文章编号 1004-924X(2014)10-2787-09

滚仰式导引头跟踪回路角增量优化

吴海龙[1,2],贾宏光[1],魏 群[1*],姜湖海[3],王 超[1],虞林瑶[1],张天翼[1],朱瑞飞[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100039;3. 西南技术物理研究所,四川 成都 610041)

摘要:提出了一种角增量的生成及优化方法,用于解决滚仰式导引头跟踪回路角增量指令的提取问题。介绍了一种滚仰式导引头结构组成及其工作原理;根据脱靶量信息和探测器焦距给出了滚转和俯仰框架的位置回路角增量;将角增量标定为以两框架零位为起点的绝对角位置指令,其中,俯仰框的角位置指令标定区为[0, π/2],滚转框的角位置指令标定区为[0,2π)。依据减小滚转框角增量的原则,将导引头滚转框的当前框架角在[0,2π)内均分成 4 个象限,在不同的当前框架角范围内给出了相应的角增量优化策略。最后,设计了角增量优化指令的半实物实验以验证方法的可行性。实验结果表明:文中提出的指令提取和优化方法可以实现对目标的跟踪,跟踪误差为 0.149 4°。

关 键 词:滚仰式导引头;跟踪回路;角增量;脱靶量;稳定平台

中图分类号:V472.13;TJ765.331 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20142210.2787

Optimization of angle increments in tracking loop for roll-pitch seekers

WU Hai-long[1,2], JIA Hong-guang[1], WEI Qun[1*], JIANG Hu-hai[3],
WANG Chao[1], YU Lin-yao[1], ZHANG Tian-yi[1], ZHU Rui-fei[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*;
3. *Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu* 610041, *China*)
** Corresponding author, E-mail: wei.q@hotmail.com*

Abstract: A method to generate and optimize angle increments was put forward to extract the tracking loop instruction of a roll-pitch seeker. Firstly, one kind of the roll-pitch seeker was introduced, and its mechanical construction and operation principle were given. Then, the angle increments of roll gimbals and pitch gimbals were calculated based on the target deviation on the image plane and the optical focal length. Both roll gimbal instruction and pitch gimbal instruction were calibrated to be absolute angular position instructions from the zero position respectively. The absolute angular position instruction for the pitch gimbals was calibrated to be from zero to π/2, while that for the roll gimbals was calibrated to be from zero to 2π. According to the principle of minimizing the angle increment of

收稿日期:2013-08-12;**修订日期**:2013-10-08.
基金项目:中国科学院三期创新工程装备预研基金资助项目(No. 51301060207)

roll gimbals as small as possible, four different optimized control strategies were designed. On the basis of mentioned strategies, the feedback roll gimbal angle was separated into four quadrants. Finally, a simulation and a test were implemented to check the validity of the presented algorithm. Results show that the submitted generation and optimization of angle increments for roll-pitch seekers perform effectively and the tracking error is less than 0.15°.

Key words: roll-pitch seeker; tracking loop; angle increment; target deviation; stabilized platform

1 引　言

制空权在现代战争中的地位显著提升，空空导弹也逐渐发展为导弹家族中至关重要的一员。导引头是空空导弹的关键组成部分，按照其稳定视线轴的结构划分[1]，主要有俯仰-方位式和滚转-俯仰式（以下简称滚仰式）两种。滚仰式导引头体积小、质量轻，可实现前半球视场的搜索[2-5]，具有较高的空空导弹的搜索和跟踪能力，因此滚仰式框架伺服结构是当今空空导弹导引头稳定平台的理想选择。美国的 AIM-9X 和欧洲的 IRIS-T 空空导弹均采用了滚仰式结构导引头[6-9]。

虽然滚仰式导引头优点颇多，但在工程应用中也存在一定的技术难点[10]。在滚仰式导引头中，图像处理器输出的脱靶量信息是直角坐标形式，而导引头的框架结构是极坐标形式，在由直角坐标脱靶量到极坐标控制指令的解算过程中，滚仰式导引头的滚动和俯仰位置回路指令会产生多值问题，即控制导引头光轴指向目标的角位置指令不唯一。

依据使用的输入量和求解函数的不同，滚仰式导引头角增量求解方法主要分为三种：第一种方法是综合陀螺的角速度信号、探测器的俯仰和方位脱靶量、滚转和俯仰角位置信息，分别使用反正切和反余弦函数求解滚转和俯仰角增量[11]；第二种方法同样是综合陀螺的角速度信号、探测器的俯仰和方位脱靶量、滚转和俯仰角位置信息，使用反正切函数求解滚转和俯仰角增量；第三种方法是综合探测器的俯仰和方位脱靶量、滚转和俯仰角位置信息、弹目距离信息，使用 Paden-Kahan 子问题求解方法获得滚转和俯仰框架的角位置指令，并依据最小角增量准则优化控制指令[12]。上述三种方法中，前两种方法需要的输入信息较多，并且针对具体应用没有提出多解指令优化方法；第三种方法虽然提出了指令优化准则，但是在求解角增量过程中，除了要用到前两种方法中的信息，还需要用到弹目距离信息，在导引头测试和应用中会使得系统复杂和成本上升。

针对上述问题，本文提出了一种新的滚仰式导引头角位置指令提取和优化方法。该方法将滚转框架当前角位置分为 4 个象限，并作为第一级判定条件；将滚转框架的角增量信息作为第二级判定条件。根据两级判定条件所在不同范围，分别采用相应的角增量指令提取和优化策略。

2 滚仰式导引头的结构及其工作原理

2.1 滚仰式导引头结构组成

图 1 为本文采用的滚仰式导引头的结构原理图[13]。该导引头的光学系统采用库德光路，长焦和短焦两路光学系统的可见光 CCD 均安装在滚转框架中；俯仰框架由直流有刷力矩电机驱动，电机和编码器之间通过齿轮啮合传递角位置信息；滚转框架同样由直流有刷力矩电机驱动，滚转框架的电机和编码器均通过内齿轮啮合传递力矩和位置信息，内齿轮与弹体固联。为了减少系统的摩擦力矩，系统在俯仰和滚转框架中均没有采用

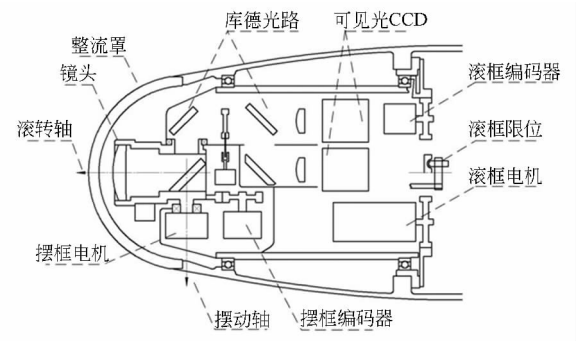


图 1　滚仰式导引头结构图

Fig. 1　Structure of presented roll-pitch seeker

导电滑环传递信号，而是设计了机械限位，从而保证滚转框可以在－360°～＋360°旋转，俯仰框的框架角设计为－90°～＋90°。

2.2　滚仰式导引头工作原理

滚仰式导引头的工作原理如图 2 所示。探测器[14]根据目标位置信息输出脱靶量值，接着结合两框架当前的框架角信息，经坐标变换后得出消除脱靶量所需的框架角指令 θ_{ri} 和 θ_{pi}；然后将框架角指令减去两框架当前框架角，得到导引头控制系统所需角误差信号；最后经过导引头伺服控制回路控制电机使导引头视轴指向目标[15-16]。

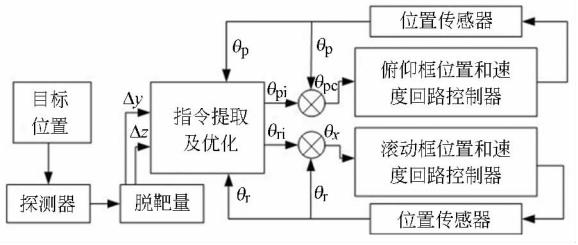


图 2　滚仰式导引头工作原理

Fig. 2　Operation principle of roll-pitch seeker

图 2 中各变量定义如下：Δy 和 Δz 为靶面上的水平和竖直脱靶量，单位是像元数[17]；θ_r 和 θ_p 分别表示滚转框的输入角增量和俯仰框的输入角增量，单位是 rad；θ_{ri} 和 θ_{pi} 分别表示滚转框的角位置增量和俯仰框的角位置增量，单位是 rad；θ_{rc} 和 θ_{pc} 分别表示滚转框和俯仰框的角增量指令，单位是 rad。

3　滚仰式导引头角位置优化策略

3.1　滚仰式导引头角位置指令求解及标定

滚仰式导引头的框架构型是极坐标形式，但是目标经过探测器和图像处理系统后输出的脱靶量是以靶心为原点的直角坐标形式。因此需要根据成像关系推导角增量指令的计算公式。滚仰式导引头的目标成像关系如图 3 所示。

图 3 中，$Y_pO_pZ_p$ 和 $Y_iO_iZ_i$ 分别为物空间和像空间坐标系。以绝对角角位置表示的滚转和俯仰框架的角增量可以用反正切函数表示[18]，如式(1)所示：

$$\begin{cases}\theta_n=\arctan2(\Delta y,\Delta z)\\ \theta_{pi}=\arctan\left(\dfrac{\sqrt{(\Delta z\cdot\mu)^2+(\Delta y\cdot\mu)^2}}{f}\right)\end{cases},\quad(1)$$

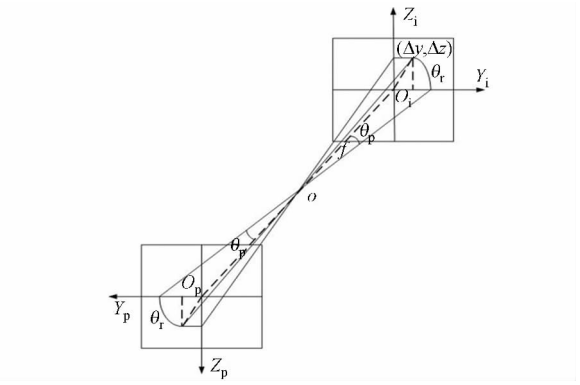


图 3　滚仰式导引头物像关系示意图

Fig. 3　Relationship between target and image for roll-pitch seeker

式中：μ 表示探测器的像元尺寸，单位是 mm；f 表示光学系统的焦距，单位是 mm。

根据式(1)求解出的滚转框和俯仰框的角增量是以各自框架的零位为基准的增量。其中，滚转框角增量范围是 $\theta_{ri}\in[0,2\pi)$，俯仰框的角增量范围是 $\theta_{pi}\in[0,\pi/2]$。

3.2　滚仰式导引头角位置指令优化

根据求解出的角增量范围可知，上述方法解决了位置回路控制指令的多解问题，但是在实际目标跟踪的过程中会产生较大的阶跃输入，造成跟踪精度降低，系统振荡，甚至是目标丢失的现象。因此，需要根据实际情况优化控制器的输入指令。本文对滚转框和俯仰框角增量进行优化后，滚转框角增量范围由$[0,2\pi)$变为$[-\pi/2,\pi/2]$，俯仰角增量范围由$[0,\pi/2]$变为$[-\pi/2,\pi/2]$。

将角位置指令的优化过程分为两级逻辑判断策略，如图 4 所示。第一级逻辑判断条件是滚转框架的当前角位置 θ_r，在$[0,2\pi)$内将 θ_r 定义为 4 个象限，在每个象限内执行第二级优化策略，具体为按照第二级逻辑判断条件进行指令优化，第二级判定以滚转框的角增量限定值为控制原则，即限定滚转框绝对角位置 θ_{ri} 与当前角位置 θ_r 的差值 $\delta\theta_r$。由于滚转框有限位，在第一级判断中，将 θ_r 前 3 个象限定义为区域Ⅰ，第四象限定义为区域Ⅱ。Ⅰ区域第二级判断条件分别为 $\delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]$、$\delta\theta_r\in(\pi/2,3\pi/2]$和其它；Ⅱ区域第二级判断条件分别为 $\delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]$、$\delta\theta_r\in[-3\pi/2,-\pi/2]$和其它。

划定分区后，在Ⅰ、Ⅱ区域不同的 $\delta\theta_r$ 分区中

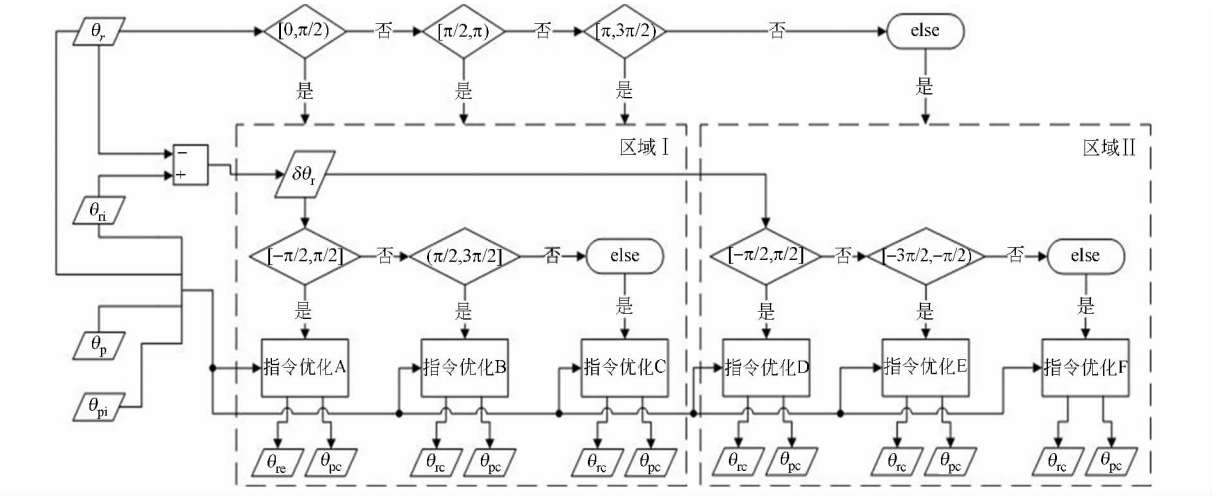


图 4　角位置指令优化策略流程图

Fig. 4　Optimization flow of angular position command

分别采取不同的控制策略。不同区域控制指令优化过程均以保证滚转框架相对运动范围 θ_{rc} 在 $[-\pi/2,\pi/2]$ 内为原则。首先以 $\theta_r\in[0,\pi/2)$ 为例说明Ⅰ区域的优化过程。

若 $\delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]$，则滚转框和俯仰框的角增量指令为：

$$\begin{cases}\theta_{rc}=\theta_{ri}-\theta_r\\ \theta_{pc}=\theta_{pi}-\theta_p\end{cases}. \tag{2}$$

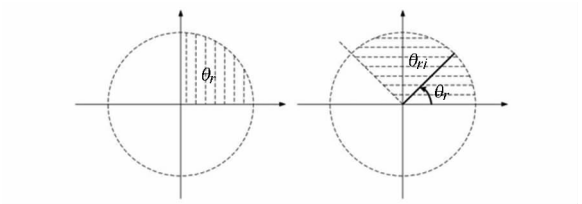
若 $\delta\theta_r\in(\pi/2,3\pi/2]$，则滚转框和俯仰框的角增量指令为

$$\begin{cases}\theta_{rc}=(\theta_{ri}-\pi)-\theta_r=\theta_{ri}-\theta_r-\pi\\ \theta_{pc}=-\theta_{pi}-\theta_p\end{cases}. \tag{3}$$

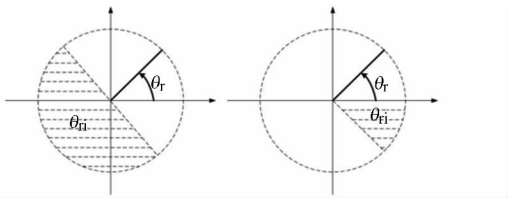
在 $\delta\theta_r$ 取值为其它范围时，滚转框和俯仰框的角增量指令为：

$$\begin{cases}\theta_{rc}=\theta_{ri}-\theta_r-2\pi\\ \theta_{pc}=\theta_{pi}-\theta_p\end{cases}. \tag{4}$$

θ_r 的范围如图 5(a)所示，公式(2)表示的优化过程如图 5(b)所示，公式(3)表示的优化过程如图 5(c)所示，公式(4)表示的优化过程如图 5(d)所示。



(a)　(b)



(c)　(d)

图 5　θ_r 在第一象限时指令优化示意图

Fig. 5　Schematic diagrams of instruction optimization with θ_r in the first quadrant

区域Ⅰ内全部角位置控制优化指令公式如下：

$\theta_r\in[0,\pi/2]$ 时

$$\begin{bmatrix}\theta_{rc}\\ \theta_{pc}\end{bmatrix}=\begin{cases}\boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{ZW}\pi & \delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}-\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in(\pi/2,3\pi/2]\\ \boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}-2\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in\text{else}\end{cases}, \tag{5}$$

其中：系数矩阵为：

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}1&0\\0&-1\end{bmatrix},\boldsymbol{I}=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix},\boldsymbol{Z}=\begin{bmatrix}0&0\\0&0\end{bmatrix},\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}1\\0\end{bmatrix};$$

参数矩阵为：$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}\theta_{ri}\\ \theta_{pi}\end{bmatrix},\boldsymbol{Q}=\begin{bmatrix}\theta_r\\ \theta_p\end{bmatrix}$.

$\theta_r\in[\pi/2,\pi)$ 时，优化过程如图 6 所示，经过优化后如式(6)所示：

$$\begin{bmatrix}\theta_{rc}\\ \theta_{pc}\end{bmatrix}=\begin{cases}\boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{ZW}\pi & \delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}-\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in(\pi/2,3\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in\text{else}\end{cases}. \tag{6}$$

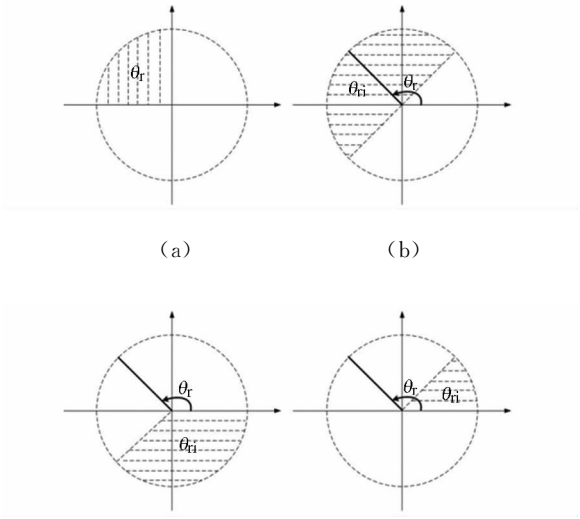


图 6　θ_r 在第二象限时指令优化示意图

Fig. 6　Schematic diagrams of instruction optimization with θ_r in the second quadrant

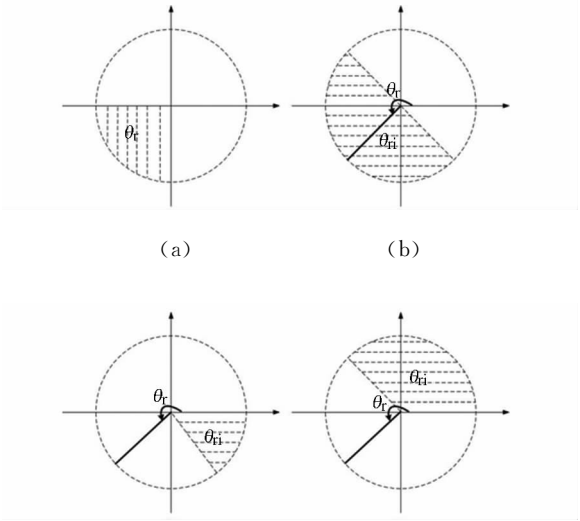


图 7　θ_r 在第三象限时指令优化示意图

Fig. 7　Schematic diagrams of instruction optimization with θ_r in the third quadrant

$\theta_r \in [\pi, 3\pi/2)$**时，优化过程如图 7 所示，优化后如式(7)所示。**

$$\begin{bmatrix}\theta_{rc}\\ \theta_{pc}\end{bmatrix}=\begin{cases}\boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{ZW}\pi & \delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}-\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in(\pi/2,3\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in\text{else}\end{cases},\quad(7)$$

区域Ⅱ的角位置控制策略优化结果如图 8 所示。

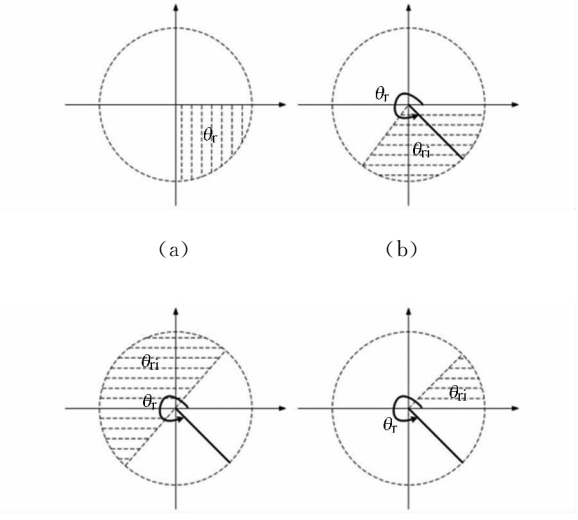


图 8　θ_r 在第四象限时指令优化示意图

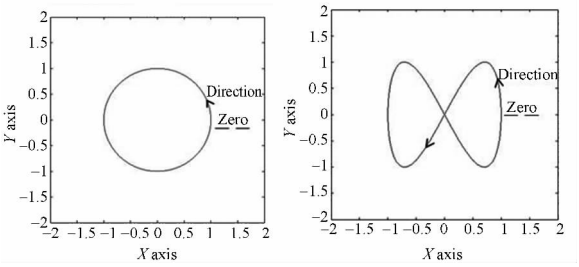
Fig. 8　Schematic diagrams of instruction optimization with θ_r in the fourth quadrant

当 $\theta_r \in [3\pi/2, 2\pi)$**时，有：**

$$\begin{bmatrix}\theta_{rc}\\ \theta_{pc}\end{bmatrix}=\begin{cases}\boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{ZW}\pi & \delta\theta_r\in[-\pi/2,\pi/2]\\ \boldsymbol{MP}-\boldsymbol{IQ}+\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in[-3\pi/2,-\pi/2)\\ \boldsymbol{IP}-\boldsymbol{IQ}+2\boldsymbol{IW}\pi & \delta\theta_r\in\text{else}\end{cases}.\quad(8)$$

4　仿真分析

按照图 2 所示的滚仰式导引头的工作原理，在 Simulink 环境中搭建仿真回路，并将文中提出的角位置指令优化策略添加到仿真系统中对算法进行验证。仿真部分设计了 2 种目标运动方式，如图 9 所示。



(a) **逆时针旋转一周**　(b) **按 8 字逆时针旋转一周**

(a) Counterclockwise rotation　(b) Counterclockwise rotation in manner of "8"

图 9　仿真目标运动方式

Fig. 9　Motion modes for simulation target

图 9(a)表示目标以零位为起点，逆时针方向绕靶面中心旋转一周；图 9(b)表示目标以零位为起点，按图中箭头所示方向以“8”字方式运动一个周期。图中输入为单位像元数，实际仿真时可以根据具体要求，将输出端放大至需要的像元数。2 种运动方式下解算出的滚转框架的输出指令分别如图 10 和图 11 所示。

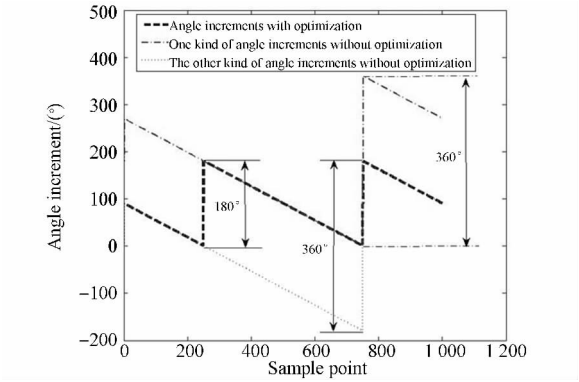


图 10　仿真目标圆周运动时滚框指令对比

Fig. 10　Comparison of angle increments for roll gimbals in circle simulation mode

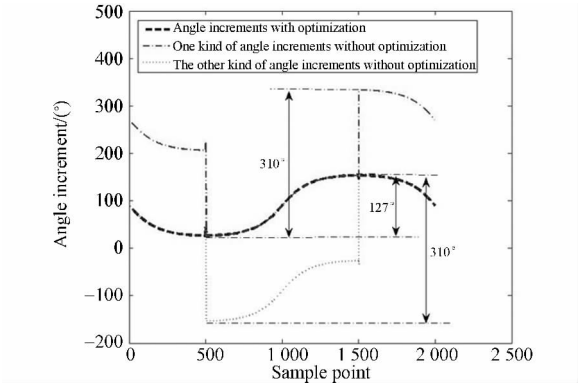


图 11　仿真目标“8”字运动时滚框指令对比

Fig. 11　Comparison of angle increments for roll gimbals in “8” simulation mode

由图 10 和图 11 的对比数据可以看出，未采用角位置指令优化策略之前，滚转框架的位置回路指令阶跃较大，且不唯一，如图中的点划线和短虚线所示；应用优化算法以后，位置指令唯一，阶跃值降低幅度约为 50%，如图中长虚线所示。由仿真分析可知，本文提出的角位置指令优化策略能够有效地减小指令阶跃量。

5　实验验证

仿真分析表明本文提出的策略可有效实现指令优化，但采用该策略能否有效实现目标跟踪还有待验证。为验证上述问题，以所搭建的滚仰式导引头实验系统为研究对象进行了半实物跟踪实验，测试系统的构成如图 12 所示。其中，系统的软件环境为 Matlab 支持的 xPC 实时平台；硬件平台为研华科技的 610L 工控机；在工控机中集成了 Quatech-RS422 串行通讯卡用于采集光电编码器的输出数据，NI-AD/DA6229 用于模数和数模转换；接线箱用于布置线路和安置力矩电机驱动器；转台用于模拟目标，改变目标位置；速度信号由陀螺采集，位置信号由光电编码器采集[19]。

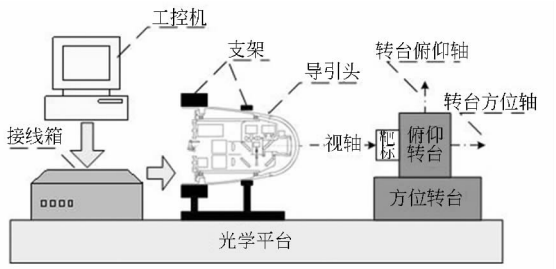
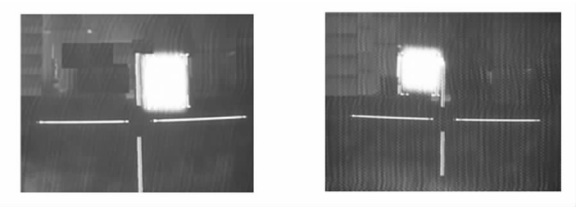


图 12　角增量实验系统

Fig. 12　Angle increment experimental system

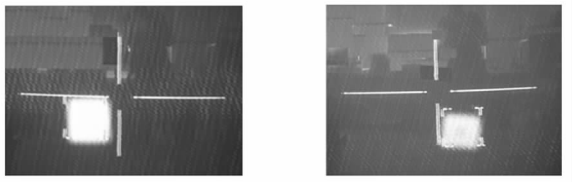
5.1　角增量指令算法静态验证

本文设计了 PID 控制器对导引头进行跟踪控制。以给定脱靶量计算出的滚仰角增量作为系统的位置输入指令。在实验过程中，通过改变目标在空间的位置来测试本文提出的基于角位置指令的提取和优化策略能否跟踪目标。图 13 为目标原始成像位置图，其中图 13(a)、(b)、(c)、(d)分别是目标在第一、二、三、四象限时的成像图。使用文中提出的角增量提取方法生成控制指令引导导引头指向目标，图 14 为导引头执行框架角位置指令后的成像位置图。其中图 14(a)、(b)、(c)、(d)分别为采用本文优化策略后的第一、二、三、四象限成像图。分别进行了 5 组实验，其中误差最大的一组像元数分别为 22 和 14；像元尺寸为 9 μm；光学系统焦距为 90 mm。根据图 3 所示的成像示意图，将脱靶量转化成角度值，采用公式(1)中第 2 式计算得到跟踪误差为 0.149 4°。



(a) 第一象限成像图　(b) 第二象限成像图

(a) Imaging figure in the 1st quadrant　(b) Imaging figure in the 2nd quadrant

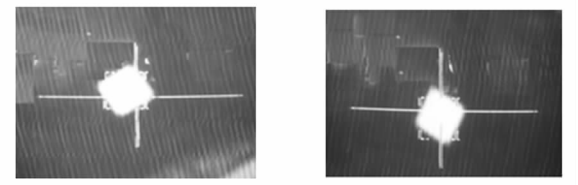


(c) 第三象限成像图　(d) 第四象限成像图

(c) Imaging figure in the 3rd quadrant　(d) Imaging figure in the 4th quadrant

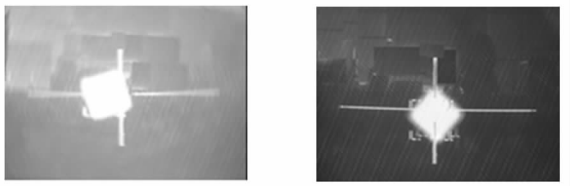
图 13　目标原始成像位置图

Fig. 13　Imaging figures of target original position



(b) 第一象限成像图　(b) 第二象限成像图

(b) Imaging figure in the 1st quadrant　(b) Imaging figure in the 2nd quadrant



(c) 第三象限成像图　(d) 第四象限成像图

(c) Imaging figure in the 3rd quadrant　(d) Imaging figure in the 4th quadrant

图 14　跟踪验证实验成像图

Fig. 14　Imaging figures of tracking experiment

5.2　角增量指令算法动态验证

将图 9 所示目标的运动形式用图 12 中的转台进行模拟，通过动态测试进一步验证角增量提取算法的正确性。其中，圆周运动目标的模拟条件为：俯仰和方位转台执行幅值为 1°，信号是频率为0.5 Hz的正弦信号，二者相位差为 π/2；“8”字运动的模拟条件为：俯仰和方位转台输入均为频率为 0.5 Hz，相位为零的正弦信号，俯仰轴幅值为 1°，方位轴幅值为 0.5°。仿真和测试的指令结果分别如图 15 和图 16 所示。在动态验证过程中验证了算法的时效性，测试伺服系统从目标出现到跟踪目标的响应时间内，目标做圆周运动时的响应为 6 ms，做“8”字运动的响应时间为 7 ms，可知算法时效性较好。

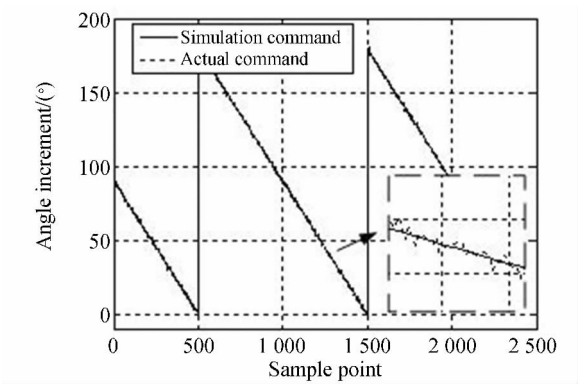


图 15　圆周运动目标滚转指令对比

Fig. 15　Comparison of roll commands for circle motion aarget

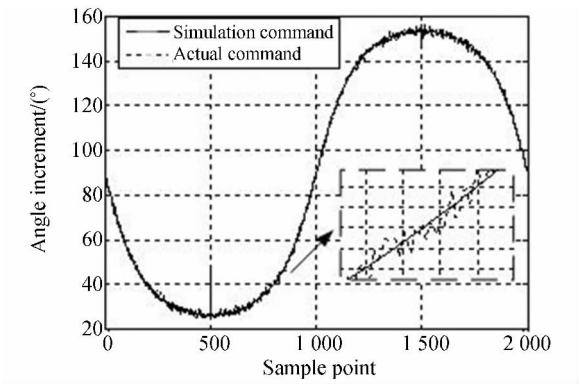


图 16　“8”字运动目标滚转指令对比

Fig. 16　Comparison of roll commands for “8” motion target

由图 15 和图 16 可以看出，实测角增量指令与理论仿真获得的角增量指令保持一致，测试噪声为图像处理器的采样噪声和处理误差。

6　结　论

针对滚仰式导引头光电稳定平台工作工程中

的角位置指令提取问题提出了一种优化控制策略。首先介绍了滚仰式导引头的工作原理，然后阐明了滚仰式导引头工作中存在的角增量指令多解等问题，并提出了优化控制策略。最后，跟踪实验结果表明，采用本文优化角位置控制策略后，滚转框的角增量范围可控制在$[-\pi/2, \pi/2]$内，y轴和z轴最大失调角均可控制在0.15°以内，实验验证了本控制策略有效性和可行性。

参考文献：

[1] 刘廷霞，王伟国，陈健. 车载惯性平台稳定位置解算算法 [J]. 中国光学，2012，5(5)：537-543.
LIU T X, WANG W G, CHEN J. Position arithmetic for a vehicular inertial stabilized platform [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 537-543. (in Chinese)

[2] 肖仁鑫，张聘义，胡海双，等. 滚俯仰式红外导引头稳定平台控制与仿真[J]. 红外与激光工程，2007，36(增刊)：363-365.
XIAO R X, ZHANG P Y, HU H SH, *et al*.. Control and simulation of roll-pitch infrared seeker's stabilization platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(*Supp.*): 363-365. (in Chinese)

[3] UÇAR A, ÖZKAN B. Evaluation of the effects of some remarkable internal and external factors on an infrared seeker[C]. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling and Testing XX* Ⅲ, 2012, 8355, 83551K.

[4] HARTMANN U, SNARTZ J, GOSEBERG H. Seeker for target-tracking missiles, US: 6978965 [P]. 2005.

[5] RUDIN T R. Strapdown stabilization for imaging seekers [C]. *2nd Annual AIAA SDIU Interceptor Technology Conference, June* 6-9, 1993, *Albuquerque, NM*.

[6] 王锐. 激光红外主被动复合导引系统[J]. 中国光学，2013，6(4)：536-543.
WANG R. Compound guided system with active laser imaging and passive infrared imaging [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 536-543. (in Chinese)

[7] YANG C L, ZHANG N, JIA H G. LOS rate reconstruction and application of roll-pitch seeker [C]. *IEEE International Conference on Electrical and Control Engineering*, 2011: 2307-2310.

[8] TIMOTHY A, ONTARIO A, PAGAN M, Jr. Chino Advanced seeker with large look angle, U S: 5279479 [P]. 1994.

[9] 房建成，戚自辉，钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法[J]. 中国惯性技术学报，2010，18(1)：38-43.
FANG J CH, QI Z H, ZHONG M Y. Feedforward compensation method for three axes inertially stabilized platform imbalance torque [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010, 18(1): 38-43. (in Chinese)

[10] JIANG H H, JIA H G, WEI Q. Analysis of zenith pass problem in a roll-pitch optics seeker [C]. 2011 *International Conference on Electronics and Optoelectronics*(*ICEOE*), 2011, (1): 72-74.

[11] 林德福，王志伟，王江. 滚-仰式导引头奇异性分析与控制[J]. 北京理工大学学报，2010，30(11)：1265-1269.
LIN D F, WANG ZH W, WANG J. Singularity analysis of roll-pitch seeker and its control strategy [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(11): 1265-1269. (in Chinese)

[12] 朱明超，贾宏光. 基于 Paden-Kahan 子问题求解滚仰式导引头角增量[J]. 光学 精密工程，2011，19(8)：1838-1844.
ZHU M CH, JIA H G. Solution of angle increments for roll-pitch seekers based on Paden-Kahan sub-problems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1838-1844. (in Chinese)

[13] 魏群，艾兴乔，贾宏光. 小型可见光双视场光学系统的研制[J]. 光学 精密工程，2012，20(4)：739-744.
WEI Q, AI X Q, JIA H G. Development of small-scale and dual-field visible light optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 739-744.

[14] 沈宏海，黄猛，李嘉全，等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析 [J]. 中国光学，2012，5(1)：20-28.
SHEN H H, HUANG M, LI J Q, *et. al*. Recent progress in aerial electro-optic payloads and their key techndogies [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):

20-28. (in Chinese)

[15] 陈雨，赵剡，张同贺，等. 滚仰式捷联导引头跟踪原理与仿真[J]. 航空兵器，2010，5：55-64.
CHEN Y，ZHAO Y，ZHANG T H，*et al*.. Tracking principle and simulation for roll-pitch strap-down seeker [J]. *Aero Weaponry*，2010，5：55-64. (in Chinese)

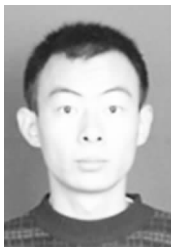
[16] 王志伟，祁载康，王江. 滚-仰式导引头跟踪原理[J]. 红外与激光工程，2008，37(2)：274-277.
WANG ZH W，QI Z K，WANG J. Tracking principle for roll-pitch seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2008，37(2)：274-277. (in Chinese)

[17] JIANG H H，JIA H G，WEI Q. Analysis of zenith pass problem and tracking strategy design for roll-pitch seeker [J]. *Aerospace Science and Technology*，2012，23：345-351.

[18] 姜湖海. 滚仰式导引头过顶跟踪控制策略研究[D]. 北京：中国科学院大学，2012.
JANG H H. *Research on Strategy for Target Tracking in Zenith Zone of the Roll-Pitch Seeker* [D]. Beijing：Graduate University of the Chinese Academy of Sciences，2012. (in Chinese)

[19] 孙树红，赵长海，万秋华，等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. 中国光学，2013，6(4)：600-606.
SUN SH H，ZHAO CH H，WAN Q H，*et al*.. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder[J]. *Chinese Optics*，2013，6(4)：600-606.

作者简介：



吴海龙(1988－)，男，山东济南人，博士研究生，2011 年于中国石油大学(华东)获得工学学士学位，主要从事控制系统设计方面研究。E-mail：wuhailong.2001@163.com

导师简介：



贾宏光(1971－)，男，黑龙江五常人，研究员，博士生导师，2000 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事光机电系统微小型化与精确制导技术研究。E-mail：jiahg@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑：马　健)

(版权所有　未经许可　不得转载)