

一种快速三轴全方位光电跟踪策略

官伯林, 贾建援, 朱应敏

(西安电子科技大学机电工程学院, 710071, 西安)

摘要: 为了消除两轴光电跟踪系统的跟踪盲区, 提出了一种存在冗余自由度的三轴光电跟踪系统. 先运用四元数方法, 建立三轴光电跟踪系统的运动学模型, 然后在此基础上, 应用极小范数最小二乘算法, 设计出一种快速三轴全方位的光电跟踪策略. 该跟踪策略针对方程系数求取 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 通过对三轴光电跟踪系统的运动方程进行三角变换, 得到了三轴角增量组合的极小范数最小二乘解. 仿真和实验结果表明, 该跟踪策略不需要复杂的寻优过程, 即可真正实现三轴联动全方位连续跟踪运动, 与其他跟踪策略相比, 该跟踪策略在跟踪运动过程中所需的各轴转动角度更小, 因此跟踪性能更加优越.

关键词: 跟踪系统; 跟踪策略; 四元数; 极小范数最小二乘解

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0076-07

High-Speed Tracking Strategy for Three-Axis Photoelectric Tracking System in Whole Space

GUAN Bolin, JIA Jianyuan, ZHU Yingmin

(School of Electronic al and Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A type of three-axis photoelectric tracking system with a redundant degree of freedom is designed for avoiding the spatial blind region of two-axis photoelectric tracking system. The kinematical model of three-axis photoelectric tracking system is constructed by quaternion, and a high-speed tracking strategy of three-axis photoelectric tracking system is proposed with minimum norm least squares solution. Via triangular transformation of three-axis kinematical function, the Moore-Penrose generalized inverse matrix of function is gained, and the minimum norm least squares solution of three-axis angular increments is solved. The results of simulation and experiment show that this tracking strategy does not need the complex optimization process, and the system enables to realize three-axis linkage continuous tracking movement in whole space, and the tracking angular increments of three axes get much smaller.

Keywords: tracking system; tracking strategy; quaternion; minimum norm least squares solution

光电跟踪系统以高于微波频率的光波为信号载体, 具有精密度高、灵敏性强的特点, 因此具有良好的跟踪特性、极高的时频域分辨率. 光电跟踪系统在低可观测性目标探测、高分辨率目标识别、精确制导、火控和瞄准等军事应用领域, 以及在激光通信、天文观测、航空摄影、靶场测试等领域都得到了广泛

的应用^[1-3]. 然而, 现有的两轴光电跟踪系统不可避免地存在跟踪盲区^[4-5], 为实现空间运动目标的全方位跟踪, 提高跟踪系统的可靠性, 必须消除这些跟踪盲区^[6].

由于三轴光电跟踪系统存在冗余的自由度, 因此能够消除跟踪盲区, 实现空间目标的全方位跟踪

运动^[7-8].但是,三轴光电跟踪系统中冗余自由度的存在,使得目标的空间位置与三轴光电跟踪系统的三轴转动角度组合之间呈现一对多的特性,导致了三轴光电跟踪策略的多样性和复杂性.现有三轴光电跟踪系统的跟踪策略大多是应用两轴切换的方法,系统虽然是三轴装置结构,但在跟踪过程中仍然采用两轴形式的跟踪策略^[9-10].因此,当目标位于远离盲区的位置时,应用切换跟踪策略的跟踪效率与两轴光电跟踪系统相同,并没有跟踪性能上的提高,而应用切换跟踪策略会使得跟踪过程不连续,增加了系统运动控制策略的复杂性.同时,为使系统在切换过程中仍然能够保持对目标的跟踪,需要系统在进行轴间运动切换时,方位轴或横倾轴的速度立刻为零,显然这在实际的系统中是不可能实现的.因此,切换跟踪策略在切换过程中不可避免地会增大系统的跟踪误差,降低系统跟踪精度,甚至导致系统在两轴切换过程中丢失目标,从而严重影响系统的跟踪性能^[11-13].目前,也有应用优化方法设计的三轴光电跟踪策略,但优化方法计算过程复杂、计算量大、寻优过程耗费的时间长,无法保证三轴光电跟踪系统的快速性和实时性,因此降低了系统的跟踪性能^[14].

本文运用四元数方法,建立了存在一个冗余自由度的三轴光电跟踪系统的运动学方程,提出一种应用极小范数最小二乘解的快速三轴光电跟踪策略,求得在不同初始条件下满足跟踪要求的三轴转角增量的组合.本文提出的跟踪策略不需要复杂的寻优过程,计算速度快,从而保证了系统在跟踪过程中的快速性和实时性.

1 三轴光电跟踪系统的运动学分析

如图1所示,三轴光电跟踪系统的工作原理为:空间目标的位置由目标探测器(CCD)测得,然后通过方位轴、俯仰轴和横倾轴的转动,使得瞄准轴对准目标,以实现系统的跟踪功能.

以大地坐标系为参考坐标系,定义三轴光电跟踪系统所在位置为坐标原点,在初始状态时,系统的方位轴和横倾轴与 z 轴重合,俯仰轴与 x 轴重合,瞄准轴与 y 轴重合.设目标与坐标原点的距离为 y_{d0} ,根据四元数定义^[15],设 i, j, k 分别为 x, y, z 轴的方向矢量,则三轴光电跟踪装置在参考坐标系下的零位瞄准轴矢量为 $R_0 = y_{d0}j$.先绕方位轴转动角度 ϕ ,得到瞄准轴矢量 R_1 ,描述转动的规范四元数为 q_1 ;

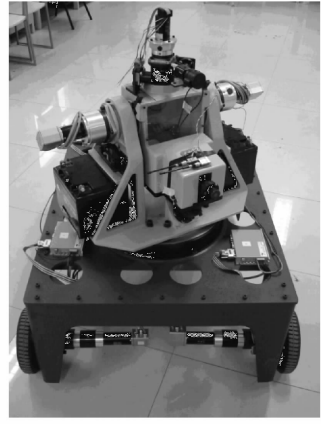


图1 三轴光电跟踪系统实验装置图

再绕俯仰轴转动角度 θ ,得到瞄准轴矢量 R_2 ,描述转动的规范四元数为 q_2 ;最后绕横倾轴转动角度 ψ ,得到瞄准轴矢量 R_3 ,描述转动的规范四元数为 q_3 .三轴光电跟踪系统的结构和各转动轴的转动方位如图2所示,其中

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= \cos(\phi/2) + [\sin(\phi/2)k] \\ q_2 &= \cos(\theta/2) + \sin(\theta/2)[(\cos\phi)i + (\sin\phi)j] \\ q_3 &= \cos(\psi/2) + \sin(\psi/2)[(\sin\phi\sin\theta)i - (\cos\phi\sin\theta)j + (\cos\theta)k] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

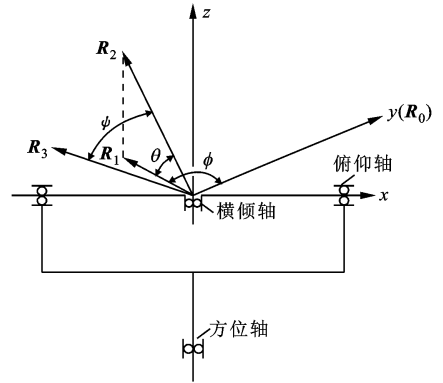


图2 三轴光电跟踪系统的结构示意图

根据式(1),可以得到

$$R_3 = q_3 R_2 q_3^{-1} = q_3 q_2 R_1 q_2^{-1} q_3^{-1} = q_3 q_2 q_1 R_0 q_1^{-1} q_2^{-1} q_3^{-1} = y_{d0} [(-\cos\phi\sin\psi - \sin\phi\cos\theta\cos\psi)i + (\cos\phi\cos\theta\cos\psi - \sin\phi\sin\psi)j + (\sin\theta\cos\phi)k] \quad (2)$$

通过式(2),可以得到满足位移坐标形式的目标向量的初始位置

$$r_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = y_{d0} \begin{bmatrix} -\cos\phi & -\sin\phi\cos\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \\ 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix} = y_{d0} \mathbf{A}_1 \begin{bmatrix} \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{A}_1$ 为不满秩矩阵. 由于 $\mathbf{A}_1$ 的秩 $\text{rank}(\mathbf{A}_1) = 2$, 因此在三轴光电跟踪系统中, 当已知转动前后的指向位置和目标位置时, 三轴转动角度的组合可以有无数个.

2 三轴光电跟踪策略

对于极小范数最小二乘解的三轴光电跟踪系统, 通过目标探测器可获得 $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$, y_{d0} , 如果 ϕ, θ, ψ 为可测值, 则 $\mathbf{r}_0$ 的位置方程与三轴初始转角的关系如式(3)所示. 通过目标探测器获得目标当前位置 $\mathbf{r}(x, y, z)$, 此时目标与光电跟踪系统之间距离为 y_d . 为使三轴光电跟踪系统瞄准 $\mathbf{r}$, 三轴光电跟踪系统的转动角度为 $\Delta\phi, \Delta\theta$ 和 $\Delta\psi$, 它们的关系

$$\mathbf{r} = y_d \begin{bmatrix} -\cos\phi & -\sin\phi\cos\theta \\ -\sin\phi & \cos\phi\cos\theta \\ 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\psi \\ \cos\psi \end{bmatrix} + y_d \begin{bmatrix} \sin\phi\sin\psi - \cos\phi\cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\cos\theta\sin\psi - \cos\phi\cos\psi \\ -\cos\phi\sin\psi - \sin\phi\cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\cos\phi\cos\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ 0 & \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta\sin\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ \Delta\theta \\ \Delta\psi \end{bmatrix} \quad (6)$$

设

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \sin\phi\sin\psi - \cos\phi\cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \sin\phi\cos\theta\sin\psi - \cos\phi\cos\psi \\ -\cos\phi\sin\psi - \sin\phi\cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\theta\cos\psi & -\cos\phi\cos\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi \\ 0 & \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta\sin\psi \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(3)代入式(6), 可得

$$\mathbf{r} = y_d \mathbf{r}_0 / y_{d0} + y_d \mathbf{A}_2 [\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi]^T \quad (8)$$

已知 ϕ, θ, ψ , 通过式(7)可以求得 $\mathbf{A}_2$ 的值, 而且由于 $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0), \mathbf{r}(x, y, z)$ 已知, 因此若要求得式(5)中的 $\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi$, 则必须先求得 $\mathbf{A}_2$ 的逆矩阵. 由于冗余自由度的存在, $\mathbf{A}_2$ 的秩 $\text{rank}(\mathbf{A}_2) = 2$, 显然 $\mathbf{A}_2^{-1}$ 不存在, 因此式(8)为相容的线性方程组, 三轴角的增量组合 $(\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi)$ 的解不唯一.

由 Moore-Penrose 广义逆矩阵的性质可知, 若 $\mathbf{A}_2$ 存在广义逆矩阵 $\mathbf{A}_2^+$, 则通过求解以下方程

$$[\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi]^T = \mathbf{A}_2^+ \frac{(\mathbf{r} - y_d \mathbf{r}_0 / y_{d0})}{y_d} \quad (9)$$

使得式(8)存在唯一的极小范数最小二乘解, 且满足式(5). 根据广义逆矩阵的定义, 将 $\mathbf{A}_2$ 满秩分解为 $\mathbf{A}_2 = \mathbf{M}\mathbf{N}$, 其中 $\mathbf{N}$ 为列满秩矩阵, $\mathbf{M}$ 为行满秩矩阵, 则求得

为

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = y_d \begin{bmatrix} -\cos(\phi + \Delta\phi) & -\sin(\phi + \Delta\phi)\cos(\theta + \Delta\theta) \\ -\sin(\phi + \Delta\phi) & \cos(\phi + \Delta\phi)\cos(\theta + \Delta\theta) \\ 0 & \sin(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\psi + \Delta\psi) \\ \cos(\psi + \Delta\psi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

光电跟踪系统的最终目标是使系统瞄准轴快速准确地瞄准目标. 为使三轴光电跟踪系统在最短时间内瞄准目标, 将优化目标函数设定为

$$\min J = (\Delta\phi)^2 + (\Delta\theta)^2 + (\Delta\psi)^2 \quad (5)$$

即通过优化可使 $\Delta\phi, \Delta\theta, \Delta\psi$ 的平方和最小. 将式(4)进行三角函数变换, 忽略高阶小量, 得到

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \sin\phi\sin\psi - \cos\phi\cos\theta\cos\psi & \sin\phi\sin\theta\cos\psi \\ -\cos\phi\sin\psi - \sin\phi\cos\theta\cos\psi & -\cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ 0 & \cos\theta\cos\psi \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\cos\theta \\ 0 & 1 & -(\sin\theta\sin\psi)/(\cos\theta\cos\psi) \end{bmatrix} \quad (10)$$

因此, 可以得到 $\mathbf{A}_2$ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵

$$\mathbf{A}_2^+ = \mathbf{N}^T (\mathbf{N}\mathbf{N}^T)^{-1} (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 即可求得满足式(5)的三轴角增量组合.

通过三角函数变换和广义逆矩阵分析可以看出, 应用极小范数最小二乘算法的三轴光电跟踪策略, 在求解过程中只需要计算 $\mathbf{A}_2$ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵, 即可得到满足优化要求的三轴角增量组合, 求解过程简便、计算量小、计算速度快, 从而保证了系统在跟踪过程中具有良好的快速性、实时性和跟踪性能.

3 实验数据和分析

在系统跟踪精度一定的条件下,光电跟踪系统的跟踪性能主要由以下两方面决定:①光电跟踪系统的跟踪范围越大,系统的跟踪性能就越好;②在各轴转动速度相同的条件下,光电跟踪系统中各轴转动角的增量越小,实现目标跟踪所需要的时间就越短,而系统的快速性越好,跟踪性能也越好。

为验证快速三轴光电跟踪策略的跟踪性能,在给定不同目标位置的情况下,应用极小范数最小二

乘算法,求得三轴角的增量,并与两轴光电跟踪策略和三轴切换跟踪策略进行了比较.三轴切换跟踪策略为:当目标远离天顶位置时,横倾轴保持不动,通过转动方位轴和俯仰轴进行目标跟踪运动;当目标在天顶附近时,方位轴保持不动,通过转动俯仰轴和横倾轴进行目标跟踪运动。

3 种光电跟踪策略的实验结果如表 1、表 2 所示.表 1、表 2 中的前 4 组实验数据为目标远离天顶区域位置的跟踪结果,第 5 和第 6 组实验数据是目标接近天顶位置时的跟踪结果。

表 1 目标位置和光电跟踪系统的初始转角

编号	r_0/m			r/m			两轴初始转角/ $^\circ$		三轴初始转角/ $^\circ$		
	x_0	y_0	z_0	x	y	z	φ	θ	φ	θ	ψ
1	-360	-300	600	-340	-320	625	129.806	52.009	60.376	74.655	35.190
2	500	450	360	520	430	350	-48.013	28.154	-24.002	30.364	-21.024
3	50	100	30	60	110	35	-26.565	15.020	-13.288	15.413	-12.816
4	600	-300	200	620	-285	220	-116.565	16.602	-61.715	27.378	-51.588
5	1	-2	500	2	1	465	26.565	89.743	-73.864	89.954	-0.252
6	3	-1	200	-1	2	215	-108.435	89.094	-24.950	89.897	-0.900

表 2 光电跟踪系统各轴转角的增量

编号	两轴跟踪策略			三轴切换跟踪策略				快速三轴跟踪策略			
	$\Delta\phi/^\circ$	$\Delta\theta/^\circ$	$ \alpha /^\circ$	$\Delta\phi/^\circ$	$\Delta\theta/^\circ$	$\Delta\psi/^\circ$	$ \alpha /^\circ$	$\Delta\phi/^\circ$	$\Delta\theta/^\circ$	$\Delta\psi/^\circ$	$ \alpha /^\circ$
1	3.459	1.229	3.459	3.459	1.229	0.000	3.459	1.267	2.096	-0.600	2.096
2	-2.399	-0.739	2.399	-2.399	-0.739	0.000	2.399	-1.049	-0.487	-1.326	1.326
3	-2.045	0.586	2.045	-2.045	0.586	0.000	2.045	-0.985	0.673	-0.980	0.985
4	1.878	1.268	1.878	1.878	1.268	0.000	1.878	0.668	1.210	1.542	1.542
5	-90.000	-0.019	90.000	0.000	-0.216	0.336	0.336	0.001	-0.225	0.302	0.302
6	135.000	0.310	135.000	0.000	1.382	0.416	1.382	0.007	-0.268	1.366	1.366

注: $|\alpha|$ 为系统各轴角增量绝对值的最大值

对于两轴光电跟踪系统,可以看出系统在天顶附近的方位角增量明显过大,在规定时间内,需要一个非常大的方位轴转动速度才能实现目标的跟踪定位,显然在实际中方位轴的驱动电机无法满足系统跟踪运动的需求,因此造成目标丢失,系统进入跟踪盲区.应用切换策略的三轴光电跟踪系统,虽然能够通过方位轴和横倾轴的运动切换避免跟踪盲区的产生,但是当目标位于远离天顶区域的位置时,其跟踪策略与两轴光电跟踪策略相同,因此并没有跟踪性

能上的提高.应用极小范数最小二乘解的快速三轴光电跟踪策略,不但在天顶附近能够以较小的转动角增量来实现目标的跟踪,而且避免了跟踪盲区的产生,与其他 2 种光电跟踪策略相比 $|\alpha|$ 最小.因此,在各轴转速相同的情况下,快速三轴光电跟踪系统所需的跟踪时间更短,从而能够更快地实现目标的跟踪定位。

综上所述,应用极小范数最小二乘解的快速三轴光电跟踪策略,不但可以避免跟踪盲区的产生,实

现目标的全方位跟踪运动,而且具有最好的跟踪性能。

考虑大范围连续运动目标的跟踪,假定跟踪系统的采样周期为 Δt ,而跟踪运动轨迹所需时间为 t ,则跟踪步数 $n=t/\Delta t$,得到的跟踪姿态角序列为

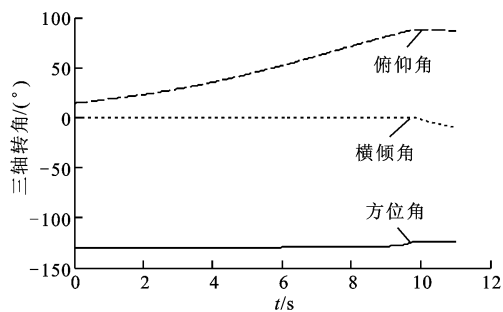
$$\begin{bmatrix} \phi_{i+1} \\ \theta_{i+1} \\ \psi_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \theta_i \\ \psi_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\phi_i \\ \Delta\theta_i \\ \Delta\psi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \theta_i \\ \psi_i \end{bmatrix} + A_{2i}^+ \frac{(\mathbf{r}_{i+1} - y_{di+1} \mathbf{r}_i / y_{di})}{y_{di+1}} \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

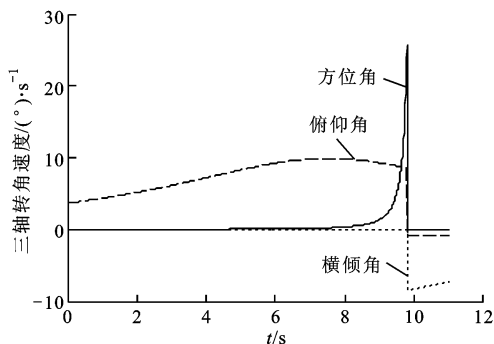
式中: $\mathbf{r}_i$ 为 x 目标位置序列。根据实验装置的要求,光电跟踪系统各轴最大转速 $v=57.3(^{\circ})/\text{s}$ 。当 $t=11\text{ s}$ 时,设目标运行轨迹由 $[1\ 800\text{ m}, -1\ 500\text{ m}, 600\text{ m}]^T$ 沿直线匀速运行至 $[-180\text{ m}, 150\text{ m}, 1\ 700\text{ m}]^T$,当 $t=10\text{ s}$ 时,目标运行轨迹通过天顶位置。对于两轴光电跟踪系统,由跟踪特性^[4,12]可知,当目标到达天顶位置时,方位轴的转动速度为无穷大,系统进入跟踪盲区,无法跟踪目标。

如图3所示,三轴切换跟踪策略的切换规则为:当方位轴转速小于 $0.5v$ 时,目标远离天顶位置,采用方位轴和俯仰轴进行跟踪运动。当方位轴转速大于 $0.5v$ 时,目标接近天顶位置,应用横倾轴和俯仰轴进行跟踪运动。从图3中还可以看出,采用切换策略的三轴光电跟踪系统可以避免天顶盲区的产生,在天顶附近,各转动轴仍然能够以较小的转动角度进行目标的跟踪。在切换过程中,各轴的角速度会有一个非常大的突变(见图3b),这不但使得系统跟踪过程不连续,还增加了系统运动控制策略的复杂性,而且需要方位轴转速立刻为0,同时要求横倾轴的转速由静止状态立刻达到期望转速,以保证系统在两轴运动切换过程中仍然可以跟踪到目标。但是,这在实际系统的跟踪过程中是无法实现的,因此在切换过程中不可避免地会增大系统跟踪误差,从而降低系统的跟踪精度和可靠性,甚至导致系统在切换过程中丢失目标。

从图4中可以看出,应用极小范数最小二乘解的快速三轴光电跟踪策略,在整个跟踪运动过程中,系统的三轴转动速度都远小于系统给定的最大转速,因而使得三轴分别转动一个比较小的角度就可以实现对目标的跟踪定位。同时,三轴光电跟踪系统不需要在跟踪过程中进行轴系间的运动切换即可避免跟踪盲区,可以快速实现目标的全方位连续跟踪定位,其跟踪性能远优于两轴光电跟踪系统和应用

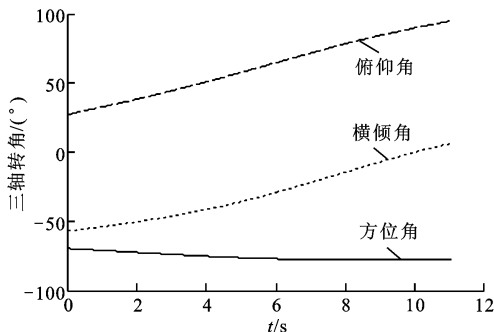


(a)三轴转动角度

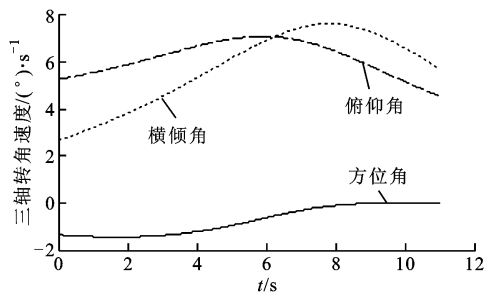


(b)三轴转动角速度

图3 三轴切换跟踪策略的跟踪曲线



(a)三轴转动角度



(b)三轴转动角速度

图4 快速三轴跟踪策略的跟踪运动曲线

切换策略的三轴光电跟踪系统。

为了验证快速三轴光电跟踪策略的有效性,考虑应用快速三轴光电跟踪策略的系统控制运动,其控制运动曲线如图5所示。从图5可以看出,系统在整个控制运动过程中三轴转角误差均小于 0.015° 。

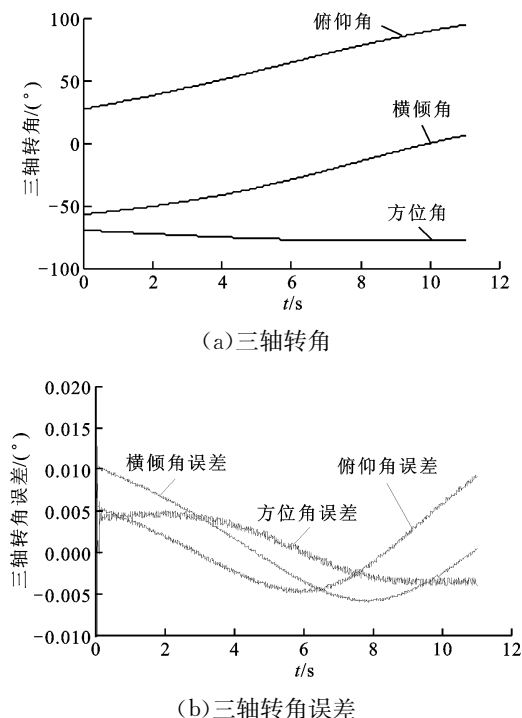


图5 快速三轴光电跟踪系统的转角及误差曲线

因此,系统在整个控制运动过程中跟踪误差小、跟踪精度高、跟踪稳定性良好,能够满足三轴光电跟踪系统对于目标跟踪的要求。

4 结 论

本文先应用四元数方法分析了三轴光电跟踪系统的运动学特性,给出了三轴转角与目标方位坐标之间的关系。然后,提出一种应用极小范数最小二乘解的快速三轴光电跟踪策略,并应用于三轴全方位无切换跟踪策略的研究中,得到在不同目标位置下满足跟踪要求的三轴角增量。本文提出的跟踪策略不需要复杂的寻优过程,计算过程简便、计算量小、计算速度快,能够使系统在跟踪过程中具有良好的快速性和实时性,因此提高了系统的跟踪性能。最后,分别与两轴光电跟踪系统和应用切换策略的三轴光电跟踪系统进行了比较,验证了本文跟踪策略的有效性和实用性。

仿真和实验结果表明,应用极小范数最小二乘解跟踪策略的三轴光电跟踪系统能够消除跟踪盲区,实现目标的全方位跟踪运动。同时,在跟踪过程中系统各轴的转动角度较小,在各轴转速一定的情况下,与两轴光电跟踪系统及应用切换策略的三轴光电跟踪系统相比,系统在跟踪过程中不需要进行轴系间的运动切换,实现了目标的连续跟踪运动,降低了系统运动控制策略的复杂度。从工程角度上讲,

采用极小范数最小二乘解跟踪策略的三轴光电跟踪系统,在结构上虽然增加了一个横倾轴,但是却降低了系统在跟踪过程中各轴的转速,而且也相应降低对于各轴驱动电机功率的需求和硬件的要求。因此在三轴光电跟踪系统设计中,选择小功率的驱动电机即可满足系统跟踪运动的要求。

参考文献:

- [1] TOMIZUKA M. Zero phase error tracking algorithm for digital control [J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1987, 109(1): 65-68.
- [2] YSH S S, HSU P L. Analysis and design of integrated control for multi-axis motion systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(3): 375-382.
- [3] ZHAO Z M, YUAN X Y. Backstepping designed sliding mode control for a two-axis tracking system [C]// Proceedings of the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1593-1598.
- [4] 董小萌,张平. 两轴稳定平台的过顶盲区问题 [J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(7): 811-815.
DONG Xiaomeng, ZHANG Ping. Zenith blind zone of two-axis stabilized platform [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(7): 811-815.
- [5] LO C C. Three-axis contouring control based on a trajectory coordinate basis [J]. JSME International Journal: Series C Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, 1998, 41(2): 242-247.
- [6] XIE Y, VILATHGAMUWA D M, TSENG K J, et al. Modeling and robust adaptive control of a 3-axis motion simulator [C]// Proceedings of the 2001 IEEE Industry Applications Conference 36th IAS Annual Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 553-560.
- [7] XIE Y, VILATHGAMUWA D M, TSENG K J. Robust adaptive control of a three-axis motion simulator with state observers [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2005, 10(4): 437-448.
- [8] 刘兴法,马佳光,苏赋. 三轴光电跟踪系统的实时引导 [J]. 光电工程, 2006, 33(12): 1-4.
LIU Xingfa, MA Jianguang, SU Fu. Real time introduction of three-axis photoelectric tracking system [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(12): 1-4.
- [9] 刘兴法. 三轴光电跟踪系统对地平式天顶盲区出入口的判定方法 [J]. 应用光学, 2008, 29(4): 488-492.

- LIU Xingfa. Determination of entry and exit points in alt-azimuth zenith blind region by three-axis electro-optical tracker [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4):488-492.
- [10] 刘延斌,金光,何惠阳. 三轴仿真转台系统模型建立及解耦控制研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(3):323-328.
- LIU Yanbin, JIN Guang, HE Huiyang. Modeling of three axis simulator and decoupling control [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(3):323-328.
- [11] 黄一,卢广山,陈宗基. 三自由度机载光电跟踪平台建模与校核 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9):1948-1952.
- HUANG Yi, LU Guangshan, CHEN Zongji. modeling and verification for a three-degree-of-freedom airborne electro-optical tracking and pointing platform [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9):1948-1952.
- [12] 倪谷炎,华卫红,姜宗福,等. 三轴跟踪平台算法研究 [J]. 国防科技大学学报, 2005, 25(1):115-118.
- NI Guyan, HUA Weihong, JIANG Zongfu, et al. On three axis mount tracking algorithms [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2005, 25(1):115-118.
- [13] 刘珊中,孙隆和,车宏. 机载光电跟踪平台建模及其 H_∞ 稳定控制 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(6):1518-1522.
- LIU Shanzhong, SUN Longhe, CHE Hong. Modeling and its H_∞ stabilization control for airborne electro-optical tracking and pointing platform [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(6):1518-1522.
- [14] 张大兴,贾建援,张爱梅,等. 基于粒子群算法的三轴跟瞄装置跟踪策略研究 [J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(9):1841-1845.
- ZHANG Daxing, JIA Jianyuan, ZHANG Aimei, et al. Investigation on tracking strategy of three-axis tracking equipment based on particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(9):1841-1845.
- [15] 刘俊峰. 三维转动的四元数表述 [J]. 大学物理, 2004, 23(4):39-43.
- LIU Junfeng. Three dimensional rotation represented by quaternion [J]. College Physics, 2004, 23(4):39-43.

(编辑 管咏梅)