases} L_1^2=(n_2\tau+X_c-1)^2+(n_2\tau+Y_c)^2+(n_2\tau+Z_c)^2; \\ L_2^2=\dfrac{1}{4}[(-n_1\tau+\sqrt{3}o_1\tau+2X_c+1)^2+(-n_2\tau+ \\ \quad\sqrt{3}o_2\tau+2Y_c-\sqrt{3})^2+(-n_3\tau+\sqrt{3}o_3\tau+2Z_c)^2]; \\ L_3^2=\dfrac{1}{4}[(-n_1\tau-\sqrt{3}o_1\tau+2X_c+1)^2+(-n_2\tau- \\ \quad\sqrt{3}o_2\tau+2Y_c+\sqrt{3})^2+(-n_3\tau-\sqrt{3}o_3\tau+2Z_c)^2]。 \end{cases}\tag{6}$$

式中：$\tau=\dfrac{r}{R}$；$X_c=\dfrac{x_c}{R}$；$Y_c=\dfrac{y_c}{R}$；$Z_c=\dfrac{z_c}{R}$；$L_i=\dfrac{I_i}{R}(i=1,2,3)$。$r$ 是上平台正三角形 $C_1C_2C_3$ 的外接圆半径；R 是下平台正三角形 $B_1B_2B_3$ 的外接圆半径。

$$y_c=Y_cR=-n_2\tau R,\tag{7}$$

$$x_c=X_cR=\frac{1}{2}\tau R(n_1-o_2),\tag{8}$$

$$o_1=n_2。\tag{9}$$

根据式(9)，由 α、β、γ、θ、ψ 的值解关于未知量 ϕ 的非线性方程

$$(c\alpha c\gamma-s\alpha s\beta s\gamma)(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi+(c\gamma s\alpha+c\alpha s\beta s\gamma)(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi)-c\beta s\gamma(-s\varphi+c\varphi s\psi)-c\alpha c\beta(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-c\beta s\alpha(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)+s\beta(c\varphi+s\varphi s\psi)=0,\tag{10}$$

可解得 ϕ 的 4 组解，取 ϕ 的任一解联合 α、β、γ、θ、ψ 的值代入，可解出 $\boldsymbol{R}_c^b$。

又根据式(7)(8)可解出 x_c、y_c。只要求得未知量 x_c、y_c、z_c 就不难求出杆长值。

z_c 代表 c 系原点在 b 系中 z_b 的值，这样，当已知 α、β、γ、θ、ψ、z_c 的值，就能求解出移动副的杆长值。

4 稳定平台机构速度分析

由式(7)(8)(9)代入式(6)，并对 L_1^2、L_2^2、L_3^2 求全微分得[16]

$$\left.\begin{aligned} 2L_1L'_1&=a_1dn_1+c_1dn_3+d_1do_2; \\ 2L_2L'_2&=b_2dn_2+c_2dn_3+d_2do_2+f_2do_3; \\ 2L_3L'_3&=b_3dn_2+c_3dn_3+d_3do_2+f_3do_3 \end{aligned}\right\}\tag{11}$$

式中：

$a_1=3\tau\left(-1+n_1\tau+\dfrac{1}{2}(n_1-o_2)\tau\right)$；

$c_1=2\tau(z_c+n_3\tau)$；

$d_1=-\tau\left(-1+n_1\tau+\dfrac{1}{2}(n_1-o_2)\tau\right)$；

$b_2=\dfrac{1}{4}(2\sqrt{3}\tau(1-n_1\tau+\sqrt{3}n_2\tau+(n_1-o_2)\tau)-6\tau(-\sqrt{3}-3n_2\tau+\sqrt{3}o_2\tau))$；

$c_2=-\dfrac{1}{2}\tau(2Z_c-n_3\tau+\sqrt{3}o_3\tau)$；

$d_2=\dfrac{1}{4}(-2\tau(1-n_1\tau+\sqrt{3}n_2\tau+(n_1-o_2)\tau)+2\sqrt{3}\tau(-\sqrt{3}-3n_2\tau+\sqrt{3}o_2\tau))$；

$f_2=\dfrac{1}{2}\sqrt{3}\tau(2z_c-n_3\tau+\sqrt{3}o_3\tau)$；

$b_3=\dfrac{1}{4}(-2\sqrt{3}\tau(1-n_1\tau-\sqrt{3}n_2\tau+(n_1-o_2)\tau)-6\tau(\sqrt{3}-3n_2\tau-\sqrt{3}o_2\tau))$；

$c_3=-\dfrac{1}{2}\tau(2z_c-n_3\tau-\sqrt{3}o_3\tau)$；

$d_3=\dfrac{1}{4}(-2\tau(1-n_1\tau-\sqrt{3}n_2\tau+(n_1-o_2)\tau)-2\sqrt{3}\tau(\sqrt{3}-3n_2\tau-\sqrt{3}o_2\tau))$；

$f_3=-\dfrac{1}{2}\sqrt{3}\tau(2z_c-n_3\tau-\sqrt{3}o_3\tau)$。

$$\boldsymbol{L}\dot{\boldsymbol{L}}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{R},\tag{12}$$

式中：

$$\boldsymbol{L}=\begin{bmatrix} 2L_1 & & \\ & 2L_2 & \\ & & 2L_3 \end{bmatrix};\ \dot{\boldsymbol{L}}=\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{L}_3 \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix} a_1 & 0 & c_1 & d_1 & 0 \\ 0 & b_2 & c_2 & d_2 & f_2 \\ 0 & b_3 & c_3 & d_3 & f_3 \end{bmatrix};\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix} \dot{n}_1 \\ \dot{n}_2 \\ \dot{n}_3 \\ \dot{o}_2 \\ \dot{o}_3 \end{bmatrix}。$$

$\boldsymbol{R}$ 是 n_1、n_2、n_3、o_2、o_3 分别对时间求导的矩阵

$$\left\{\begin{aligned} dn_1&=e_{11}\dot{\alpha}+e_{12}\dot{\beta}+e_{13}\dot{\gamma}; \\ dn_2&=e_{21}\dot{\alpha}+e_{22}\dot{\beta}+e_{23}\dot{\gamma}; \\ dn_3&=e_{31}\dot{\alpha}+e_{32}\dot{\beta}+e_{33}\dot{\gamma}; \\ do_2&=e_{41}\dot{\alpha}+e_{42}\dot{\beta}+e_{43}\dot{\gamma}; \\ do_3&=e_{51}\dot{\alpha}+e_{52}\dot{\beta}+e_{53}\dot{\gamma}。 \end{aligned}\right\},\tag{13}$$

式中:

$e_{11}=c\alpha c\gamma(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-s\alpha s\beta s\gamma(c\varphi\cdot(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-c\gamma s\alpha(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-c\alpha s\beta s\gamma(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi$;

$e_{12}=c\alpha c\beta s\gamma(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-c\beta s\alpha s\gamma\cdot(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)+s\beta s\gamma(c\varphi+s\varphi s\psi))$;

$e_{13}=(c\alpha c\gamma s\beta(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-s\alpha s\gamma(c\varphi\cdot(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-c\gamma s\alpha s\beta(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-c\alpha s\gamma(c\varphi(c\varphi-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-c\beta c\gamma(c\varphi+s\varphi s\psi))$;

$e_{21}=(-c\beta s\alpha(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)-c\alpha c\beta(c\varphi\cdot(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi))$;

$e_{22}=(-c\alpha s\beta(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+s\alpha s\beta\cdot(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)+c\beta(c\varphi+s\varphi s\psi))$;

$e_{23}=0$;

$e_{31}=c\gamma s\alpha s\beta(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+c\alpha s\gamma(c\varphi\cdot(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+c\alpha c\gamma s\beta(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-s\alpha s\gamma(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi))$;

$e_{32}=(-c\alpha c\beta c\gamma(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+c\beta c\gamma s\alpha\cdot(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-c\gamma s\beta(c\varphi+s\varphi s\psi))$;

$e_{33}=(c\gamma s\alpha(c\varphi(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+c\alpha s\beta s\gamma(c\varphi\cdot(c\theta+s\theta)+c\theta c\psi s\varphi)+c\alpha c\gamma(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-s\alpha s\beta s\gamma(c\varphi(c\theta-s\theta)-c\psi s\theta s\varphi)-c\beta s\gamma(c\varphi+s\varphi s\psi))$;

$e_{41}=(-c\alpha c\beta(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)-c\beta s\alpha\cdot(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi))$;

$e_{42}=(s\alpha s\beta(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)-c\alpha s\beta\cdot(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi+c\beta(-s\varphi+c\varphi s\psi))$;

$e_{43}=0$;

$e_{51}=(c\alpha c\gamma s\beta(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)-s\alpha s\gamma\cdot(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi+c\gamma s\alpha s\beta(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi)+c\alpha s\gamma(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta))s\varphi))$;

$e_{52}=(c\beta c\gamma s\alpha(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)-c\alpha c\beta c\gamma\cdot(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi-c\gamma s\beta(-s\varphi+c\varphi s\psi))$;

$e_{53}=(c\alpha c\gamma(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)-s\alpha s\beta s\gamma\cdot(-c\varphi c\psi s\theta-(c\theta-s\theta)s\varphi)+c\gamma s\alpha(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)s\varphi)+c\alpha s\beta s\gamma(c\theta c\varphi c\psi-(c\theta+s\theta)\cdot s\varphi)-c\beta s\gamma(-s\varphi+c\varphi s\psi))$。

$$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{N}\boldsymbol{V} \tag{14}$$

式中:$\boldsymbol{N}=\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} \\ e_{51} & e_{52} & e_{53} \end{bmatrix}$;$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}$。

于是,该机构的速度反解方程为

$$\dot{\boldsymbol{L}}=\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{E}\boldsymbol{V}, \tag{15}$$

其中 $\boldsymbol{E}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{N}$ 是 3×3 的矩阵。

根据式(12)(13),得到速度的正解方程为

$$\boldsymbol{V}=\boldsymbol{I}\dot{\boldsymbol{L}}, \tag{16}$$

雅可比表达式:

$$\boldsymbol{I}=\boldsymbol{E}^{-1}\boldsymbol{L}。 \tag{17}$$

5　稳定平台机构加速度分析

式(15)两端对时间求导,得加速度反解和正解表达式

$$\ddot{\boldsymbol{L}}=(\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E})\dot{\boldsymbol{V}}+\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E})}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{V}, \tag{18}$$

$$\dot{\boldsymbol{V}}=\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{L}}-\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{P}\boldsymbol{E})}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{V}, \tag{19}$$

式中:

$$\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{L}^{-1}\boldsymbol{E})}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{J}\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{L}^{-1})}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{E}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{L}^{-1}\frac{\mathrm{d}(\boldsymbol{E})}{\mathrm{d}t}。$$

6　运动学仿真

为描绘该机构的运动学特征,给出如下结构参数:c 系坐标原点 C 到上平台 3 个球铰 $r=30$ cm,C 点在 b 系中的纵坐标 $z_c=40$ cm,$\theta=45°$,$\psi=45°$。

1)当 $\beta=0$,$\gamma=0$,$\alpha\in[0,\pi]$时,载体仅航向角变化,C 点在 t 系的运动轨迹见图 2。

2)当 $\alpha=0$,$\gamma=0$,$\beta\in[-\pi/4,\pi/4]$时,载体仅俯仰角变化,C 点在 t 系的运动轨迹见图 3。

需要说明的是:当 z_c/r 值变化时,C 点的轨迹图像有较大的变化。

3)当 $\gamma=0$,$\alpha,\beta\in[-\pi/4,\pi/4]$时,载体偏摆角不变,而航向角、俯仰角变化,$C$ 点在 t 系的运动轨迹见图 4。

4)当 $\alpha=0$,$\beta,\gamma\in[-\pi/4,\pi/4]$时,载体航向角不变,而俯仰角、偏摆角变化,$C$ 点在 t 系的运动轨迹见图 5。

5)当 $\beta=0$,$\alpha,\gamma\in[-\pi/4,\pi/4]$时,载体俯仰角不变,而航向角、俯仰角变化,$C$ 点在 t 系的运动轨迹见图 6。

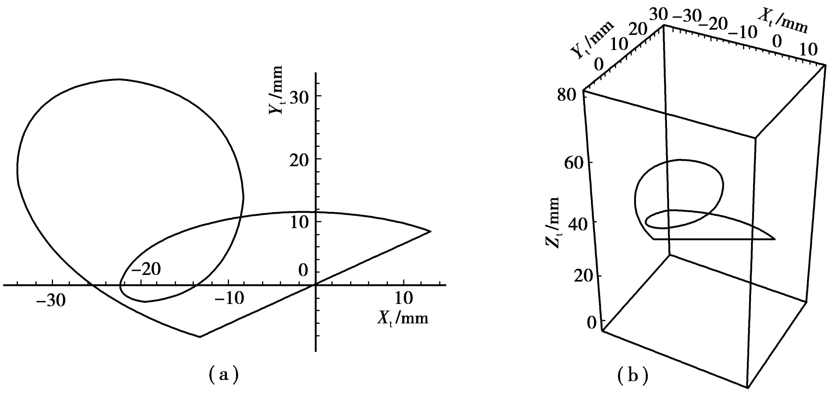

图 2　**c** 系原点在 **t** 系的运动轨迹 **1**

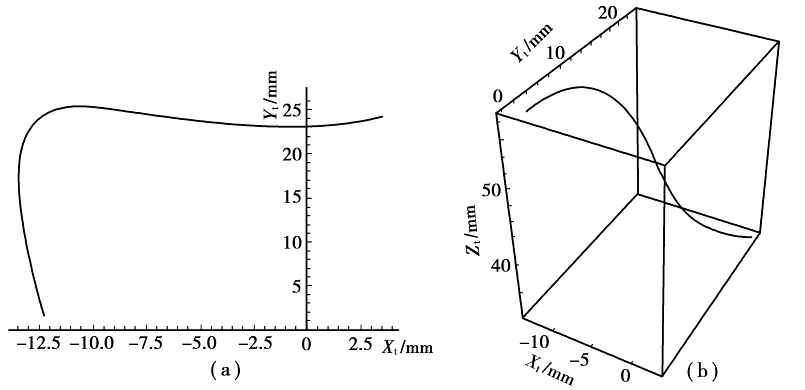

图 3　**c** 系原点在 **t** 系的运动轨迹 **2**

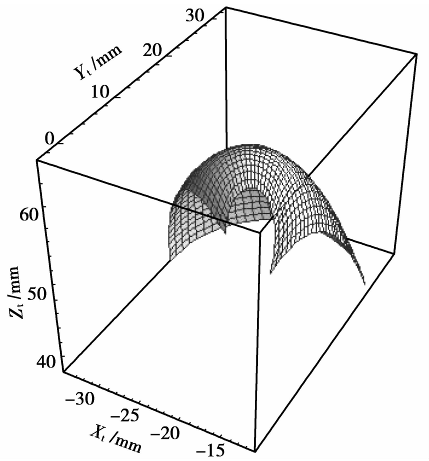

图 4　**c** 系原点在 **t** 系的运动轨迹 **3**

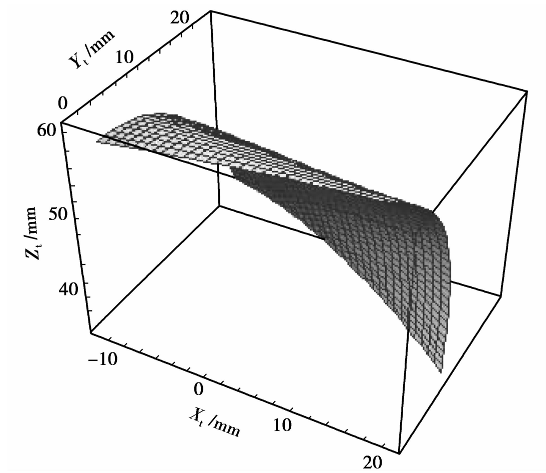

图 5　**c** 系原点在 **t** 系的运动轨迹 **4**

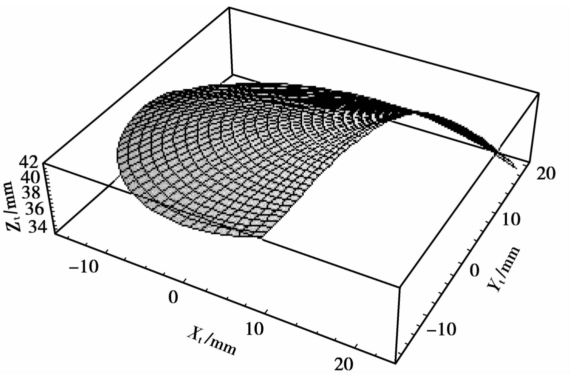

图 6　**c** 系原点在 **t** 系的运动轨迹 **5**

7　结　论

在非稳定的情况下给出了 3－RPS 并联机构稳定平台的一类逆解算法，验算表明：

1)在非稳定状态下，通过建立一个原点在下平台重心的地理坐标系，找到了稳定平台的位姿与运动载体之间的关系。

2)根据测量得到载体的航向角、俯仰角和滚转角及上平台所需要的姿态转角 θ、ψ，可求出 ϕ 值，再根据逆解方程即可求出杆长值。

3)杆长值无封闭解，3－RPS 的工作空间由 ϕ 值选取的不同而异。

在此基础上可进一步实现对稳定平台的控制，通过实验可进一步研究 ϕ 值的选取对机构速度加速度以及杆长变化速度的影响。

参考文献：

[1] 赵金锴，笪林荣. 基于 DSP 的舰载搜索雷达稳定平台交流伺服系统的设计[J]. 舰船电子对抗，2006，29(4)：50-53，79.
ZHAO JIN-KAI, DA LIN-RONG. Design of AC servo control system in based on DSP shipborne search radar stabilized platform[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2006，29(4)：50-53，79.

[2] 杨锡和. 一种新型雷达天线方位转台[J]. 雷达与对抗，2004，68(2)：63-64，68.
YANG XI-HE . A new bearing turntable for radar antenna[J]. Radar & Ecm, 2004，68(2)：63-64，68.

[3] 苏玉鑫，段宝岩. 大射电望远镜精调稳定平台结构设计及动力分析 [J]. 机械科学与技术，2000 ，19(3)：377-380.
SU YU-XIN, DUAN BAO-YAN. Mechanical design and dynamic analysis of a stable plat form for fine tuning of a large telescope[J]. Mechanical Science And Technology, 2000，19(3)：377-380.

[4] ARSHAD M, KHAN T M, CHOUDHRY M A. Solution of forward kinematics model of six degrees of freedom parallel robot manipulator [C/OL] // IEEE 2005 International Conference on Emerging Technologies, Islamabad, September 17-18, 2005 [2005-12-19]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp? arnumber=1558914.

[5] PFREUNDSCHUH G H, KUMAR V, SUGAR T G. Design and control of a 3 DOF in-parallel actuated manipulator[C/OL] // Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sacramento, California, April 9-11, 1991 [2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp? arnumber=131857.

[6] FENG J, LI X F, LIU Y. Temperature-induced dissociation reaction and dynamics of light-harvesting complex II isolated from purple photosynthetic bacterium Rps. palustris[J]. Chinese Science Bulletin, 2007，52(8)：1029-1035.

[7] ZHAO T S, ZHAO Y Z, HUANG Z, et al. A novel approach to kinematic characteristics analysis of parallel manipulators with fewer than six DOF[C/OL] // 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics [2006-12-04]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp? arnumber=4018780.

[8] PENDAR H, VAKIL M, ZOHOOR H. Efficient dynamic equations of 3-RPS parallel mechanism through lagrange method [C/OL] // 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004 [2005-06-13]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp? arnumber=1438083.

[9] FAN L Z, ELATTA A Y, LI X P. Kinematic calibration for a hybrid 5DOF manipulator based on 3-RPS in-actuated parallel manipulator[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(7/8): 730-734.

[10] 徐鹏. 六自由度并联机构 Stewart 平台的动力学建模与仿真[D]重庆：重庆大学光电工程学院，2005.

[11] LEE K M, SHAH D. Kinematic analysis of a three-degree-of-freedom in-parallel actuated manipulator[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988，4(3): 354-360.

[12] RANKY P G. Reconfigrrable robot tool designs and integration applications[J]. Industrial Robot, 2003，30(4)：338-344.

[13] FANG Y F, TSAI L W. Structure synthesis of a class of 3-DOF rotational parallel manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1): 117-121.

[14] LI Y M, XU Q S. Kinematics and dexterity analysis for a novel 3-DOF translational parallel manipulator[C] // Department of Electromechanical Engineering, Faculty of Science and Technology University of Macau Av, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain. Piscataway: IEEE, 2005: 2944-2949.

[15] HUANG Z, TAO W S, FANG Y F. Study on the kinematic characteristics of 3 DOF in-parallel actuated platform mechanisms [J]. Mechanism and Machine Theory, 1996, 31(8)：999-1007.

[16] 于海波，赵铁石，李仕华，等. 空间 3－SPS/S 对顶双锥机构的运动学分析[J]. 机械设计，2007，24(2)：11-14.
YU HAI-BO, ZHAO TIE-SHI, LI SHI-HUA, et al. Kinematics analysis on the spatial 3-SPS/S opposing vertexes double pyramid mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2007，24(2)：11-14.

（编辑　张　苹）