

基于 matlab 六自由度摇摆平台分析和仿真

卢 洲 陈松波 姜 伟

零八一电子集团有限公司, 四川 成都 611731

[摘要]在现代工业与科研领域, 六自由度摇摆平台凭借其能够模拟复杂空间运动的特性, 广泛应用于飞行模拟器、汽车动力学测试、机器人运动控制等诸多场景。其运动控制的核心在于精确求解各驱动杆的长度变化, 以实现平台在空间中的六自由度运动, 而这一过程依赖于位置反解算法的准确性。本文将深入探讨六自由度摇摆平台的位置反解分析, 并通过 Matlab 仿真与 SolidWorks 模型验证相结合的方式, 确保算法的可靠性与有效性。

[关键词] Matlab 仿真; 六自由度; 摇摆台

DOI: 10.33142/sca.v8i8.17613

中图分类号: TM743

文献标识码: A

Analysis and Simulation of Six Degree of Freedom Swinging Platform Based on Matlab

LU Zhou, CHEN Songbo, JIANG Wei

Lingbayi Electronics Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611731, China

Abstract: In the fields of modern industry and scientific research, the six degree of freedom swing platform is widely used in flight simulators, automotive dynamics testing, robot motion control and many other scenarios due to its ability to simulate complex spatial motion. The core of its motion control lies in accurately solving the length changes of each driving rod to achieve the six degrees of freedom motion of the platform in space, and this process depends on the accuracy of the position inverse solution algorithm. This article will delve into the position inverse analysis of a six degree of freedom swing platform, and ensure the reliability and effectiveness of the algorithm through a combination of Matlab simulation and SolidWorks model verification.

Keywords: Matlab simulation; six degrees of freedom; swing table

引言

在现代高端装备制造与精密运动控制领域, Stewart 结构六自由度摇摆平台凭借其高精度、高刚度和灵活的运动特性, 成为诸多关键技术研究与应用的核心载体。从航空航天飞行器姿态模拟, 到汽车工业的底盘性能测试, 再到虚拟现实领域的动感体验设备, Stewart 平台的应用场景不断拓展。Stewart 结构六自由度摇摆平台以其独特的并联机构设计著称, 由固定的下平台、可动的上平台以及六根连接上下平台的并联伸缩杆构成。这种结构赋予了平台在空间中实现六个自由度运动的能力, 即沿 x 、 y 、 z 三个方向的平移以及绕这三个轴的旋转。各伸缩杆之间相互协同, 微小的伸缩量变化都能引发上平台复杂的空间位姿改变。本文根据六自由度平台的三维结构模型和位置逆解分析建立数学模型, 运用 Matlab 软件进行仿真得出各伸缩杆杆长值, 并在 solidworks 利用三维结构模型测量相关数据验证数学模型正确性。

1 六自由度摇摆平台位姿定义

六自由度摇摆平台用来模拟载车、舰船或飞行器的位姿, 参照相应运动平台(以舰船为例)建立其坐标系。在舰船运动分析中, 采用右手坐标系定义如下运动形式: 以舰船前进方向为 X 轴正方向, 此时绕 X 轴的旋转运动(α 角)定义为滚转(横摇); 垂直于前进方向的水平轴为 Y 轴, 绕 Y 轴的旋转运动(β 角)定义为俯仰(纵摇); 竖

直向上的方向为 Z 轴, 绕 Z 轴的旋转运动(γ 角)定义为偏航。

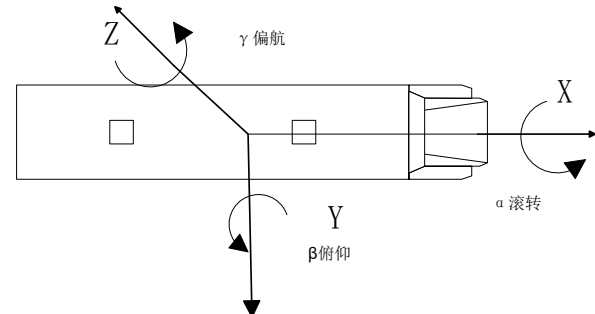


图 1 六自由度摇摆平台坐标系

2 六自由度平台位置反解变换矩阵

在构建数学模型前, 需对平台进行细致的结构参数分析。下平台通常稳固安装于基座上, 其铰点分布位置与角度是固定参数; 上平台作为运动执行端, 铰点布局同样具有特定几何关系。通过建立以固定下平台几何中心为原点的坐标系, 可精确描述上下平台铰点在空间中的位置坐标。设有固定坐标系为 $OXYZ$ 及运动坐标系为 $O^*X^*Y^*Z^*$ (如图 2 所示), 在初始状态时, 两坐标系完全重合。根据空间坐标系变换原理, 当运动坐标系的原点平移到绝对坐标 (a , b , c), 及绕固定坐标系 X 、 Y 、 Z 轴分别旋转 α 、 β 、 γ 角时, 有以下的齐次坐标变换矩阵:

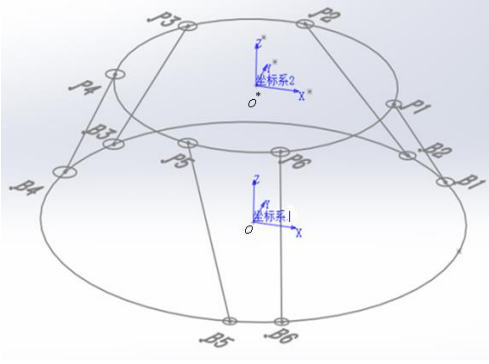


图2 固定坐标系及运动坐标系示意图

$$H = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & -C\alpha S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma & S\alpha S\gamma + C\alpha S\beta C\gamma & a \\ C\beta S\gamma & C\alpha C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & -S\alpha C\gamma + C\alpha S\beta S\gamma & b \\ -S\beta & S\alpha C\beta & C\alpha C\beta & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $\cos$ 简写为 C , $\sin$ 简写为 S 。

根据上平台在坐标系中零位的中心位置量及姿态量 (α 、 β 、 γ 、 a 、 b 、 c) 来求解各支撑杆的伸缩量即六自由度运动平台位置反解。要求解各支撑杆的伸缩量, 首先要计算出上下各铰点在固定坐标系的坐标。

由于下平台静止不动, 所有各铰点的坐标固定, 记为 B_i , 上平台在运动坐标系的坐标为 P_i , 在固定坐标系的坐标为 P_i' , 则有:

$$P_i' = H \cdot P_i \quad (2)$$

设上下平台各铰点在静坐标系的坐标为:

$$P_i' = [P_{ix}, P_{iy}, P_{iz}]^T \quad (3)$$

$$B_i = [B_{ix}, B_{iy}, B_{iz}]^T \quad (4)$$

则各伸缩杆长度:

$$|L_i| = \sqrt{(P_{ix} - B_{ix})^2 + (P_{iy} - B_{iy})^2 + (P_{iz} - B_{iz})^2} \quad (5)$$

3 杆长计算

上、下平台铰点的分布以及平台结构参数在六自由度摆摆平台的设计与运动学分析中起着决定性作用。图3为上平台和下平台铰点的空间布局图, 六自由度平台主要结构参数有5个, 分别为上铰点分布圆半径 R_p 、上铰点分布角 θ_p 、下铰点分布圆半径 R_B 、下铰点分布角 θ_B 及初始状态上下铰点垂直高度差 (图2中 OO^* 的间距) 为 h 。如图3所示, 上、下平台铰点均呈圆周对称分布。下平台作为固定基座, 其铰点分布圆以固定坐标系原点 (下平台几何中心) 为圆心, 半径 $R_B=675\text{mm}$, 铰点沿圆周均匀分布, 相邻铰点之间的夹角 $\theta_B=30^\circ$, 这使得6个铰点将圆周等分为12份。这种分布方式为平台提供了稳定的支撑基础, 且各向同性的布局有助于均匀传递驱动力, 保证平台运动的平稳性。上平台作为运动执行端, 铰点分布圆以零位时上平台的几何中心为圆心, 半径 $R_p=468\text{mm}$, 同样6个铰点沿圆周均匀分布, 相邻铰点夹角为 $\theta_p=30^\circ$ 。初始状态上下铰点垂直高度差 $h=900\text{mm}$, 该参数决定了平台在零位时的初始高度, 影响着支撑杆的初始长度以及平台运动过程中的行程范围。

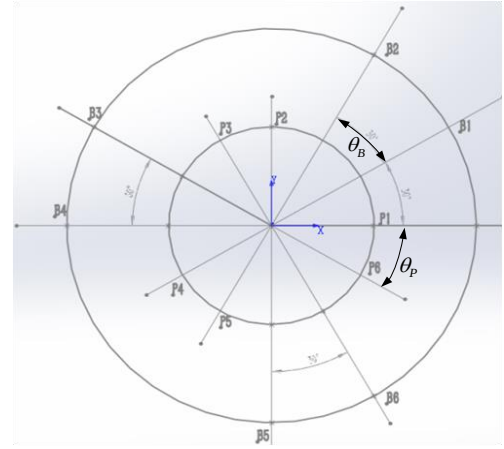


图3 铰点分布图

以6个下铰点中心所在的平面设为下平台, 以6个上铰点中心所在的平面设为上平台, 将固定坐标系 $OXYZ$ 建立在下平台外接圆中心, 将活动坐标系 $O^*X^*Y^*Z^*$ 建立在上平台外接圆中心, 平台初始零位时, 坐标轴 OX 平行于 O^*X^* , OY 平行于 O^*Y^* , OZ 与 O^*Z^* 重合, 当上平台位姿变化时, 上平台即活动系位姿可用 α 、 β 、 γ 、 a 、 b 、 c 这6个参数来表达, 其中 (a , b , c) 为活动系原点 O^* 在固定坐标系的绝对坐标, α 、 β 、 γ 为上平台的姿态角, 即分别为上平台法向量相对于下平台三个固定轴 X 、 Y 、 Z 的转角。

首先根据上平台结构尺寸, 按图2可求得上平台各铰点在活动系的相对坐标 (X_i' , Y_i' , Z_i'), ($i=1\sim6$):

$$P1: (R_p, 0, 900)$$

$$P2: (0, R_p, 900)$$

$$P3: (-R_p \times 0.5, R_p \times 0.866, 900)$$

$$P4: (-R_p \times 0.866, -R_p \times 0.5, 900)$$

$$P5: (-R_p \times 0.5, -R_p \times 0.866, 900)$$

$$P6: (R_p \times 0.866, -R_p \times 0.5, 900)$$

根据式1求得上平台各铰点在固定系的绝对坐标 (X_i , Y_i , Z_i) ($i=1\sim6$)。

$$(x_i \ y_i \ z_i \ 1)^T = H \times (x_i' \ y_i' \ z_i' \ 1)^T, i=1,2,3,4,5,6 \quad (6)$$

其中 α : 横摇角度值、 β : 纵摇角度值、 γ : 偏航角度值, a : O^* 相对初始状态 X 轴平移量、 b : O^* 相对初始状态 Y 轴平移量、 c : O^* 相对初始状态 Z 轴平移量。

根据下平台结构尺寸, 按图2可求得下平台各铰点坐标 (X_{bi} , Y_{bi} , Z_{bi}) ($i=1\sim6$):

$$B1: (R_B \times 0.866, R_B \times 0.5, 0)$$

$$B2: (R_B \times 0.5, R_B \times 0.866, 0)$$

$$B3: (-R_B \times 0.866, R_B \times 0.5, 0)$$

$$B4: (-R_B, 0, 0)$$

$$B5: (0, -R_B, 0)$$

$$B6: (R_B \times 0.5, -R_B \times 0.866, 0)$$

根据式2求得杆长值 L_i , $i=1\sim6$ 。

$$L_i = \left[(x_i - x_{bi})^2 + (y_i - y_{bi})^2 + (z_i - z_{bi})^2 \right]^{1/2}, i=1,2,3,4,5,6 \quad (7)$$

已知初始杆长，可求出各杆的伸缩量。

4 仿真及验证

分别对单自由度的杆长算法进行了仿真验证，平台参数：上铰点分布圆半径 $R_p=468\text{mm}$ 、上铰点分布角 $\theta_p=30^\circ$ 、下铰点分布圆半径 $R_B=675\text{mm}$ 、下铰点分布角 $\theta_B=30^\circ$ 、初始状态上下铰点高度差 $h=900\text{mm}$ ，杆长仿真图如图 4 所示，仿真模块代码如下。

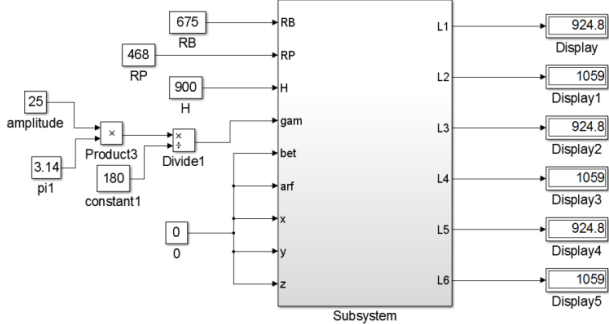


图 4 杆长仿真图

```

sarf=sin(arf);
carf=cos(arf);
sbet=sin(bet);
cbet=cos(bet);
sgam=sin(gam);
cgam=cos(gam);
h11=cbet.*cgam;
h12=-carf.*sgam+sarf.*sbet.*cgam;
h13=sarf.*sgam+carf.*sbet.*cgam;
h14=x;
h21=cbet.*sgam;
h22=carf.*cgam+sarf.*sbet.*sgam;
h23=-sarf.*cgam+carf.*sbet.*sgam;
h24=y;
h31=-sbet;
h32=sarf.*cbet;
h33=carf.*cbet;
h34=z;
po11=h11*rp+h13*h+h14*1;
po12=h12*rp+h13*h+h14*1;
po13=-h11*rp*0.5+h12*rp*0.866+h13*h+h14*1;
po14=-h11*rp*0.866-h12*rp*0.5+h13*h+h14*1;
po15=-h11*rp*0.5-h12*rp*0.866+h13*h+h14*1;
po16=h11*rp*0.866-h12*rp*0.5+h13*h+h14*1;
po21=h21*rp+h23*h+h24*1;
po22=h22*rp+h23*h+h24*1;
po23=-h21*rp*0.5+h22*rp*0.866+h23*h+h24*1;
po24=-h21*rp*0.866-h22*rp*0.5+h23*h+h24*1;
po25=-h21*rp*0.5-h22*rp*0.866+h23*h+h24*1;

```

```

po26=h21*rp*0.866-h22*rp*0.5+h23*h+h24*1;
po31=h31*rp+h33*h+h34*1;
po32=h32*rp+h33*h+h34*1;
po33=-h31*rp*0.5+h32*rp*0.866+h33*h+h34*1;
po34=-h31*rp*0.866-h32*rp*0.5+h33*h+h34*1;
po35=-h31*rp*0.5-h32*rp*0.866+h33*h+h34*1;
po36=h31*rp*0.866-h32*rp*0.5+h33*h+h34*1;
bo11=rb*0.866;
bo12=rb*0.5;
bo13=-rb*0.866;
bo14=-rb;
bo15=0;
bo16=rb*0.5;
bo21=rb*0.5;
bo22=rb*0.866;
bo23=rb*0.5;
bo24=0;
bo25=-rb;
bo26=-rb*0.866;
bo31=0;
bo32=0;
bo33=0;
bo34=0;
bo35=0;
bo36=0;

```

$l1=\sqrt{(po11-bo11)^2+(po21-bo21)^2+(po31-bo31)^2}$;
 $l2=\sqrt{(po12-bo12)^2+(po22-bo22)^2+(po32-bo32)^2}$;
 $l3=\sqrt{(po13-bo13)^2+(po23-bo23)^2+(po33-bo33)^2}$;
 $l4=\sqrt{(po14-bo14)^2+(po24-bo24)^2+(po34-bo34)^2}$;
 $l5=\sqrt{(po15-bo15)^2+(po25-bo25)^2+(po35-bo35)^2}$;
 $l6=\sqrt{(po16-bo16)^2+(po26-bo26)^2+(po36-bo36)^2}$;
 设横摇角摆幅为 25° ，纵摇及偏航角摆幅为 0° ，X、Y、Z 三轴平移值为 0，根据仿真结果求得杆长 $L1=1093\text{mm}$ ，杆长 $L2=1197\text{mm}$ ，杆长 $L3=1104\text{mm}$ ，杆长 $L4=968\text{mm}$ ，杆长 $L5=689\text{mm}$ ，杆长 $L6=720\text{mm}$ ，根据杆长值在 Solidworks 建模验证图如图 5 所示，实测横摇角摆幅为 24.96° ，验证了横摇单自由度旋转时杆长解算算法准确性。

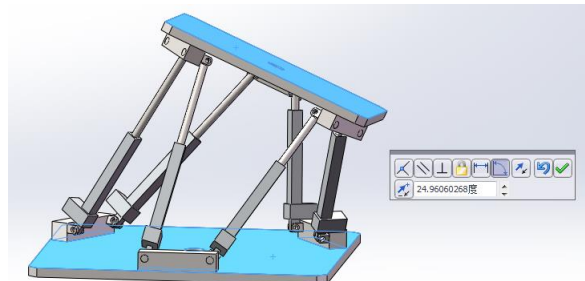


图 5 横摇角摆幅验证图

设偏航角摆幅为 25° ，纵摇及横摇角摆幅为 0° ，X、Y、Z 三轴平移值为 0，根据仿真结果求得杆长 $L_1=924.8\text{mm}$ ，杆长 $L_2=1059\text{mm}$ ，杆长 $L_3=924.8\text{mm}$ ，杆长 $L_4=1059\text{mm}$ ，杆长 $L_5=924.8\text{mm}$ ，杆长 $L_6=1059\text{mm}$ ，根据杆长值在 Solidworks 建模验证图如图 6 所示，实测偏航角摆幅为 24.85° ，验证了偏航单自由度旋转时杆长解算算法准确性。

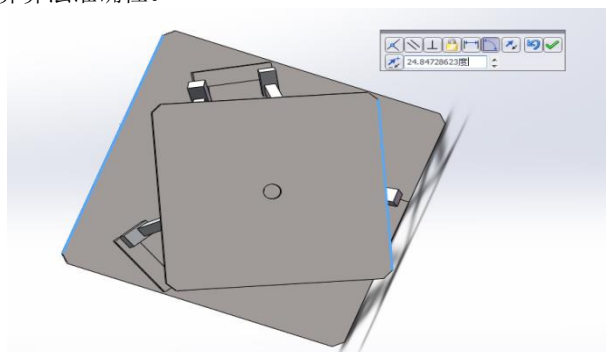


图 6 偏航角摆幅验证图

设 Z 轴向上平移 200mm，偏航、纵摇及横摇角摆幅为 0° ，X、Y 两轴平移值为 0，根据仿真结果求得杆长 $L_1=L_2=L_3=L_4=L_5=L_6=1157\text{mm}$ ，根据杆长值在 Solidworks 建模验证图如图 7 所示，实测上铰点和下铰点的垂直高度为 1100mm，比初始值升高了 200mm，验证了垂荡单自由度平移时杆长解算算法准确性。

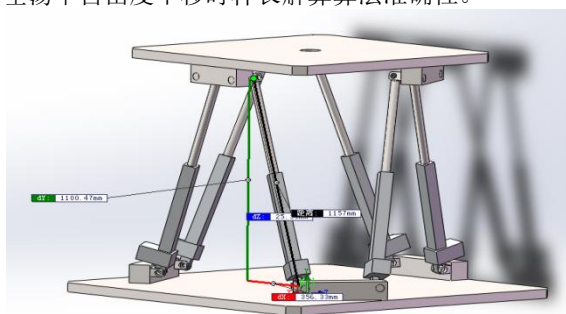


图 7 垂荡摆幅验证图

设 Y 轴平移幅值为 300mm，偏航、纵摇及横摇角摆幅为 0° ，X、Z 两轴平移值为 0，根据仿真结果求得杆长 $L_1=908\text{mm}$ ，杆长 $L_2=979\text{mm}$ ，杆长 $L_3=1034\text{mm}$ ，杆长 $L_4=942\text{mm}$ ，杆长 $L_5=1091\text{mm}$ ，杆长 $L_6=1113\text{mm}$ ，根据杆长值在 Solidworks 建模验证图如图 8 所示，实测纵荡摆幅为 300mm，验证了纵荡单自由度平移时杆长解算算法准确性。

纵摇角摆动与横摇角摆动可等效分析，X 轴平移与 Y

轴平移可等效分析，经仿真分析验证杆长解算算法准确。

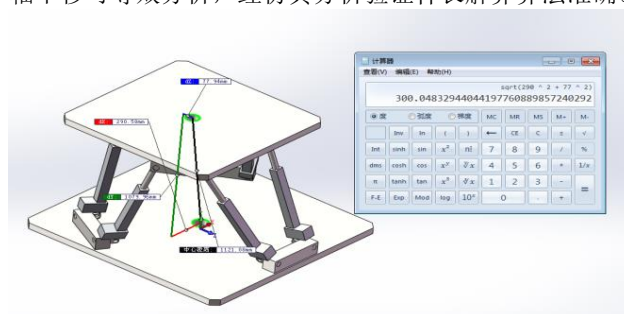


图 8 纵荡摆幅验证图

5 结论

本文对某六自由度摇摆平台杆长解算进行理论分析，给出了运动学描述矩阵、建立了仿真平台，经仿真得出了单自由度摇摆时各伸缩杆杆长，并通过三维结构模型测量验证。充分证明仿真技术在六自由度摇摆平台杆长解算及设计优化中具有重要作用。仿真能够在设计阶段快速模拟平台的各种运动工况，为设计人员提供直观的数据参考，帮助优化平台结构参数，使摇摆平台设计更加合理可行，有效缩短研发周期，降低研发成本。后续研究可进一步拓展仿真工况，探索多自由度耦合运动下的平台特性，为平台的实际应用提供更全面的技术支持。

【参考文献】

- [1]刘荣,王宣银.并联六自由度平台的运动仿真及其可视化设计研究[J].液压与气动,2005,1(8):67.
 - [2]从爽.并联机器人-建模、控制优化与应用[M].北京:电子工业出版社,2010.
 - [3]蔡自兴.机器人学基础[M].北京:机械工业出版社,2015.
 - [4]赵景山.机器人机构自由度分析理论[M].北京:科学出版社,2009.
 - [5]李磊.六自由度并联平台位置正解及控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- 作者简介: 卢洲 (1986.7—), 毕业院校: 南京理工大学, 所学专业: 自动化, 当前就职单位: 零八一电子集团有限公司, 职称级别: 中级工程师; 陈松波 (1985.12—), 毕业院校: 中南大学, 所学专业: 测控技术与仪器, 当前就职单位: 零八一电子集团有限公司, 职务: 机电研究所所长, 职称级别: 高级工程师; 姜伟 (1985.4—), 毕业院校: 北京航空航天大学, 所学专业: 飞行器设计与工程(航天方向), 当前就职单位: 零八一电子集团有限公司, 职务: 机电研究所副所长, 职称级别: 中级工程师。