

高炮弹道仿真系统设计与算法实现

薛庆¹, 秦黎¹, 刘敏霞¹, 吴向东²

1. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

2. 石家庄军械学院, 石家庄 050003

摘要 群小目标飞行特征显控系统利用上位机传送的数据实现弹道轨迹仿真, 将仿真结果与理想的弹道轨迹进行比较, 判断弹道轨迹精度是否能满足预期的发射要求, 评估火力发射技术是否达到预期成果。针对系统中的弹道仿真功能提出了一种三维弹道轨迹插值拟合算法, 将三维离散的特征数据分解到射面和炮口水平面 2 个二维平面, 在二维平面分别采用分段三次样条插值算法对离散的特征数据进行插值拟合, 再根据插值结果绘制三维弹道轨迹图像。使用 VC++6.0 编写插值拟合程序, 通过实例验证拟合出的三维弹道轨迹经过每一个特征点且轨迹光滑连续, 满足拟合条件, 达到轨迹仿真的要求。

关键词 炮弹飞行轨迹; 三次样条; 插值拟合; 弹道仿真

中图分类号 TJ35; O241.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.34.005

Design and Algorithm of Ballistic Trajectory Simulation System of Antiaircraft Gun

XUE Qing¹, QIN Li¹, LIU Minxia¹, WU Xiangdong²

1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China

Abstract The system that displays and controls antiaircraft gun projectile flight characteristics uses data from host computers to realize 3D ballistic trajectory simulation, then compares the results with ideal ballistic trajectories in order to judge whether the accuracy of ballistic trajectory satisfies the requirements and to evaluate whether the firepower technology achieves the expected results. This paper briefly introduces the basic framework and functions of the system and presents a cubic spline interpolation fitting algorithm for 3D ballistic trajectory simulation. The algorithm decomposes the 3D discrete characteristic data into two 2D trajectories separately in the launch plane and the horizontal plane, then interpolates and fits them by a piecewise cubic spline interpolation algorithm respectively, and finally plots the 3D ballistic trajectory according to the interpolation results. The algorithm is realized by Microsoft Visual C++ 6.0. Through an evaluation instance, the 3D ballistic trajectory is shown to be smooth and can pass through each characteristic point, meeting the fitting condition as well as the requirement of trajectory simulation.

Keywords antiaircraft gun ballistic trajectory; cubic spline interpolation; curve fitting algorithm; ballistic trajectory simulation

0 引言

目前中国的近程防空反导武器体系将是以高炮为主, 高炮与防空导弹混编的武器体系^[1]。在防空反导领域中, 相比防空导弹而言, 高炮的射击点是目标未来点, 即使弹丸存速低于目标飞行速度炮弹也能命中目标。而且高炮还具有射击准备时间短、造价低等特点, 配备光电火控系统的高炮群对低空近程的快速目标, 具有火力猛、反应快、飞行时间短、机动灵

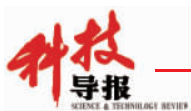
活、抗电子干扰能力强的作战特点, 在打击低空大量来袭目标时将成为防空体系中一道必不可少的屏障^[2]。因此高炮火力方面仍是我军研究的重点之一。

群小目标飞行特征显控系统作为某高炮火力发射技术研究系统的一个子系统, 承担的主要任务是接收上位机发送来的炮弹位置信息和特征信息, 通过对火炮试射的实测数据进行处理, 对高炮发射过程中炮弹弹道与目标轨迹进行仿真

收稿日期: 2013-08-01; 修回日期: 2013-10-15

基金项目: 国家部委预研基金项目

作者简介: 薛庆, 副教授, 研究方向为人因工程学、人机界面设计与评价, 电子信箱: xueqing@bit.edu.cn; 秦黎(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为人机工程学, 电子信箱: qinli_bit@163.com



研究、开发,利用 VC++6.0 为平台,方便而又逼真地生成炮弹飞行轨迹及炮弹发射所形成弹幕覆盖的区域,实现弹道轨迹仿真的功能,给操控者呈现一个直观的可视化并且可以人工干预的操控界面。从接收数据到开发出完整的显控系统,要实现的功能层层递进。首先是储存管理大量的特征数据,然后模拟现实情况下弹幕和目标的运动轨迹及趋势,实现三维轨迹仿真功能,最后是将整个过程在界面上呈现出来,据此设计整个系统的总体架构。系统的总体架构从下至上包括技术层,算法实现层和应用层 3 个层面,如图 1 所示。

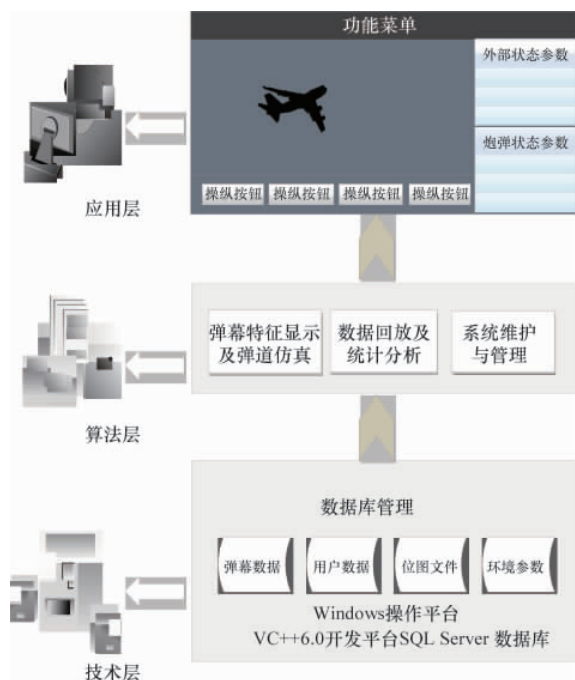


图 1 系统总体架构图

Fig. 1 Framework of the system

底层的技术支撑部分,具体包括了开发环境、开发工具、图形驱动工具和数据库管理工具及 PD、目标、环境条件状态参数等数据;中间部分的算法层主要通过数值分析算法、数学建模结合运动学及物理学的理论知识来生成炮弹的运动轨迹进行轨迹仿真,对计算出的数据进行统计分析,然后以图片或者文本的方式进行回放;顶层的应用层主要是实现人机交互界面的设计,即完成信息的呈现和控制的功能。

算法层面上的轨迹仿真分析要完成弹道轨迹曲线的拟合、推演和对比分析,是本系统核心功能,也是算法设计的难点。针对本系统的轨迹仿真中的三维轨迹拟合功能,本文研究一种三维弹道轨迹插值拟合算法。

1 炮弹轨迹生成

高炮试射过程中,由云台托举的两架高速摄影机对炮弹飞行过程全方位自动拍摄,记录下固定时间点的炮弹运动位置信息,群小目标飞行显控系统中的主要功能是接收上位机发送的这些炮弹位置信息,将这些位置信息组成的离散

点拟合成一条圆滑的弹道轨迹,用来与理想的弹道轨迹比较,判断火炮发射是否能满足预期的发射要求,评估火力发射技术是否达到预期成果。弹道拟合是飞行试验结果分析中的一项重要工作,通过弹道拟合可以实现根据飞行试验结果修正炮弹空气动力参数的风洞试验误差,此外还可以通过弹道拟合发现炮弹飞行中出现的一些异常现象^[9]。

上位机发送的数据是由一系列离散点组成,因此按照给定数据计算的弹道轨迹也是由一系列不连续点组成的。然而要对弹道轨迹进行仿真,必须得到连续的弹道轨迹,针对这种情况,本系统采用插值的方法使不连续的弹道轨迹成为连续的弹道轨迹,从而实现弹道仿真的功能。

高炮弹发射弹道有两个特征面^[4],一个是通过炮口水平面;一个是射面,即火炮完成发射准备后炮身轴线的铅直面。在弹丸出炮口的一段弹道上,可以认为弹轴绕弹道切线进动,但当弹道逐渐弯曲时,弹轴绕与弹道切线成某一夹角的轴线进动,对于右旋弹丸来说,这个夹角的存在导致弹道逐渐偏向射面右侧^[9]。也就是说,炮弹出射时,除了在射面的运动之外,从射面到落点会有一定的距离偏差,即侧偏,所以高炮的炮弹轨迹是一个三维的运动轨迹。

由于高炮的非机动特性,在此前的研究中,多把高炮炮弹的弹道运动视为一个二维平面上的运动模型,但在本系统中高炮炮弹是以弹幕形式发射,为了在后期更好地呈现出清晰明了的弹道轨迹,需要在三维空间中进行弹道仿真。考虑高炮发射的物理特性,炮弹特征数据是距离关于高度和侧偏的二元不连续函数,因此高炮弹道插值方法与一般的插值方法不同,在本研究中对数据进行的插值为三维插值。但三次样条插值只适用于二维平面插值计算,为了解决该问题,本文中考虑采用在射面和炮口水平面两个不同方向分别进行二维平面的插值计算,再根据二维的插值计算数据绘制三维的弹道轨迹。为了取得每个插值点的三维特征数据,对这两个平面的插值计算在射程方向选取相同的插值区间。弹道轨迹的仿真流程如图 2 所示。

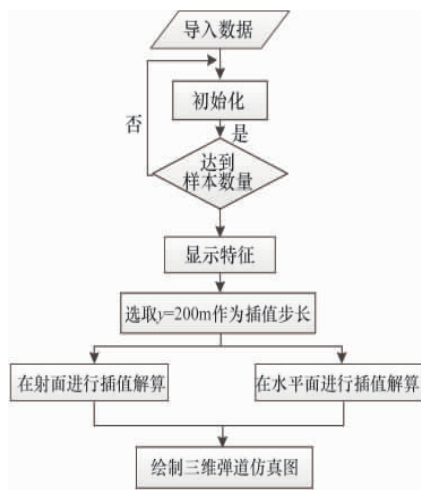
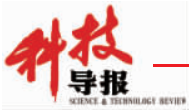


图 2 弹道轨迹生成流程

Fig. 2 Flowchart of ballistic trajectory simulation



利用追赶法计算出 M_1, M_2 的值。

(5) 求得每奇数段的 3 条曲线表达式,并求出每奇数段在始、末点处的导数。

(6) 同理,当 i 为偶数时,根据第 1 边界条件(2)得方程组

$$\begin{cases} 2M_0 + M_1 = \frac{6}{h_1} \left(\frac{y_1 - y_0}{h_1} - y'_0 \right) = e_0 \\ \vdots \\ 2M_n + M_{n-1} = \frac{6}{h_n} \left(y'_n - \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} \right) = e_n \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & & & & \\ \mu_1 & 2 & \lambda_1 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & & \mu_{n-1} & 2 & \lambda_{n-1} \\ & & & & 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ \vdots \\ M_{n-1} \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_{n-1} \\ e_n \end{bmatrix}$$

计算 M_0, M_1, M_2, M_3 的值,求得每偶数段的 3 条曲线表达式。

其中, $\mu_j = 1 - \lambda_j$ ($\lambda_j = \frac{h_{j+1}}{h_j + h_{j+1}}$), $e_j = \frac{6}{h_j + h_{j+1}} \left(\frac{y_{j+1} - y_j}{h_{j+1}} - \frac{y_j - y_{j-1}}{h_j} \right)$ ($j=1, 2, \dots, n$)。

算法流程示意图 3。

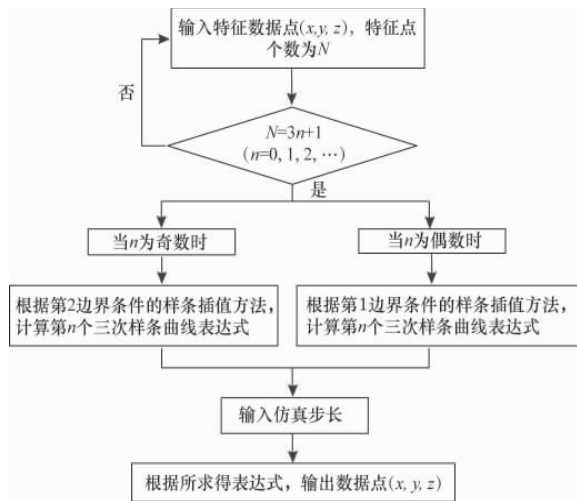


图 3 三次样条插值算法流程示意

Fig. 3 Flowchart of cubic spline interpolation algorithm

3 运行实例

本研究以 VC++6.0 为平台,开发了群小目标飞行特征监控系统,首先导入特征数据做初始化处理,然后分别在射面和炮口水平面对三维特征数据进行插值计算,并绘制出弹道轨迹在射面和炮口水平面的投影。在插值计算时在射程方向上选取同样的插值区间,即当插值点与射程点的位置坐标一致时,即可以根据样条插值程序分别计算出该插值点在射高和侧偏方向上的位置坐标。根据插值点的三维坐标,即可绘制出三维的弹道飞行轨迹。

以表 1 所示弹道系数为 $c=0.3613$,初速 $v=914\text{m/s}$,弹道倾角为 $\pi/3$ 的 M437 炮弹的弹道轨迹数据为例,在射面和炮

口水平面分别进行分段三次样条曲线拟合,拟合后的二维及三维轨迹如图 4~图 6 所示。

表 1 部分炮弹特征信息表

Table 1 Part of projectile flight characteristics data

轨迹点编号	水平距离/m	高度/m	侧偏/m
1	0	0	0
2	3721.58824	4517.70372	40.1986
3	7457.73652	8157.09408	85.3104
4	10941.02484	10578.26164	130.4221
6	14247.94988	11909.43220	174.6402
7	17521.01117	12231.31724	219.7524
8	20644.44473	11561.96480	264.8646
9	23673.49597	9948.93202	309.5288
10	26604.96535	7416.77480	354.1944
11	31525.34972	667.86101	398.4134
12	31903.66789	0	443.5242

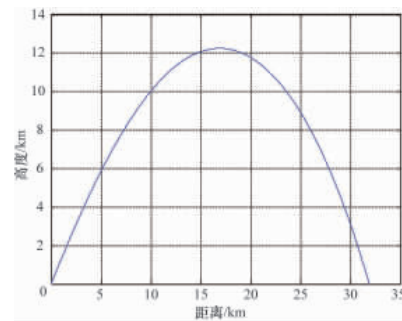


图 4 射面的轨迹投影

Fig. 4 Projective trajectory in the launch plane

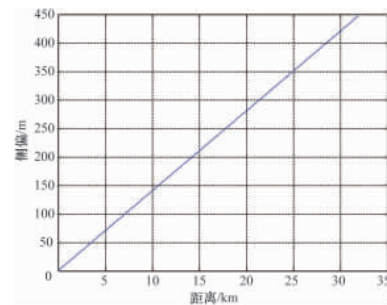


图 5 炮口水平面的轨迹投影

Fig. 5 Projective trajectory in the horizontal plane through antiaircraft gun muzzle

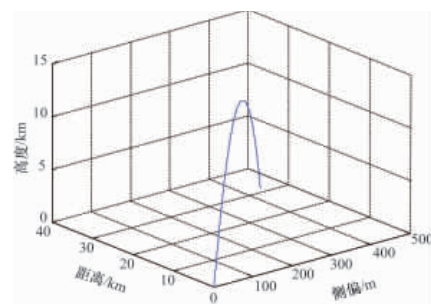


图 6 三维弹道轨迹

Fig. 6 3D ballistic trajectory



利用本文中拟合方法,对分段后的奇数段用自然边界条件拟合,并求出每段始、末位置的函数值及导数值。在偶数段,利用分段点处函数值及导数值相等的条件,采用第1边界条件拟合,保证了拟合后的弹道轨迹光滑、连续。

从图4~图6可以看出,在对弹道数据分段拟合中,段

表2 Matlab解算结果
Table 2 Results by Matlab

时间/s	水平距离/m	高度/m	侧偏/m
0.1	45.64	59.87	4.48
0.2	91.17	119.50	8.83
0.3	136.58	178.87	13.40
0.4	181.87	238.00	17.87
0.5	227.05	296.88	22.39
0.6	272.13	355.52	26.41
0.7	317.09	413.92	31.23
0.8	361.94	472.08	34.87
0.9	406.69	530.01	40.20
1.0	451.33	587.70	44.27
1.1	495.87	645.15	49.55
1.2	540.30	702.38	54.69
1.3	584.63	759.37	58.13
1.4	628.86	816.14	61.68
1.5	672.99	872.68	67.22
1.6	717.01	929.00	71.30
1.7	760.95	985.08	76.82
1.8	804.78	1040.95	80.79
1.9	848.52	1096.60	85.04

通过以上数据可以看出,各项坐标绝对误差值 $<1m$,本文中提出的算法仿真结果与Matlab解算的理想弹道基本吻合,该轨迹也符合实际的轨迹曲线,验证了该算法可行。

4 结论

介绍了作为高炮火力研究系统一部分的群小目标飞行特征显控系统的主要任务和系统架构,并针对其中的核心流程弹道轨迹仿真研究了一种对弹道轨迹进行三维拟合的三次样条插值算法。根据该算法进行的离散点三维曲线拟合生成的弹道曲线光滑平整,通过接收到的每一特征点,符合实测弹道的运行轨迹,满足整个火力系统的精度需求,对于火力研究有很大的实用价值。本算法进行的三维插值仿真是相对于二维仿真而言,图像显示直观清晰,对比度高,便于进行数据分析,对火力设计有很好的辅助作用。

参考文献 (References)

[1] 郭吉成. 高炮火控系统射击问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
Guo Jicheng. Algorithmic research about firing in the firing control system of antiaircraft artillery [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.

[2] 周启煌, 单东升. 坦克火力控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
Zhou Qihuang, Shan Dongsheng. The tank fire control system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1992.

[3] 赵良玉, 杨树兴. 基于Matlab和iSIGHT的弹道曲线拟合方法[J]. 战术

与段之间是光滑连续的,且拟合的弹道轨迹通过了记录中的每一特征点,满足拟合条件和弹道轨迹光滑连续的要求。并且通过与该炮Matlab解算的理想弹道^[1]的比较。表2、表3分别给出了Matlab解算的弹道数据和通过三次样条插值出的部分弹道数据。

表3 样条插值计算结果
Table 3 Spline interpolation results

步长/s	水平距离/m	高度/m	侧偏/m
0.1	45.641	59.656	4.4802
0.2	91.166	119.147	8.9514
0.3	136.575	178.460	13.4159
0.4	181.871	237.585	17.8763
0.5	227.055	296.511	22.3349
0.6	272.127	355.227	26.7941
0.7	317.089	413.722	31.2563
0.8	361.943	471.985	35.7237
0.9	406.690	530.014	40.1986
1.0	451.330	587.779	44.6827
1.1	495.866	645.301	49.1755
1.2	540.299	702.573	53.6759
1.3	584.628	759.596	58.1830
1.4	628.857	816.374	62.6958
1.5	672.985	872.906	67.2132
1.6	717.015	929.193	71.7343
1.7	760.946	985.238	76.2582
1.8	804.781	1041.040	80.7839
1.9	848.520	1096.600	85.3104

导弹技术, 2006(5): 87-90.

Zhao Liangyu, Yang Shuxing. Tactical Missile Technology, 2006(5): 87-90.

[4] 王敏忠. 炮兵应用外弹道学及仿真 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 4-5.
Wang Minzhong. Applied artillery exterior ballistics and simulations [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009: 4-5.

[5] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 射表编制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
PLA General Armament Department Military Training Materials Editorial Committee. The preparation of technical of firing table [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.

[6] 陈建造. 高炮火控模拟 [D]. 厦门: 厦门大学, 2006.
Chen Jianzao. Simulation of anti-aircraft gun fire control radar [D]. Xiamen: Xiamen University, 2006.

[7] 石东洋. 数值计算方法 [M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007: 123-130.
Shi Dongyang. Numerical methods [M]. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2007: 123-130.

[8] 普伦特. 样条函数与变分方法 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
Prenter P M. Splines and variational methods [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980.

[9] 许小勇, 钟太勇. 三次样条插值函数的构造与Matlab实现 [J]. 兵工自动化, 2006(11): 76-78.
Xu Xiaoyong, Zhong Taiyong. Automatic Measurement and Control, 2006 (11): 76-78.

[10] 李丹. 四阶龙格-库塔法在火控解算中的应用 [J]. 微计算机信息, 2011(3): 192-193.
Li Dan. Microcomputer Information, 2011(3): 192-193.

(责任编辑 赵业玲)