

文章编号 1004-924X(2011) 08-1838-07

基于 Paden-Kahan 子问题求解 滚仰式导引头角增量

朱明超*, 贾宏光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 根据滚转俯仰双框架导引头的结构特点, 对框架进行了运动学分析。基于 Paden-Kahan 子问题, 给出了封闭形式的滚仰角增量求解算法。通过将导引头的滚仰角增量求解分解为两个规范的 Paden-Kahan 子问题使运动学逆解由两个简单的刚体运动组成, 从而简化了滚仰角增量求解的复杂度。为避免运动学逆解不唯一, 应用最小角增量准则对运动学逆解进行了优化。数值仿真显示, 求解的角增量使光轴指向误差为零, 保证了光轴与视线的重合。最后, 采用角增量求解算法对圆周轨迹目标进行半实物跟踪实验, 结果表明, 提出的逆运动学算法可以有效求解滚仰式导引头滚仰角增量, 实现目标闭环跟踪。

关键词: 滚仰式导引头; 角增量求解; Paden-Kahan 子问题; 逆运动学

中图分类号: T J765.331; TP273 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20111908.1838

Solution of angle increments for roll-pitch seekers based on Paden-Kahan sub-problems

ZHU Ming-chao*, JIA Hong-guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese
Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhumingchao1980@yahoo.com.cn

Abstract: The kinematic representation of a roll-pitch seeker was analyzed according to the special structure of the seeker. A geometrical closed-form angle increment solution was proposed based on the Paden-Kahan sub-problems. Using this method, the angle increment solution of the seeker was decomposed into two canonical Paden-Kahan subproblems, which led the solution of inverse kinematics to be two simple rigid motions. Therefore, the complexity of the inverse kinematics problem was reduced. Because the inverse kinematics of the seeker has not an exclusive solution, the minimum angle increment criteria was introduced to optimize the inverse kinematics problem. The numerical simulation shows that the obtained angle increment allows the pointing error of an optical axis into zero, and the optical axis can be coincident with the line of sight very well. Finally, the semi-physics tracking experiments using the angle increment algorithm for a circle track target were performed, which dem-

收稿日期: 2011-01-07; 修订日期: 2011-03-18.

基金项目: 中国科学院 三期创新 平台资助项目

onstrates the effectiveness of the proposed inverse kinematics in solving the roll-pitch angle increment.

Key words: roll-pitch seeker; solution of angle increment; Paden-Kahan sub-problem; inverse kinematics

1 引言

滚仰式导引头是新一代近距离格斗空空导弹的重要组成部分, 其功能是在高机动和大离轴角的情况下完成对目标的自主搜索、识别、跟踪与测量^[1]。在末制导阶段, 其性能的好坏直接影响脱靶量和目标打击概率^[2-3]。在导引头跟踪目标的过程中, 图像跟踪器实时给出在光轴坐标系下描述的失调角。为实现可靠、高精度的目标跟踪, 必须将失调角和当前滚仰角解算为滚仰角增量指令, 完成滚转和俯仰跟踪回路的闭环^[4]。

由于结构特殊, 滚仰式导引头对应的探测器光轴运动方式是以弹体纵轴为轴线的空间圆锥运动, 因此, 像点在像平面上按照极坐标描述。采用这种结构形式, 滚转和俯仰回路会产生指令多值问题^[5]。传统的角增量解算方法采用运动学关系分别计算光轴和视线方向单位矢量在弹体坐标系的投影, 由两矢量的恒等关系求解出滚仰角指令^[6], 进而计算滚仰角增量。这种方法通常只能求解出解空间中的一个解, 在跟踪过程中会出现数值解频繁在不同解之间跳动的问题, 导致目标丢失。为解决这个问题, 控制系统的指令生成部分需要采用复杂的逻辑判断和指令优化。最近几年, 基于李群、李代数的指数积公式描述机构运动学的方法得到了极大的关注, 并在串行机器人、并行机器人、仿人机器人和灵巧手操作的运动学分析方面得到了广泛的应用^[7-9]。利用指数积公式建立的机构运动学模型, 其逆解通常采用 Paden-Kahan 子问题求解, 将逆运动学问题分解为若干个 Paden-Kahan 子问题可以简化求解过程^[10]。

本文采用指数积公式分析了滚仰式导引头的运动学关系, 将求解光轴与视线重合的逆运动学问题分解为 Paden-Kahan 子问题, 求解相应的 Paden-Kahan 子问题来得到所有的运动学逆解。为避免数值解在解空间中频繁跳动的问题, 采用最小增量角准则对运动学逆解进行优化, 给出平滑连续的角增量指令。

2 运动学分析

导引头的运动学关系可以考虑为由滚转轴和俯仰轴组成的开运动学链。在滚转俯仰轴线相交点建立如图 1 所示的 5 个坐标系。其中, $o-x_0y_0z_0$ 为弹体坐标系; $o-x_1y_1z_1$ 为滚转坐标系, 与滚转轴固联, ox_1 轴与滚转轴重合, θ_1 为滚转角; $o-x_2y_2z_2$ 为俯仰坐标系(光轴坐标系), 与俯仰轴固联, oz_2 轴与俯仰轴重合, ox_2 轴与光轴重合, θ_2 为俯仰角。跟踪过程中, 光轴坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 的指向和视线之间存在失调角 e_y 和 e_z , 将 $o-x_2y_2z_2$ 绕 oy_2 旋转 e_y 形成坐标系 $o-x_3y_3z_3$, $o-x_3y_3z_3$ 绕 oz_3 旋转 e_z 形成坐标系 $o-x_4y_4z_4$ (视线坐标系)。 $o-x_4$ 的指向即为视线方向。

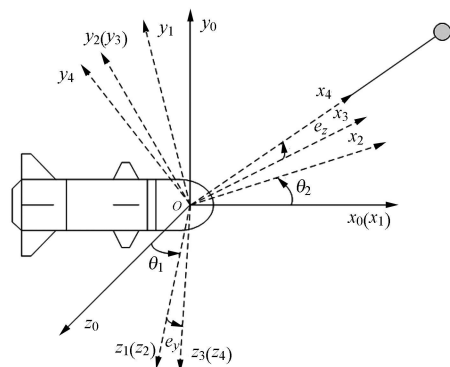


图 1 框架坐标系

Fig. 1 Coordinate system for gimbal

由图 1 建立的坐标系可知, 坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 相对于坐标系 $o-x_0y_0z_0$ 的姿态可以描述为

$$R_{0,1}(\theta_1) = R_{0,1}(0)e^{\hat{e}_1\theta_1}, \quad (1)$$

坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 相对于坐标系 $o-x_1y_1z_1$ 的姿态可以描述为

$$R_{1,2}(\theta_2) = R_{1,2}(0)e^{\hat{e}_2\theta_2}, \quad (2)$$

坐标系 $o-x_3y_3z_3$ 相对于坐标系 $o-x_2y_2z_2$ 的姿态可以描述为

$$R_{2,3}(e_y) = R_{2,3}(0) e^{\hat{3}e_y}, \quad (3)$$

坐标系 $\sigma\text{-}x_4y_4z_4$ 相对于坐标系 $\sigma\text{-}x_3y_3z_3$ 的姿态可以描述为

$$R_{3,4}(e_z) = R_{3,4}(0) e^{\hat{4}e_z}, \quad (4)$$

其中, $R_{i-1,i}(0) \in SO(3) (i=1, 2, 3, 4)$ 表示在零位状态下 ($\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0, e_y = 0, e_z = 0$) 坐标系 $\sigma\text{-}x_iy_iz_i$ 相对于坐标系 $\sigma\text{-}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ 的姿态; $\hat{w}_i \in SO(3) (i=1, 2, 3, 4)$ 为 $SO(3)$ 的李代数, 定义为

$$\hat{w}_i = \begin{bmatrix} 0 & -\dot{z}_i & \dot{y}_i \\ \dot{z}_i & 0 & -\dot{x}_i \\ -\dot{y}_i & \dot{x}_i & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$\dot{w}_i = [\dot{w}_{ix}, \dot{w}_{iy}, \dot{w}_{iz}]^T$ 为描述在坐标系 $\sigma\text{-}x_iy_iz_i$ 的旋转轴单位矢量。

由式(1)-(4)可得光轴坐标系和视线坐标系相对于弹体坐标系的姿态

$$R_{0,2}(\alpha_1, \alpha_2) = R_{0,1}(0) e^{\hat{1}\alpha_1} R_{1,2}(0) e^{\hat{2}\alpha_2}, \quad (6)$$

$$R_{0,4}(\alpha_1, \alpha_2, e_y, e_z) = R_{0,2}(\alpha_1, \alpha_2) R_{2,3}(0) e^{\hat{3}e_y} R_{3,4}(0) e^{\hat{4}e_z}. \quad (7)$$

3 滚仰角增量求解算法

3.1 Paden-Kahan 子问题 1 绕单轴旋转

设 ξ 为一零节距轴线, $p, q \in R^3$ 为空间两点, 求旋转角 θ_1 使其满足

$$e^{\hat{\xi}\theta_1} p = q, \quad (8)$$

假设 r 为旋转轴 ξ 上的一点, 定义 $u = p - r$ 为从 r 到 p 的矢量, $v = q - r$ 为从 r 到 q 的矢量, 如图 2 所示。

由恒等式 $e^{\hat{\xi}\theta} r = r$ 可得

$$e^{\hat{\xi}\theta} u = v, \quad (9)$$

其中, $\hat{\xi}$ 为轴线 ξ 方向的单位矢量。

定义 u 和 v 分别为矢量 u 和 v 在与轴线垂直平面的投影。由几何关系可得

$$u = u - \xi \xi^T u, \quad (10)$$

$$v = v - \xi \xi^T v, \quad (11)$$

式(9)有解的充要条件为

$$\xi^T u = \xi^T v, \quad (12)$$

$$u = v. \quad (13)$$

当满足上述关系时, 可得

$$\|u - v\| = \sin \theta \|u + v\|, \quad (14)$$

$$\|u + v\| = \cos \theta \|u - v\|, \quad (15)$$

$$\theta = \arctan 2(\xi^T (u - v), u^T v). \quad (16)$$

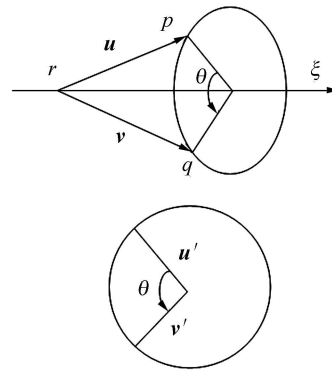


图 2 子问题 1

Fig. 2 Subproblem 1

3.2 Paden-Kahan 子问题 2 绕双轴旋转

设 ξ_1 和 ξ_2 为相交于一点的两条零节距轴线, $p, q \in R^3$ 为空间两点, 求旋转角 θ_1 和 θ_2 , 使其满足

$$e^{\hat{\xi}_1\theta_1} e^{\hat{\xi}_2\theta_2} p = q, \quad (17)$$

子问题 2 相当于空间点 p 先绕轴线 ξ_2 旋转 θ_2 , 再绕轴线 ξ_1 旋转 θ_1 , 与空间点 q 重合, 如图 3 所示。

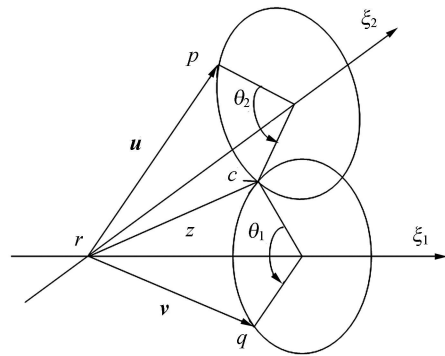


图 3 子问题 2

Fig. 3 Subproblem 2

当轴线 ξ_1 和 ξ_2 重合时, 子问题 2 退化为子问题 1, 如果 θ 为子问题 1 的解, 则满足 $\theta_1 + \theta_2 = \theta$ 的任意 θ_1 和 θ_2 均为子问题 2 的解。

假设两轴线不重合, r 为两轴交点, 空间中存在一点 c , 满足

$$e^{\hat{\xi}_2\theta_2} p = c, \quad (18)$$

$$e^{\hat{\xi}_1\theta_1} q = c, \quad (19)$$

式(18)和(19)可以描述为向量形式

$$e^{\hat{\xi}_2\theta_2} (p - r) = c - r, \quad (20)$$

$$e^{\hat{\xi}_1\theta_1} (q - r) = c - r, \quad (21)$$

定义向量 $u = p - r, v = q - r, z = c - r$, θ_1 和 θ_2 分

别为 \mathbf{u}_1 和 \mathbf{u}_2 方向的单位矢量。

式(20)和(21)可以描述为

$$\hat{e}^{2,2} \mathbf{u} = \mathbf{z}, \tag{22}$$

$$\hat{e}^{-1,1} \mathbf{v} = \mathbf{z}, \tag{23}$$

即向量满足

$$\mathbf{u}^T \mathbf{z} = \mathbf{z}^T \mathbf{z}, \tag{24}$$

$$\mathbf{v}^T \mathbf{z} = \mathbf{z}^T \mathbf{z}, \tag{25}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{z} = \mathbf{v}, \tag{26}$$

由于 $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ 和 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 线性独立, 可得

$$\mathbf{z} = \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 = (\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2), \tag{27}$$

$$\mathbf{z}^T \mathbf{z} = \mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2^T \mathbf{u}_2 + 2 \mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2 = \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2^T \mathbf{v}_2 + 2 \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2. \tag{28}$$

将式(27)代入式(24)和(25), 可得

$$\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2^T \mathbf{u}_2 = \mathbf{z}^T \mathbf{z}, \tag{29}$$

$$\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2^T \mathbf{v}_2 = \mathbf{z}^T \mathbf{z}, \tag{30}$$

$$= \frac{(\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2)}{(\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2)^2 - 1} \mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2 - \frac{\mathbf{u}_1^T \mathbf{v}_1}{(\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2)^2 - 1}, \tag{31}$$

$$= \frac{(\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2)}{(\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2)^2 - 1} \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2 - \frac{\mathbf{v}_1^T \mathbf{u}_1}{(\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2)^2 - 1}, \tag{32}$$

求解式(28)可得

$$\mathbf{z} = \frac{\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1^T \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_1^T \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2}{\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_2 - \mathbf{u}_1^T \mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_1^T \mathbf{u}_1 + \mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_2}. \tag{33}$$

由式(27)可解得 \mathbf{z} , 进而可以求解 \mathbf{c} 。

应用子问题 1 可以求解 \mathbf{u}_1 和 \mathbf{u}_2

$$\hat{e}^{2,2} \mathbf{p} = \mathbf{c}, \tag{34}$$

$$\hat{e}^{-1,1} \mathbf{q} = \mathbf{c}. \tag{35}$$

3.3 角增量求解步骤

使用 Paden-Kahan 子问题求解滚仰角增量的过程为:

(1) 计算框架运动学关系 $R_{0,1}(\theta_1) =$

$$R_{0,1}(0) \hat{e}^{1,1}, R_{0,2}(\theta_1, \theta_2) = R_{0,1}(0) \hat{e}^{1,1} R_{1,2}(0) \hat{e}^{2,2};$$

(2) 计算弹体坐标系下的旋转轴线单位矢量 \mathbf{u}_1

$$= R_{0,1}(0) \hat{e}^{1,1} \mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2 = R_{0,1}(0) \hat{e}^{1,1} R_{1,2}(0) \hat{e}^{2,2} \mathbf{u}_2;$$

(3) 计算弹体坐标系下的光轴方向单位矢量

$$\mathbf{u} = R_{0,2}(\theta_1, \theta_2) [1, 0, 0]^T;$$

(4) 由当前滚仰角和失调角计算弹体系下的

$$\text{视线方向单位矢量 } \mathbf{v} = R_{0,4}(\theta_1, \theta_2, e_y, e_z)$$

$$[1, 0, 0]^T;$$

(5) 由 Paden-Kahan 子问题 2 求解滚仰角增

量 θ_1 和 θ_2 ;

(6) 选择满足 $|\theta_1| + |\theta_2|$ 最小的解作为最优解。

4 数值仿真

对图 1 所示滚仰导引头的运动学关系进行数值仿真。仿真步骤如下:

(1) 随机选取滚仰式导引头当前滚仰角 θ_1, θ_2 和跟踪器失调角 e_y, e_z ;

(2) 计算视线方向单位矢量在弹体系的投影 $\mathbf{p}_1 = R_{0,4}(\theta_1, \theta_2, e_y, e_z) [1, 0, 0]^T$;

(3) 计算滚仰角增量 θ_1 和 θ_2 ;

(4) 计算导引头期望滚仰角 $\theta_1 + \theta_1$ 和 $\theta_2 + \theta_2$;

(5) 计算光轴方向单位矢量在弹体系的投影 $\mathbf{p}_v = R_{0,2}(\theta_1 + \theta_1, \theta_2 + \theta_2) [1, 0, 0]^T$;

(6) 比较 \mathbf{p}_1 和 \mathbf{p}_v , 若误差 $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_v$ 为零, 则算法有效。

按照上述步骤, 随机选取 3 组实验数据, 计算结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results (rad)

	数据 1	数据 2	数据 3
θ_1	0.421 8	0.655 7	0.678 7
θ_2	0.915 7	0.035 7	0.757 7
e_y	0.039 6	0.042 5	0.037 2
e_z	0.048 0	0.046 7	0.019 6
$\theta_1 + \theta_1$	-0.048 2	-0.475 8	-0.052 9
$\theta_2 + \theta_2$	0.048 6	0.057 0	0.020 3
$\theta_1 + \theta_1$	0.373 6	0.180 0	0.625 8
$\theta_2 + \theta_2$	0.964 3	0.092 7	0.778 1
$\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_v$	0	0	0

仿真结果表明, 3 组随机数据计算出的 $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_v$ 均为 0, 求解出的滚仰角增量指令可以保证光轴与视线重合。

5 半实物跟踪实验

为验证算法的有效性, 采用基于模型的控制系统设计方法^[11]进行如图 4 所示的半实物跟踪实验。实验系统由工控机, 串行通讯卡, DAQ 数据采集卡, 力矩电机驱动器以及滚仰式导引头实验平台组成。其中, 导引头实验平台的滚转回路和俯仰回路由力矩电机驱动, 滚转和俯仰角分别

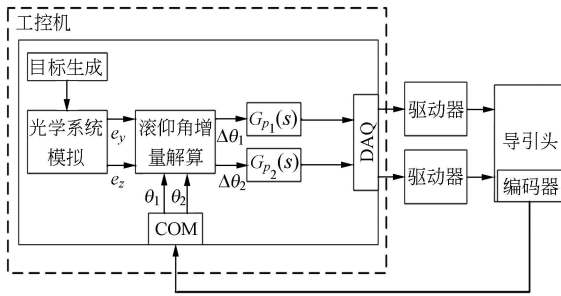
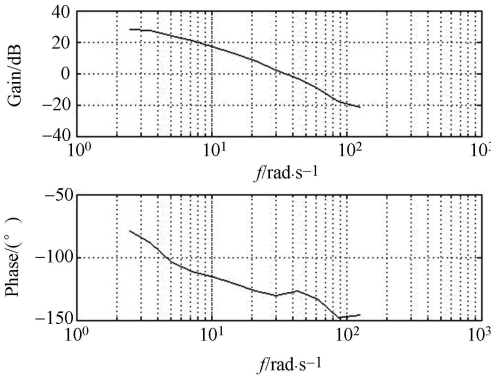


图 4 跟踪实验框图

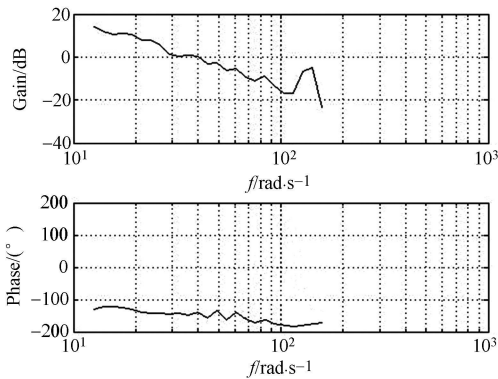
Fig. 4 Diagram for tracking experiment

由 16 位准绝对式编码器测量。忽略两个回路之间的耦合, 实测滚转回路和俯仰回路由驱动器输入到位置输出的频率响应曲线如图 5 所示。



(a) 滚转回路

(a) Rolling circuit



(b) 俯仰回路

(b) Pitching circuit

图 5 频率响应曲线

Fig. 5 Bode diagrams of frequency responses

工控机模拟光学和图像处理系统先由弹目相对运动计算探测器失调角 e_y 和 e_z 。不失一般性, 假设弹体坐标系与惯性坐标系重合, 目标在惯

性坐标系的坐标为 $[x_m, y_m, z_m]^T$, 则弹目视线向量在惯性坐标系下可以描述为

$$p = [x_m, y_m, z_m]^T, \quad (36)$$

将视线向量 p 投影至光轴坐标系 $o-x_2y_2z_2$, 可在光轴坐标系下描述的弹目视线向量为

$$p_m = \begin{bmatrix} p_{mx} \\ p_{my} \\ p_{mz} \end{bmatrix} = R_{0,2}^{-1}(1, 2)p. \quad (37)$$

探测器失调角 e_y 和 e_z (如图 6 所示) 可以描述为

$$e_y = -\arctan\left(\frac{p_{mz}}{p_{mx}}\right), \quad (38)$$

$$e_z = \arctan\left(\frac{p_{my}}{\sqrt{p_{mx}^2 + p_{mz}^2}}\right). \quad (39)$$

综合失调角 e_y, e_z 和滚仰角 θ_1, θ_2 , 由前述滚仰角增量求解步骤, 可以计算最优滚仰角增量 θ_1 和 θ_2 。

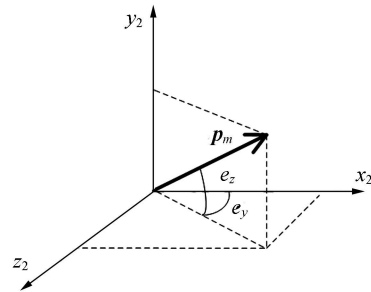


图 6 探测器失调角

Fig. 6 Boresight error

为简化实验设计, 伺服系统设计过程中省略了速度回路, 仅采用位置闭环。滚仰角增量 θ_1 和 θ_2 分别经位置回路控制器计算控制指令, 滚转回路和俯仰回路控制器传递函数分别为

$$G_{p1}(s) = 0.57 + \frac{0.9}{s} + \frac{0.02s}{0.0025s + 1}, \quad (40)$$

$$G_{p2}(s) = 13.3 + \frac{0.33}{s} + \frac{0.0667s}{0.0017s + 1}. \quad (41)$$

DAQ 将控制指令转换为模拟电压加载到力矩电机驱动器(控制周期为 1 ms), 力矩电机驱动器工作在力矩控制模式, 跨导为 0.6 A/V, 驱动导引头实验平台产生滚仰角 θ_1 和 θ_2 。工控机经由 422 串行通讯卡采集导引头位置传感器数据, 获取滚仰角 θ_1 和 θ_2 形成位置闭环。假设目标在惯性空间的运动为

$$x_m(t) = 1000, \quad (42)$$

$$y_m(t) = 200\sin(0.628t), \quad (43)$$

$$z_m(t) = 200\cos(0.628t), \quad (44)$$

其轨迹为与弹轴垂直的平面内的圆周。跟踪结果

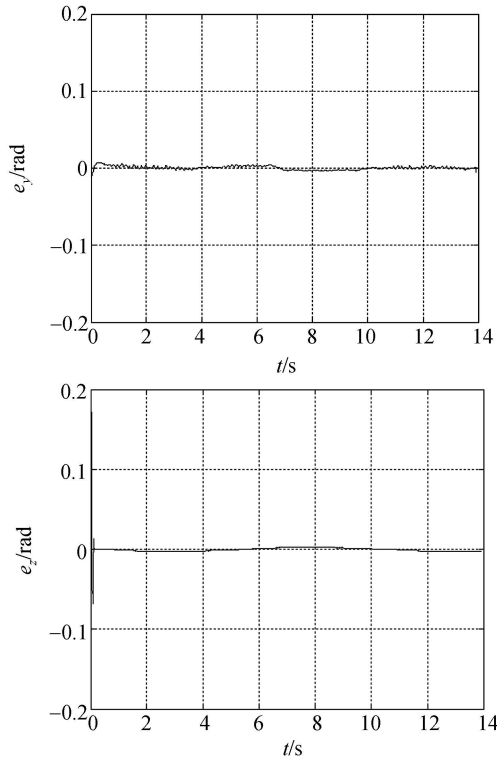


图 7 跟踪实验结果

Fig. 7 Results of tracking experiment

如图所示, 由图 7 可知, 在 100 ms 左右, 导引头实现对目标的跟踪。稳定跟踪后光轴坐标系 y 和 z 方向的最大失调角分别为 0.005 6 rad 和 0.002 2 rad。实验结果表明, 提出的角增量求解方法可以有效实现目标的闭环跟踪。

6 结 论

提出一种基于 Paden-Kahan 子问题的滚仰式导引头滚仰角增量求解算法。采用指数积公式分析了滚仰导引头的运动学关系, 将求解光轴与视线重合的逆运动学问题分解为 Paden-Kahan 子问题, 从而得到所有的运动学逆解。为避免数值解在解空间中的多值问题, 采用最小增量角准则对滚仰角增量进行优化。数值仿真结果表明, 求解的角增量使光轴指向误差为 0, 即可以保证光轴与视线重合。对圆周轨迹目标进行半实物闭环跟踪实验, 光轴坐标系 y 和 z 方向的最大失调角分别为 0.005 6 和 0.002 2 rad。实验结果验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] 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 Z W, QI Z K, WANG J. Tracking principle for roll-pitch seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 274-277. (in Chinese)
- [2] JACQUES W. Line-of-sight rate estimation and linearizing control of an imaging seeker in a tactical missile guided by proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2002, 10(4): 556-567.
- [3] SMITA S, GHOSHAL T K. Sight line rate estimation in missile seeker using disturbance observer-based technique[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2011, 19(2): 449-454.
- [4] 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 a-
- analysis of roll-pitch seeker and its control strategy [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(11): 1265-1269. (in Chinese)
- [5] 董小萌, 张平. 极坐标红外成像导引头平台的跟踪指令优化[C]. 中国制导、导航与控制学术会议, 上海, 2010: 387-390.
DONG X M, ZHANG P. Tracking command optimization of polar coordinate frame gimbal for infrared imaging guidance[C]. *Proceedings of the Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, shanghai, 2010: 387-390. (in Chinese)
- [6] PETER H. *Modeling and simulation of aerospace vehicle dynamics[M]*. AIAA, 2007.
- [7] MURRAY R M, LI Z X, SASTRY S S. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation[M]*. CRC, 1994.
- [8] CHEN I, YANG G, TAN C, et al.. Local POE model for robot kinematic calibration [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2001, 36(11-12): 1215-1239.

- [9] GAO Y, CHEN W H, LU Z. Kinematics analysis and experiment of a cockroach-like robot[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2011, 16(1): 71-77.
- [10] 钱东海, 王新峰, 赵伟, 等. 基于旋量理论和 Paden-Kahan 子问题的 6 自由度机器人逆解算法 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(9): 72-81.
QIAN D H, WANG X F, ZHAO W, *et al.*. Algorithm for the inverse kinematics calculation of 6-DOF robots based on screw theory and Paden-Kahan subproblems[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(9): 72-81. (in Chinese)
- [11] 朱华征, 范大鹏, 马东玺, 等. 导引头伺服系统隔离度与测试[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1993-1998.
ZHU H ZH, FAN D P, MA D X, *et al.*. Disturbance isolation index of seeker servo system and its test[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1993-1998. (in Chinese)

作者简介:



朱明超(1980-), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事导引头运动学、动力学与控制方面的研究。
Email: zhumingchao1980 @ yahoo.com.cn



贾宏光(1971-), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事精确制导控制技术、微机电一体化技术方面的研究。Email: jiahg@ciomp.ac.cn

下期预告

基于压电偏转系统的卫星平台振动补偿方法

韩诚山, 李祥之, 文明, 赵庆磊, 姜肖楠

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

针对卫星平台振动严重影响空间光通信跟瞄精度的问题, 提出了基于压电偏转控制系统的扰动补偿方案, 建立了压电偏转系统的数学模型, 设计了基于改进型 LMS 滤波算法的自适应控制器, 分析了最优步长选择的影响因素, 并针对输入信号的相位延迟问题, 设计了自适应延迟滤波器, 不仅有效地补偿了相位延迟, 还可通过自适应调节输入信号相位, 在不增加步长的前提下提高了收敛速率。最后进行了实验验证, 结果表明补偿后的残余误差仅为 rad 量级, 补偿因子达 85% 以上, 验证了补偿算法的有效性和可行性。