

一种目标空间位置高精度算法的研究 与嵌入式系统实现*

龙鹏翼^{1,2}, 王绪安¹

(1 中国兵器工业第 203 研究所, 西安 710065; 2 西安交通大学软件学院, 西安 710049)

[摘要] 要实现对价值点目标的精确打击, 必须解决空间无人飞行器和欲攻击的点目标实时交会对准问题。激光制导是通过在寻的器追踪平台上安放激光探测器, 在平台外部安放合作目标与被攻击目标建立了解算联系。利用四象限激光探测器作为目标位置传感器, 对其特性、工作原理、解算理论做了深入分析, 对于经典的和差比幅归一化算法, 将隐含的算法误差数学函数关系显式化, 得到解算误差曲线和规律, 提出了分区间采用不同的解算规律——尤其是对相对误差较大, 严重影响制导精度的区域采用查表算法以提高解算精度的工程化实现策略。具有很好的应用价值。

[关键词] 激光制导; 四象限探测器; 归一化; 查表算法; 嵌入式系统

[中图分类号] TJ765.3 [文献标识码] A

The Research and Engineering Realization for a Certain High Precision Arithmetic of the Target Space Position

LONG Peng-yi^{1,2}, WANG Xu-an¹

(1 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China;

2 College of Software, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To fulfill the task of precisely attacking valuepoint target, pointing problem between the space pilotless vehicle and point target must be solved. Laser guidance is a way to place the laser detector in the tracker and the cooperative device out of the tracker simultaneously to keep in touch with the target to be attacked for calculation. A four-quadrant (4Q) laser detector is used as the position sensitive detector (PSD) in a sensor, a profound study of detector's characteristic, the operational principle and the calculation theory is provided. The error curve and rule is gained by making the implied arithmetic error function unfolded for the classical normalization arithmetic of sum-difference divided by amplitude. Different arithmetic rule is put forward for different district—especially for the big relative error and guidance precision infected seriously, an inquiring arithmetic is presented in order to improve the guidance precision. It has a good value for application.

Key words: laser guidance; four-quadrant detector; normalization; inquiring arithmetic; embedded system

1 引言

目标空间位置解算是用光电系统求算目标相对于空间某参考点的方向和偏离角度(也可以简称测角), 这是激光寻的制导的重要功能。目前实用于激光寻的的象限元件主要是四象限探测器^[1]。经典的空间目标位置解算的方法是采用模拟信号处理体制的和差比幅归一化算法, 由硬件电路完成。当然, 这种实现策略有其局限性,

非线性化程度严重、制导精度不高, 灵活性也较差。经典和差比幅归一化解算的原理框图如图 1 所示^[2], 框图中输出的信号(V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D) 均与接收到的目标辐射功率有关, 它是随目标距离远近而变化的(变化系数令为 k)。这时单独采用和差电路, 系统输出电压 V_x 、 V_y 并不能代表目标的真正坐标。采用和差比幅归一化运算可以使信号与接收到的目标辐射功率无关, 这样得到的目

* 收稿日期: 2006-06-06; 修回日期: 2006-08-18

作者简介: 龙鹏翼(1973—), 男, 陕西汉中, 工程师, 硕士, 研究方向: 光电制导技术与信号处理、嵌入式计算机系统、电气总体技术。

标空间位置坐标可以近似如方程组(1)所示:

$$\begin{cases} x \approx \frac{k(V_A + V_B - V_C - V_D)}{k(V_A + V_B + V_C + V_D)} = \frac{V_A + V_B - V_C - V_D}{V_A + V_B + V_C + V_D} \\ y \approx \frac{k(V_A + V_D - V_B - V_C)}{k(V_A + V_B + V_C + V_D)} = \frac{V_A + V_D - V_B - V_C}{V_A + V_B + V_C + V_D} \end{cases} \quad (1)$$

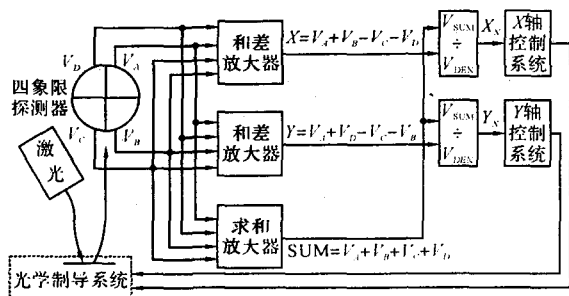


图1 经典和差比幅归一化解算原理框图

2 经典算法分析

理想的探测系统希望系统解算出的位置坐标数据与目标相对四象限的实际偏差呈线性关系,然而由于各种因素的限制,理想条件很难得到。上述经典方案在对跟踪精度要求比较高的场合,已无法满足要求,国内许多文献^[3-4]均在理论上对此问题进行了讨论。在实际应用中,希望寻求到一种能够同时满足解算速度与精度双重要求的工程化实现策略,这种策略是基于嵌入式专用计算机系统的,而不是在实验室的台式计算机上实现。

假如激光回波像斑在四象限探测器的光敏面上具有如图2所示的能量分布状态(图中阴影部分所示);现在假定代表各象限像斑能量的面积分别为 S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d ,很明显根据和差比幅归一化解算原理,像斑相对于 xoy 坐标系横向偏移量等效为:

$$x \approx k \frac{(S_a + S_b - S_c - S_d)}{(S_a + S_b + S_c + S_d)} \quad (2)$$

同理:像斑相对于 xoy 坐标系纵向偏移量等效为:

$$y \approx k \frac{(S_a + S_d - S_b - S_c)}{(S_a + S_b + S_c + S_d)} \quad (3)$$

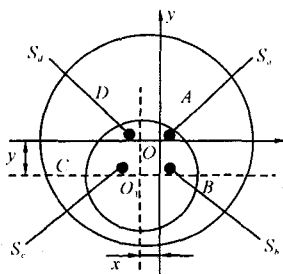


图2 像斑在探测器光敏面上分布状态示意图

其中 k 为比例系数。

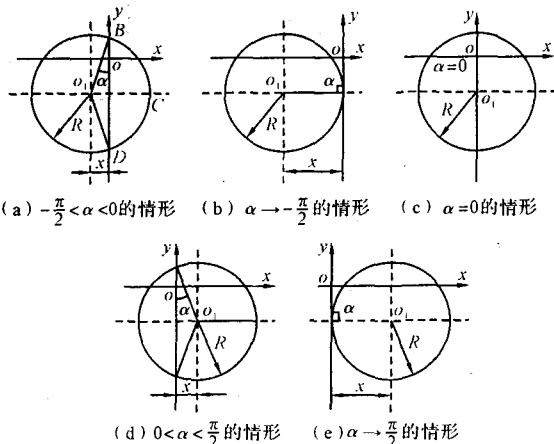


图3 计算示意图

下面对方程(2)进行分析。根据计算示意图3,以图(a)为例,令像斑面积为 S ,则 $S = S_a + S_b + S_c + S_d$,像斑半径为 R ,令由点 B 、 C 、 D 组成的扇形面积为 S_s ,对应的圆心角为 $\pi + 2\alpha$ (此情形下 α 为负,定义为过 B 点的半径与 y 轴之夹角),很明显由 $S/2\pi = S_s/(\pi + 2\alpha)$ 得:

$$(S_a + S_b) = S_s - S_{\Delta BOD} = \frac{S(\pi + 2\alpha)}{2\pi} - \frac{1}{2}R^2 \sin(\pi + 2\alpha) \quad (4)$$

$$\text{又} \because (S_c + S_d) = S - (S_a + S_b)$$

$$\therefore (S_a + S_b - S_c - S_d) = 2(S_a + S_b) - S$$

$$\therefore x \approx k \frac{2(S_a + S_b) - S}{S} =$$

$$kR \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (-\frac{\pi}{2} < \alpha < 0)$$

将它推广到普遍情形如图3(b)、(c)、(d)、(e)所示,可以知道在 α 的整个区间内:

$$x = k \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (-\frac{\pi}{2} < \alpha < 0) \quad (5)$$

完全成立。然而根据图3(a)可知在 α 的整个区间内:

$$x = kR \sin \alpha$$

其中 k 为比例系数。

方程(2)、(3)式是按照面积对面积的归一化原理而得到,因此,这里将归一化的原理推广到长度 x 对长度 R (使得偏移量与光功率无关)可以得到:

$$x = kR \sin \alpha / R = k \sin \alpha \quad (6)$$

即 $x = k \sin \alpha$ 更能表示真实的横向偏移量。这就

是说,对横向偏移角度而言,和差比幅归一化解算用 X 方向的近似偏移量(式(5))代替了真实的偏移量(式(6))。图 4 给出对应的计算值与真实值的比较曲线示意图(图 4 令 $R = 1$ 对应得到,虚线为实际偏移量,实线为由和差比幅归一化解算得出,横轴代表 α ,纵轴代表运算结果),图 5 是计算值与实际值之偏差曲线图。从图 4 可以看出,和差比幅归一化解算得出的结果在绝对值上比实际情况明显偏大,但在整个区间里,偏差的变化是有规律的,类似于正弦曲线。这里分析了 X 轴向的情况, Y 轴向的情形与 X 轴向的情况完全一样。

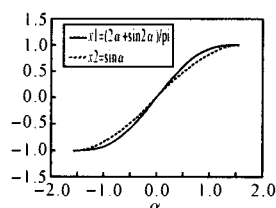


图 4 计算值与真实值的比较曲线示意图

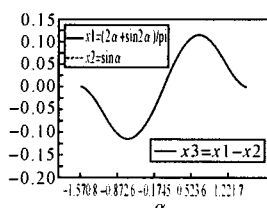


图 5 计算值与实际值的偏差曲线示意图

3 高精度解算方法

3.1 算法误差分析与技术方案选择

前已述及,和差比幅归一化解算方法不是严格的线性求解方法。对于线性求解的问题,可以有两个解决思路:

第一,在四象限探测器与光学系统组成的直角坐标系中,找出利用已知量 S 、 S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d (含义如图 2 所示)来直接求解真正的坐标或可以等效求解代表坐标的空间角度的表达式;或者找到一种高精度近似表示方程(4)的表达式,并且还要考虑求解的方便性和求解的实时性。

如果由方程(5)变形直接构造函数关系式得:

$$2\alpha = -\sin 2\alpha + \left[\frac{2\pi(S_a + S_b)}{S} - \pi \right]$$

即:

$$2\alpha = -\sin 2\alpha + k \quad (\alpha \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}))$$

方程中的 k 是可以由 S 、 S_a 、 S_b 、 S_c 、 S_d ($S = S_a + S_b + S_c + S_d = \pi R^2$) 等已知数表示的常量,该方程可以记为:

$$\theta = \phi(\theta) \quad (\theta \in (-\pi, \pi))$$

当 $\theta = 2\alpha \in (-\pi, \pi)$ 时,必存在一个正数 l ,使得:

$$|\phi'(\theta)| = |\cos \theta| \leq l < 1 \quad (7)$$

恒成立,这就是说,根据简单迭代收敛定理^[5],可以构造迭代函数:

$$\theta_{k+1} = \phi(\theta_k) \quad (8)$$

采用试探法或二分法精确地求出 θ ,即 α 或像斑形心坐标 (x, y) 高精度估计值,很明显,通过此法求出的位置坐标比用和差比幅归一化解算结果精确。

在嵌入式系统中大多采用专用微处理器,对实时性要求高的场合都采用定点数据计算方法,小数一般都等效转化为整数运算。求解式(8)是非常繁琐的,因为微处理器中都没有求解三角函数值的指令,求解三角函数几乎全部都要用泰勒公式 n 阶展开,阶数低了影响运算精度,要提高运算精度,只有尽可能的提高阶次,但这对于专用微处理器来说是不经济的。另外,如果要采用泰勒级数展开的求解办法,还必须要研究方程(8)的加速收敛技术以提高计算速度。从这里可以看出,直接高精度求解的思想方法虽然比较简单,函数关系构造起来也比较方便,但在专用嵌入式实时系统的工程化实现起来不太方便,算法思想虽然简单,但程序编制很繁琐,甚至有困难,迭代次数太多的话会影响控制的实时性。

第二,利用微处理器的强大功能,采用和差比幅归一化解算和高精度线性修正的办法来提高解算的精度,这种办法的解算速度极快,一般都是利用查表算法。但前提条件必须是要对和差比幅归一化解算的偏差形成原因、偏差的规律作深入了解,才有可能获取算法规律。

在定点实时处理的微处理器系统的具体实现中,对负数的处理是转化成绝对值运算、符号或极性单独标记处理。鉴于此,首先对偏差进行分析。图 6(a)、(b) 中的曲线均用绝对值表示,图 6(a) 中的实线是单独采用和差比幅归一化解算得到的近似结果,虚线是直接求算得到的实际结果,图 6(b) 给出了绝对值偏差的归一化曲线,它是将偏差的绝对值除以和差比幅归一化解算的绝对值得到,表征不同的和差比幅归一化解算结果下,偏差绝对值占和差比幅归一化解算结果绝

对值的百分比,从图上可以看出,目标像斑越靠近探测器中心,相对的偏差量也越大(虽然绝对偏差量并不大)。这也从侧面说明了高精度解算的意义:像斑落在中心区域附近,对制导系统的影响也越大,如果解算精度不高,会引起控制系统频繁颤抖抖动爬行,对制导是非常不利的。

图 6(a) 中的曲线函数关系式分别为:

$$x1 = \left| \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right|, \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

表示归一化解算的等效函数;

$$x2 = |\sin \alpha|, \alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

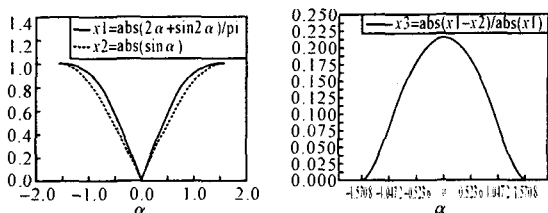
表示真实的解算函数。

图 6(b) 中的曲线函数关系式为:

$$\frac{|x1 - x2|}{x1} = \left| \frac{\frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} - \sin \alpha}{\frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}} \right|,$$

$$\alpha \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

表示偏差绝对值占和差比幅归一化解算结果绝对值的百分比。



(a) 解算结果绝对值对比曲线 (b) 绝对值偏差的归一化曲线

图 6 两种解算结果与偏差的绝对值曲线

如果能够寻找到 $\delta x = |x1 - x2|$ 的一个函数表达式 $f_1(x)$ 与 α 无关,却是 δx 的高精度估计式,并且自变量 x 与 $x1$ 有某种对应关系,问题便可以得到解决。很显然图 6(b) 中的曲线是对称的,因此只要获取了半个周期上的 $f_1(x)$,问题便会得到解决。但这样的函数关系式非常难找到。

文中采取这样的处理办法: $f_1(x)$ 函数可以用一张离散数据表来表示,每个和差比幅归一化解算的结果 θ_x ,在表上都有唯一的偏差修正数据 δ_x 与之对应,利用系统中高性能的 16 位微处理器,可以很好地解决这个问题。问题的关键就转化为如何去构造这样的一张数据表。根据如上的分析,对于 X 轴向通道可以提前构造如下的数据表 1, Y 轴向通道的数据表完全类似。

表 1 X 轴向解算数据对应关系表

变量 α	函数式		
的取值	和差比幅归一化解算 θ_x	真实运算式解算 θ_x	修正偏差 δ_x
$\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$	$\theta_x = \left \frac{(V_a + V_b) - (V_c + V_d)}{(V_a + V_b + V_c + V_d)} \right = \left \frac{(2\alpha + \sin 2\alpha)}{\pi} \right $	$\theta_x = \sin \alpha $	$\delta_x = (\theta_x - \theta_x) / \theta_x$

在表中,每个类别的函数关系式在前面已被推导出来,在实验室完全可以通过编程、或采用 Matlab 软件工具很容易的获取表中各数据。需要特别注意的是:为方便处理,计算时比例系数暂时令为 1,数据表匹配好之后,再统一考虑系数匹配的问题。计算时把负数运算转化为绝对值运算,符号位单独标记考虑。

表中的数据量实在是太大了,如果说每一个和差比幅归一化解算结果均要用一个偏差数据去修正的话,将需要很大的存贮器容量,而且解算时设的步距越密,数据量越大。

根据图 6(b) 得到的结论:大的零位偏离角度解算的绝对误差量很大,但其相对偏差量却比较小,小的零位偏离角度解算的绝对误差量很

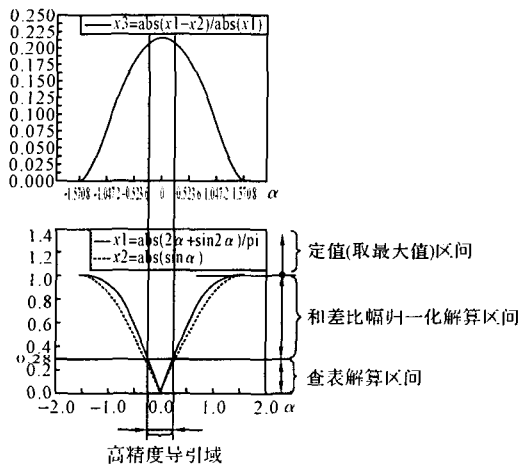


图 7 解算区间分段定义示意图

小,但其相对偏差量却很大,因此目标像斑越靠近探测器中心越要加倍关注解算精度。课题中采

用对小的零位偏离角度查表校正的数据解算策略,在跟踪闭环控制过程中,大的零位偏离角度将逐渐趋向于小的零位偏离角度随后进入进行高精度导引阶段。大偏角的位置解算数据仍然和差比幅归一化解算采用近似处理,而小偏角的位置解算则采用查表算法,具有和真实值几乎一样的解算精度。结合表中的数据,图 7 是解算区间分段定义示意图。在图中以代表和差比幅归一化解算结果的 x_1 的纵轴作为用来分段的区间,很好对应。文中规定如果和差比幅归一化解算的结果在 $0 \sim 0.28$ 之间,表明要使用查表算法。

当然,高精度解算区域的大小视系统中 RAM 容量大小而定,甚至可以在整个区间上均采用查表算法,可以将所有的非线性区域彻底消除,但对系统硬件的设计水平要求很高。

3.2 新的算法公式

$$\left| \left(\frac{V_1}{k_1} + \frac{V_4}{k_4} \right) - \left(\frac{V_3}{k_3} + \frac{V_2}{k_2} \right) \right| = \omega,$$

$\left| \left(\frac{V_1}{k_1} + \frac{V_2}{k_2} \right) - \left(\frac{V_3}{k_3} + \frac{V_4}{k_4} \right) \right| = \psi$, (V_1, V_2, V_3, V_4 分别表示探测器 1~4 象限的光电输出信号), 则:

$$\theta_x = \begin{cases} k & \text{当 } \omega = 1 \\ k\omega & \text{当 } 0.28 < \omega < 1 \\ k\omega(1 - \delta_x) & \text{当 } 0 \leq \omega \leq 0.28 \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

$$(11)$$

$$\lambda_x = \begin{cases} 0 & \text{当 } \omega \geq 0 \\ 1 & \text{当 } \omega < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$(13)$$

其中, k 是比例系数, δ_x 是查表得到的数据(提前装定在微处理器中), λ_x 代表符号位,它代表着追踪平台的 X 轴向的运动方向。

同理给出 Y 轴向关系表达式如下:

$$\theta_y = \begin{cases} k & \text{当 } \psi = 1 \\ k\psi & \text{当 } 0.28 < \psi < 1 \\ k\psi(1 - \delta_y) & \text{当 } 0 \leq \psi \leq 0.28 \end{cases} \quad (14)$$

$$(15)$$

$$(16)$$

$$\theta_y = \begin{cases} 0 & \text{当 } \psi \geq 0 \\ 1 & \text{当 } \psi < 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$(18)$$

其中, δ_y 是查表得到的数据, λ_y 代表符号位,表示追踪平台的纵向运动方向。当然,也可以利用插值近似的方法去获取 δ_x, δ_y 的高精度估算表达式,但运算量偏大,不如查表算法来得方便快捷。

3.3 基于 MCU 的程序设计

由上述新的求解公式即可方便的编写软件。为说明原理,文中程序设计采用查询方式,根据

系统的实际情况采用中断方式可以提高 MCU 的运行效率。图 8 是基于 MCU 的程序设计流程图。

需要注意:RAM 表格数据量大,且需要手工输入,因此在数据输入时必须十分细心,避免出错。另外,在硬件设计上也要尽可能降低对地噪声提高数据的可靠性,充分发挥高精度算法的优势。

4 总结

文中以激光导引技术中的基于四象限激光探测器的目标空间位置解算技术为切入点,深入研究了坐标解算的原理、由经典算法产生的误差特性。将隐含误差关系显式化,得到解算误差曲线和规律。提出了分区间采用不同的解算方案,尤其是对相对误差较大严重影响制导精度的区域采用查表求解,同时满足了解算速度和精度双重要求。采用嵌入式系统的工程化实现策略,充分地发挥了智能化处理的优势,将重点完全转移到算法和软件上,具有很好的应用和参考价值。

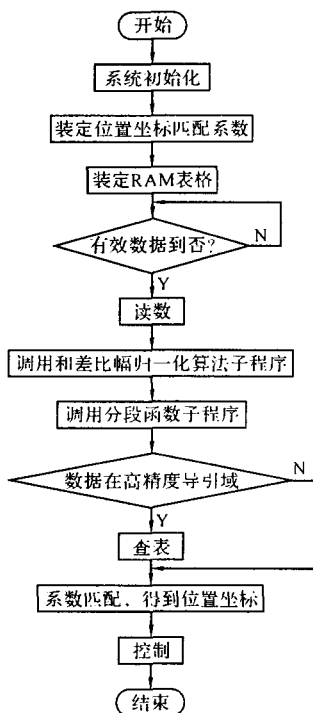


图 8 基于 MCU 的程序设计流程图

[参 考 文 献]

- [1] 邓仁亮. 光学制导技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [2] Dan Harres. Analog dividers for acquisition and tracking signal normalization[J]. SPIE Vol. 1218 Free-Space Laser Communication Technologies II (1990). PP. 1-9.
- [3] 安凯, 汪红慢, 任戈. 四象限探测仪测角新算法[J]. 激光与红外, 2001, 12: 328-329.
- [4] 张宏建, 方斌, 等. 机载武器四象限测角制导新算法[J]. 激光与红外, 2002, 12: 425-427.
- [5] 李乃成, 邓建中. 数值计算方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.