

文章编号: 2095-4980(2014)01-0071-05

## 雷达模拟训练系统电视跟踪视景仿真实现

顾荣军, 王朴军, 王苗苗, 周志增

(中国人民解放军 63889 部队, 河南 孟州 454750)

**摘要:** 电视跟踪是雷达系统多模式跟踪方式中重要的一种, 基于图像绘制技术实现了电视跟踪系统的视景仿真。详细描述了电视跟踪视景仿真的实现方法, 包括系统设计、序列图像采集方法、全景图像的合成算法以及视景图像生成算法, 并进行了算法优化和视景仿真实现。该方法已成功应用于某多功能相控阵雷达模拟训练系统的开发, 仿真效果较为逼真。

**关键词:** 序列图像; 全景图像; 电视跟踪

**中图分类号:** TN911.73; TP391      **文献标识码:** A      **doi:** 10.11805/TKYDA201401.0071

## Implementation of TV tracking scene simulation for radar simulator

GU Rong-jun, WANG Pu-jun, WANG Miao-miao, ZHOU Zhi-zeng

(Unit 63889 of PLA, Mengzhou Henan 454750, China)

**Abstract:** TV tracking is one of the tracking models of radar. TV tracking scene simulation based on image rendering technology is realized. Implementation of TV tracking scene simulation is described in details, including the system design, image sequences acquisition, algorithm of panoramic composing and scene image producing. Further, the algorithms are optimized and the simulation of TV tracking system is realized. The method proposed achieves more realistic simulation results and has been successfully applied to a certain multi-function phased array radar simulation training system.

**Key words:** image sequences; panoramic image; TV tracking

电视跟踪是多功能雷达系统中一种重要的跟踪方式, 也是操作人员所能观察到的最直观的目标信息之一, 因此, 电视跟踪仿真是雷达模拟训练系统的重要组成部分, 其仿真效果也直接影响整个系统逼真度。

在开发某雷达模拟训练系统时, 要求使用软件实现电视跟踪系统仿真。对电视跟踪系统的仿真包括视景仿真、目标仿真及波门跟踪效果模拟, 本文主要研究电视跟踪系统视景仿真实现方法。显示系统的模拟作为计算机模拟的最终输出结果, 其逼真度和实时性直接影响到系统整体性能<sup>[1]</sup>, 要达到实时逼真的视景仿真效果, 一方面要采用先进的图像处理技术, 另一方面要对算法进行优化。

### 1 系统设计

电视跟踪视景仿真实现基于某多功能相控阵雷达模拟训练系统, 系统结构如图1所示, 主要由电视跟踪视景仿真、空情仿真、雷达主控系统、控制指令、终端显示仿真、状态显示仿真等部分组成。

基于三维建模软件可以逼真地实现各种视景仿真系统, 但建模复杂, 开发周期长, 且对硬件要求较高。文献[2]讨论了应用建模软件MultiGen Creator和

GL Studio实现电视跟踪视景仿真的方法。在本系统中, 视景仿真采用基于图像绘制技术<sup>[3-4]</sup>实现, 对实际场景进行采样得到球面空间的序列图像, 进行拼接得到一幅球面全景图, 再通过特定的变换和组织方式生成不同视点的新视图。电视跟踪视景仿真部分从雷达主控系统接收雷达天线当前角度信息, 当天线方位、俯仰数据改变时, 以新的指向值为参数调用视景生成函数, 从全景图中提取视景图像。

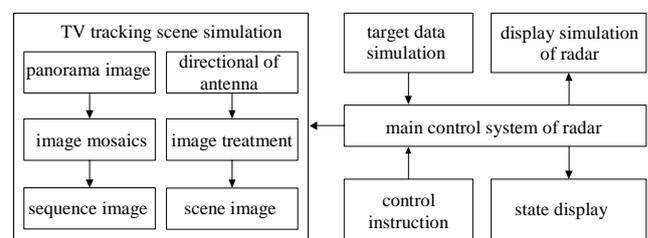


Fig.1 Structure of system  
图1 系统结构

## 2 主要技术及算法

### 2.1 序列图像采集

采集场景序列图像需要1个高分辨率的相机和1个云台。将相机固定在云台上,拍摄过程中云台保持在同一位置,每转一定角度,采集1张图像。采集的序列图像中相邻的2张必须具有重叠区域(见图2)。重叠区域的大小是全景图生成质量的重要影响因素,重叠区域的比例越大,生成的全景图像效果越好,但这样所要采集的图像就越多。

### 2.2 全景图合成算法

合成全景图像时,序列图像上像素点映射到球面的模型用针孔透视成像模型来近似<sup>[5-6]</sup>,映射关系如图3所示,图中 $O$ 点是成像透视中心, $O_2$ 是图像中的像素点, $O_3$ 是点 $O_2$ 映射至球面的位置。

假设图像竖直张角和水平张角分别为 $\alpha$ 和 $\beta$ ;  $W$ 和 $H$ 分别为图像宽度和高度; $\Delta W$ 和 $\Delta H$ 为一个像素点的宽度和高度; $N_w$ 和 $N_H$ 分别为图像在水平和垂直方向像素数的一半。可得:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{H/2}{|OO_1|} \quad (1)$$

$$\tan\left(\frac{\beta}{2}\right) = \frac{W/2}{|OO_1|} \quad (2)$$

点 $O_1$ 的坐标为 $(0, H/2\cot(\alpha/2), 0)$ , 点 $O_2$ 的坐标为 $(n_w\Delta W, H/2\cot(\alpha/2), n_H\Delta H)$ 。过 $O$ 和 $O_2$ 的直线为:

$$\frac{x}{k_1} = \frac{y}{k_2} = \frac{z}{k_3} = t \quad (3)$$

式中:  $k_1 = n_w\Delta W$ ;  $k_2 = H/2\cot(\alpha/2)$ ;  $k_3 = n_H\Delta H$ 。

直线与球面( $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ )相交于点 $O_3$ 。将直线 $OO_2$ 的方程代入球面方程可得:

$$t = \frac{\sqrt{R^2}}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}} = \frac{\sqrt{(W/2)^2 + (H/2\cot(\alpha/2))^2 + (H/2)^2}}{\sqrt{(n_w\Delta W)^2 + (H/2\cot(\alpha/2))^2 + (n_H\Delta H)^2}} \quad (4)$$

由于 $N_w\Delta W = W/2$ , 且 $N_H\Delta H = H/2$ , 因此:

$$t = \frac{\sqrt{R^2}}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2}} = \frac{\sqrt{(N_w\Delta W)^2 + (H/2\cot(\alpha/2))^2 + (N_H\Delta H)^2}}{\sqrt{(n_w\Delta W)^2 + (H/2\cot(\alpha/2))^2 + (n_H\Delta H)^2}} \quad (5)$$

$O_3$ 的坐标可表示为 $(n_w\Delta Wt, H/2\cot(\alpha/2)t, n_H\Delta Ht)$ 。

基于MATLAB对全景图生成算法进行仿真,仿真结果如图4所示。仿真结果表明,该算法能实现平面图像到球面空间的映射。

### 2.3 视景图像生成算法

雷达系统中,电视跟踪系统安装在天线阵面上,其镜头指向与天线阵面法线方向相同,空间关系如图5所示。以 $S$ 表示方位 $360^\circ$ 、俯仰 $180^\circ$ 范围的半球面全景图。设天线指向为 $(a, e)$ (单位为度),  $Y$ 轴正方向为正北,  $Z$ 轴正方向为垂直方向,  $X$ 轴正方向为正东, 天线指向球面上 $T$ 点。平面 $S_{TOZ}$ 与球面相交的大圆记为 $O_{TOZ}$ 。平面 $S_{XOY}$ 与球面相交的大圆记为 $O_{XOY}$ 。  $P$ 是圆 $O_{TOZ}$ 上一点, 直线 $OP$ 与 $OT$ 垂直,  $K$ 是圆 $O_{XOY}$ 上一点, 直线 $OK$ 与平面 $S_{TOZ}$ 垂直。天线指向角 $(a, e)$ 在直角坐标系下分别对应 $(A, E)$ (单位为弧度), 且满足:

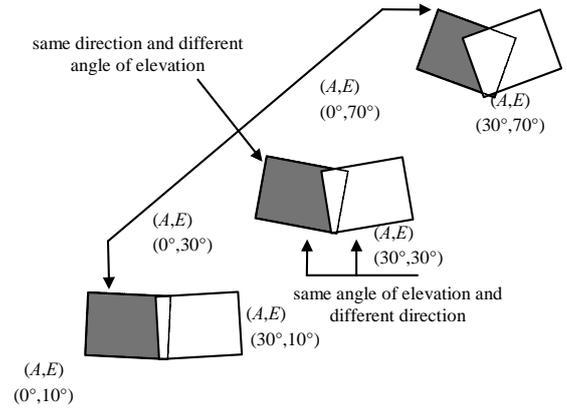


Fig.2 Overlapping of adjacent images  
图2 相邻图像间的重叠区域示意图

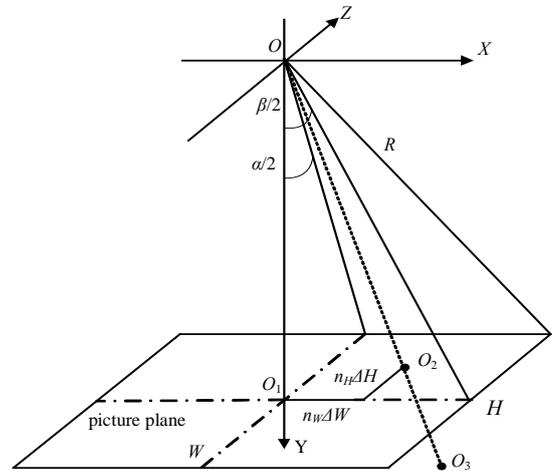


Fig.3 Spherical mapping model of image pixels  
图3 子图像素点球面映射模型

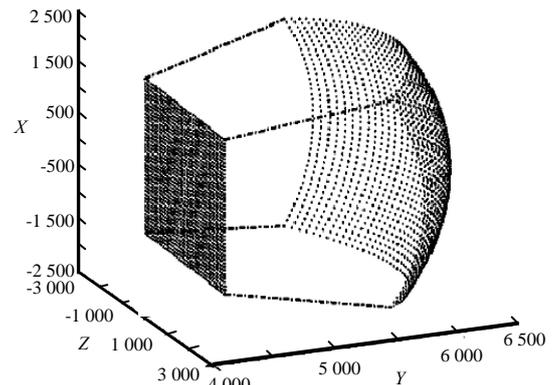


Fig.4 Simulation of panorama producing algorithm  
图4 全景图生成算法仿真图

$$A = \begin{cases} (90 - a)\pi/180, & (0 \leq a \leq 90) \\ (450 - a)\pi/180, & (90 < a < 450) \end{cases} \quad (6)$$

$$E = e\pi/180 \quad (7)$$

球面半径为  $R$ ，则可得  $T, P, K$  3 点的坐标为：

$$\begin{cases} (R \cos E \cos A, R \cos E \sin A, R \sin E) \\ (-R \sin E \cos A, -R \sin E \sin A, R \cos E) \\ (R \sin A, -R \cos A, 0) \end{cases}$$

假设空间中一点  $(x, y, z)$ ，绕过点  $(x_1, y_1, z_1)$  和点  $(x_2, y_2, z_2)$  的直线  $L$  旋转  $\theta$  弧度，坐标可表示为<sup>[7]</sup>：

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_L(\theta) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_r \quad (8)$$

式中： $\mathbf{R}_L(\theta)$ 为旋转矩阵； $\mathbf{T}_r$ 是三维空间点的平移矩阵。设 $\mathbf{R}_x(\alpha)$ 是点绕 $X$ 轴旋转 $\alpha$ 弧度时的旋转矩阵； $\mathbf{R}_y(\beta)$ 是点绕 $Y$ 轴旋转 $\beta$ 弧度时的旋转矩阵； $\mathbf{R}_z(\theta)$ 是点绕 $Z$ 轴旋转 $\theta$ 弧度时的旋转矩阵， $T_x, T_y, T_z$ 为平移距离。则可得：

$$\mathbf{R}_L(\theta) = \mathbf{T}_r(-x_1, -y_1, -z_1) \mathbf{R}_x(\alpha) \mathbf{R}_y(\beta) \mathbf{R}_z(\theta) \mathbf{R}_y(-\beta) \mathbf{R}_x(-\alpha) \mathbf{T}_r(x_1, y_1, z_1) \quad (9)$$

$$\mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

将点  $T$  绕直线  $OP$  旋转  $\Delta A/2$  弧度至点  $T_1$ ，点  $T_1$  再绕直线  $OK$  旋转  $\Delta E/2$  弧度至点  $T_2$ ，旋转方向按逆时针方向，则：

$$T_2 = \mathbf{T} \mathbf{R}_{OP}(\Delta A/2) \mathbf{R}_{OK}(\Delta E/2) \quad (14)$$

$T_2(x_2, y_2, z_2)$  是用直角坐标系表示的，要用雷达极坐标系表示，先计算直线  $OT_2$  在直角坐标系中对应的角  $A_2$  和角  $E_2$ ：

$$A_2 = \begin{cases} \arctan(y_2/x_2) & (x_2 > 0, y_2 \geq 0) \\ \pi - \arctan(y_2/x_2) & (x_2 < 0, y_2 \geq 0) \\ \pi + \arctan(y_2/x_2) & (x_2 < 0, y_2 \leq 0) \\ 2\pi - \arctan(y_2/x_2) & (x_2 > 0, y_2 \leq 0) \end{cases} \quad (15)$$

$$E_2 = \arcsin(z_2 / R) \quad (16)$$

再将其转换到雷达极坐标系坐标：

$$a_2 = \begin{cases} (90 - A_2) \times 180 / \pi & (0 \leq A_2 \leq 90) \\ (450 - A_2) \times 180 / \pi & (90 < A_2 < 450) \end{cases} \quad (17)$$

$$e_2 = E_2 \times 180 / \pi \quad (18)$$

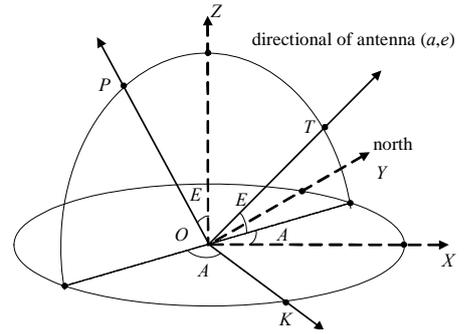


Fig.5 Coordinate relation of aerial direction angle  
图 5 天线指向空间坐标关系

2.4 算法优化方法

分析视景图像生成算法, 进行实现时运算量会很大, 主要有两轮循环以及旋转矩阵的计算, 可采取以下途径实现算法优化:

1) 利用视图上下、左右对称关系可将两轮循环的次数各降低 1/2, 使需要计算的像素数减少至原来的 1/4。其他像素点只需通过做关于平面对称的坐标变换就能求出, 运算量大大降低。采用此种方法可使计算量降低至原算法的近 1/4。

2) 将方位、俯仰角均为 0°时视景图像中每一个像素对应的指向值预先计算好, 并存储为一个起始指向矩阵, 在任意新的指向上计算时, 只需对起始指向矩阵进行整体旋转, 两次旋转变成为一次旋转, 计算量即可降低 1/2。

3) 算法实现时涉及到大量三角函数计算, 为提高算法运行效率, 将三角函数值预先计算好并存储为一个常量数组, 程序运行时以查表方式获得, 运算量可降低至原来的 7.7%。

经实际测试(测试配置环境如表 1 所示), 程序运行时的 CPU 占用率由优化前的 25%降低到了 13%, 能有效保证电视跟踪视景仿真中图像的连续性及实时性。

表 1 测试环境计算机配置表  
Table1 Computer configuration of testing environment

num	hardware	configuration
1	CPU	intel pentium D 2.8 GHz
2	memory	1 GB DDR2 667
3	video card	radeon X1300/X1550
4	hard disk	320 G 7200
5	network card	realtekRTL8139 10/100 M

3 仿真实现

电视跟踪视景仿真系统软件在 Visual C++6.0 环境下实现。全景图生成软件界面如图 6 所示, 可将采集到的全空域图像序列拼接成 1 张全景图像。

在生成视景图像时, 以指向角度为参数, 从全景图中提取对应的视景图像, 软件实现流程如图 7 所示。通过以上方法实现的视景仿真系统, 能够实时模拟雷达天线任意指向角时的电视跟踪视景图像, 图 8 中的 4 幅图为天线指向连续变化时, 电视跟踪视景仿真中的部分画面。从仿真结果看, 系统设计是可行的, 能满足模拟训练系统开发要求。

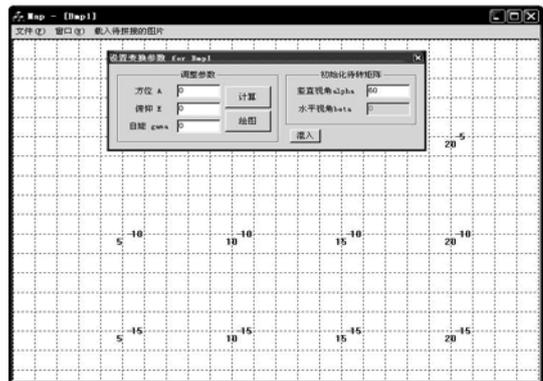


Fig.6 Software interface of panorama producing  
图 6 全景图生成软件界面

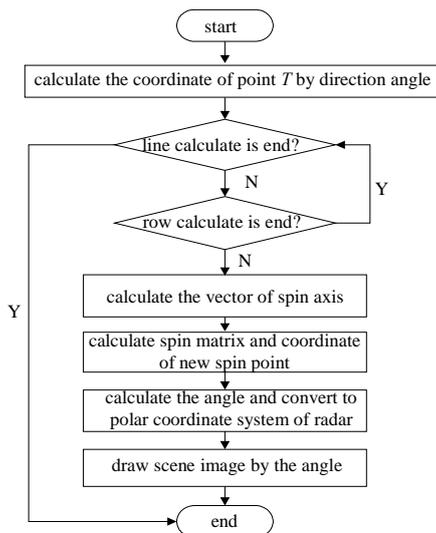


Fig.7 Flow chart of scene producing algorithm  
图 7 视景图像生成算法流程

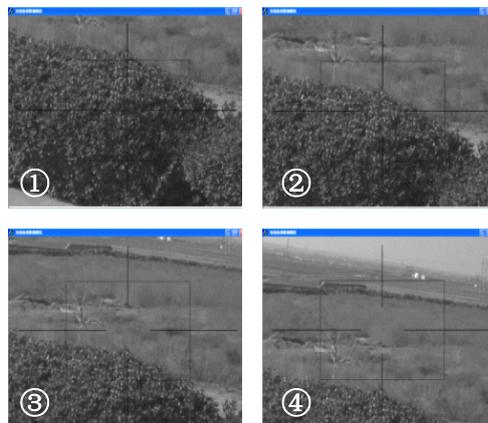


Fig.8 Emulation frames  
图 8 仿真画面

4 结论

传统的图形绘制技术均是面向几何造型技术<sup>[8]</sup>, 绘制过程涉及到复杂的建模、消隐和光亮度计算, 而计算机

所提供的计算能力往往不能满足复杂三维场景的实时绘制目的,基于图像绘制技术的应用解决了这一不足,利用普通照相器材和计算机通过图像拼接来获得全景图像较为经济,只要方法得当,可获得较高质量的全景图像。实际应用证明,序列图像技术在虚拟现实过程中充分体现了其优越性,能利用真实序列图像合成视景仿真中的场景,仿真效果逼真。

#### 参考文献:

- [1] 刘强,杨泽刚,王伟. 基于着色器的雷达显示系统模拟[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009,7(3):180-183. (LIU Qiang,YANG Zegang,WANG Wei. Simulation of radar display system based on pixel shader[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009,7(3):180-183.)
- [2] 李季,王春平,朱元昌. 电视跟踪系统视景仿真方法研究[J]. 计算机仿真, 2003,20(8):85-87. (LI Ji,WANG Chunping,ZHU Yuanchang. Study of Scene Simulation Method for TV Tracking System[J]. Computer Simulation, 2003,20(8):85-87.)
- [3] 殷润民,李伯虎,柴旭东. 虚拟现实中的基于图像绘制技术综述[J]. 系统仿真学报, 2007,19(19):4353-4357. (YIN Runmin,LI Bohu,CHAI Xudong. Image-based Rendering Techniques in Virtual Reality:A Survey[J]. Journal of System Simulation, 2007,19(19):4353-4357.)
- [4] 葛西旺. 基于图像绘制的虚拟环境构建及漫游技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007. (GE Xiwang. Research on Image-based Rendering Construction and Navigation in Virtual Environment[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2007.)
- [5] 唐黎莺. 大范围自由曲面图像拼接系统研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2007. (TANG Liying. A Study on scale free-form surface merging methods[D]. Hefei:Hefei University of Technology, 2007.)
- [6] 王海颖. 基于图像的虚拟漫游关键技术研究[D]. 北京:清华大学, 2010. (WANG Haiying. Research on Image-based Virtual Walkthrough[D]. Beijing:Tsinghua University, 2010.)
- [7] 潘云鹤,董金祥,陈德人. 计算机图形学—原理、方法及应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2003. (PAN Yunhe,DONG Jinxiang,CHEN Deren. Computer Graphics—Principle, method and application[M]. Beijing:Higher Education Press, 2003.)
- [8] 彭劲松,秦永元,严恭敏. OpenGL在雷达图像实时显示中的应用[J]. 兵工自动化, 2006,25(1):5-6. (PENG Jingsong,QIN Yongyuan,YAN Gongmin. Application of OpenGL in Radar Image for Real-Time Display[J]. Ordnance Industry Automation, 2006,25(1):5-6.)

#### 作者简介:



顾荣军(1978-),男,江苏省泰兴市人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达对抗及计算机仿真技术.email:gurj2002@sina.com.

王朴军(1972-),男,山西省绛县人,硕士,工程师,主要研究方向为电子对抗装备试验技术与应用。

王苗苗(1981-),女,山东省泰安市人,本科,工程师,主要研究方向为雷达对抗及计算机仿真技术。

周志增(1982-),男,安徽省巢湖市人,硕士,工程师,主要研究方向为雷达对抗及计算机仿真技术。