

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.12.027

## 搜索域自适应的蒙特卡洛单像空间后方交会方法

罗川<sup>1</sup>, 张征宇<sup>1,2</sup>, 王定祥<sup>3</sup>

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;  
3. 四川省比杰多媒体网络有限公司, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对在大角度摄影中, 光束平差法将导致外方位元素求解发散或收敛至局部最优解问题, 提出搜索域自适应的蒙特卡洛单像空间后方交会方法。通过建立蒙特卡洛搜索域与摄影角间的数学模型, 基于现有3个控制点的角锥体外方位元素初始值解法, 解得正确的外方位元素。实验与分析结果表明, 该方法稳定性好, 结果精度高, 适于解算大角度摄影下的外方位元素。

**关键词:** 摄影测量; 外方位元素; 蒙特卡洛法

**中图分类号:** TP273+.2; TP306 **文献标识码:** A

## Single Image Space Resection Method Based on Adaptive Search Domain Monte Carlo

Luo Chuan<sup>1</sup>, Zhang Zhengyu<sup>1,2</sup>, Wang Dingxiang<sup>3</sup>

(1. College of Information Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China;  
2. State Key Laboratory of Aerodynamics, Mianyang 621000, China;  
3. Bijie Multi-Media & Network Co., Ltd., Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In big rotation angle photogrammetry, the bundle method divergence or convergence to local optimal solution can not be avoided for solving exterior orientation, therefore the single image space resection method based on adaptive search domain Monte Carlo is presented. Establishing the mathematical model of Monte Carlo search area and photogrammetric angle, the correct exterior orientations are obtained based on the initial values produced by pyramid method of three control points, and its accuracy and stability have been demonstrated by several examples. Therefore it is suit to calculate exterior orientation for big rotation angle photogrammetry.

**Keywords:** photogrammetry; exterior orientation; Monte Carlo method

### 0 引言

随着数码摄像技术的迅猛发展, 非量测数码相机的分辨率和成像质量大幅度提高、价格不断降低。用一台非量测数码相机以自由摄影方式, 快速、柔性、低成本地获取被测对象的三维数据, 已成为坐标测量技术的研究热点, 颇具发展前景<sup>[1-2]</sup>。由于自由摄影的随意性将不可避免地产生大角度大重叠数字图像, 因此, 准确计算各次摄影的外方位元素对确保三维数据测量精度至关重要。另一方面, 为了得到准确的试验数据, 在高速风洞高速压实验条件下, 需要用摄影测量技术测量试验模型的变形, 以修正试验数据。因高速风洞的试验段的空间尺寸有限, 相机及其照明的安装位置受限, 双(多)相机大角度大重叠的近景摄影方式不可避免, 由于试验过程振动又较大, 同样需要高精度的大角度外方位元素解算技术<sup>[3]</sup>。

单像空间后方交会主要有3种方法: 基于直接

线性变换(Direct Linear Transformation, DLT)的解法、角锥法、光束平差解法。其中, 后2种方法需要外方位元素的初始值<sup>[4-8]</sup>, 若初始值不够准确, 不仅增加计算量, 还可能导致不收敛或收敛至局部最优解, 反之, 则可加速收敛, 减少迭代次数, 故初值的求解至关重要<sup>[4-9]</sup>。目前, 近景摄影外方位元素初始值求解主要方法为: 基于3控制点的角锥体法和基于6控制点的直接线性变换(DLT)法。

故针对DLT、角锥体法求解大角度外方位元素存在的问题, 提出搜索域自适应的蒙特卡洛外方位元素解法, 以取得正确的大角度外方位元素。

### 1 单像空间后方交合方法存在问题分析

#### 1.1 DLT 求解大角度外方位元素存在的问题

如图1,  $(X_s, Y_s, Z_s)$  为摄影中心S在世界坐标系O-XYZ中的坐标,  $(\varphi, \omega, k)$  分别为摄影中心S在世界坐标系O-XYZ中与X、Y、Z轴的夹

收稿日期: 2010-07-23; 修回日期: 2010-09-15

基金项目: 国家“973”计划课题“空气动力学国家重点实验室基金”(2009CB723802)

作者简介: 罗川(1983-), 男, 重庆人, 在读硕士生, 从事近景摄影测量研究。

角<sup>[4-6]</sup>。A、B、C 为摄影目标点，a、b、c 为目标点所对应的像点。

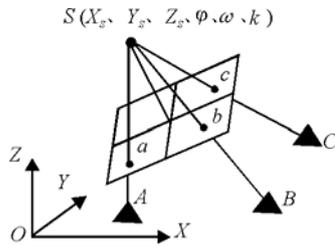


图 1 测量坐标系示意图

DLT 需要至少 6 个非共面控制点，并且该法的 11 个  $l$  系数<sup>[6]</sup>中除  $l_4$  与  $l_8$  外，其余 9 个的表达式分母中均含有  $\gamma_3$ ， $\gamma_3$  表达式如下：

$$\gamma_3 = -\sin \varphi \cos \omega X_s - \sin \omega Y_s + \cos \varphi \cos \omega Z_s \quad (1)$$

小角度摄影（如航空摄影）测量中  $\varphi$ 、 $\omega$  较小且  $Z_s \gg 0$ ，故  $\gamma_3 \gg 0$ ，这样就保证了  $l$  系数求解的稳定性。而在大角度大重叠摄影测量中，相机位置和摄影角度灵活多变，将出现  $\gamma_3$  趋于 0 的情况，如  $\varphi$  和  $\omega$  都为  $45^\circ$ 、摄影中心坐标为 (300, 353.5, 800)，

又如  $\varphi$  和  $\omega$  分别为  $60^\circ$  与  $30^\circ$ 、摄影中心坐标为 (500, 166.974 6, 1 200)，此时  $\gamma_3$  为零， $l$  系数舍入误差增大很多，导致数值计算得到不正确的解<sup>[9]</sup>，使用 DLT 求解大角度外方位元素受到限制。

### 1.2 角锥体法求解大角度外方位元素初值的问题

用角锥体法<sup>[4-5]</sup>求解角元素初始值时，先将 3 控制点的重心点沿其所在平面的法线  $\vec{l}$  平移给定距离得到一新的空间点  $P_1$ ，再将世界坐标原点和像空间原点均移至点  $P_1$ ，由于只进行平移，所以两坐标原点移至点  $P_1$  的旋转矩阵值相同，从而求解出旋转矩阵。在大角度摄影时由于角锥体顶点（摄影中心）与  $\vec{l}$  距离大，造成求解的初值不准确，实例数据详见表 1。

光束平差法采用泰勒展开取一次项线性化的方法进行迭代求解，由泰勒展开公式可知，若初始值偏离真实值太远，舍去二次及高阶小项后，解得的改正数误差较大，往往导致光束平差法不收敛或收敛至局部最优解<sup>[10]</sup>。

表 1 3 种求解方法相关数据表（解法 1 为光束平差解法、解法 2 为蒙特卡洛解法（B=10）、解法 3 为本文算法）

照片号	解法	$X_s/\text{mm}$	$Y_s/\text{mm}$	$Z_s/\text{mm}$	$\varphi/\text{arc}$	$\omega/\text{arc}$	$k/\text{arc}$	相对误差%
1	初始值	233.150 1	55.125 46	1 658.339	-0.124 125	-0.072 963 4	1.618 956 14	0.059 37%
	解法 1	230.248 6	58.168 75	1 662.629	-0.124 137	-0.074 602 89	1.641 469	$6.55 \times 10^{-6}\%$
	解法 2	231.896 021	57.950 405 8	1 662.501 33	-0.124 563 97	-0.074 685 22	1.641 421	$6.55 \times 10^{-6}\%$
	解法 3	231.880 081 1	58.150 405 8	1 662.401 24	-0.125 114 575	-0.074 585 2	1.641 421	$6.55 \times 10^{-6}\%$
2	初始值	-1 070.615	42.591 2	1 201.505	0.625 133 4	-0.053 180 23	-1.394 368 9	1.976%
	解法 1	-1 097.627	66.791 5	1 467.221	0.615 632	-0.060 854 6	-1.501 158	3.21%
	解法 2	-963.887 14	48.118 074 1	1 217.187 63	0.581 983 102	-0.047 330 79	-1.456 801 3	7.835 3%
	解法 3	-1 220.516 84	37.951 805 1	1 305.505 24	0.715 122 938 1	-0.051 229 67	-1.557 659 0	$4.12 \times 10^{-6}\%$
3	初始值	181.234 6	-625.193	1 456.684 3	-0.129 637 5	0.435 445 4	-1.326 187	0.745%
	解法 1	177.623 413	-622.090 02	1 462.522 46	-0.131 995 27	0.475 445 389	-1.536 197 7	$1.39 \times 10^{-6}\%$
	解法 2	177.623 413	-622.090 02	1 462.522 46	-0.131 995 27	0.475 445 389	-1.536 197 7	$1.39 \times 10^{-6}\%$
	解法 3	177.623 413	-622.090 02	1 462.522 46	-0.131 995 27	0.475 445 389	-1.536 197 7	$1.39 \times 10^{-6}\%$
4	初始值	-768.289 6	366.723 1	1 593.617	0.340 666 1	-0.251 686 9	0.067 593 54	1.020 1%
	解法 1	-715.075 511	384.482 885	1 571.588 74	0.328 632 911	-0.225 259 087	0.070 345 33	$1.62 \times 10^{-6}\%$
	解法 2	-715.075 511	384.482 885	1 571.588 74	0.328 632 911	-0.225 259 087	0.070 345 33	$1.62 \times 10^{-6}\%$
	解法 3	-715.075 511	384.482 885	1 571.588 74	0.328 632 911	-0.225 259 087	0.070 345 33	$1.62 \times 10^{-6}\%$
5	初始值	-123.563 4	-113.265 9	1 640.176	0.041 674 2	0.003 690 12	0.059 781 3	$1.78 \times 10^{-4}\%$
	解法 1	-124.094 2	-112.844 9	1 641.224	0.042 628 5	0.003 781 535	0.060 349 85	$2.46 \times 10^{-5}\%$
	解法 2	-124.094 2	-112.844 9	1 641.224	0.042 628 5	0.003 781 535	0.060 349 85	$2.46 \times 10^{-5}\%$
	解法 3	-124.094 2	-112.844 9	1 641.224	0.042 628 5	0.003 781 535	0.060 349 85	$2.46 \times 10^{-5}\%$
6	初始值	-238.771 2	-923.17	1 413.486	0.109 278 5	0.494 733	1.495 574	2.982%
	解法 1	-279.668 9	-1 145.193	1 657.389	0.120 235	0.574 968	1.429 986	2.13%
	解法 2	-181.889 563	-928.736 54	1 337.897 45	0.136 548 792	0.396 254 107	1.211 184 96	17.09%
	解法 3	-236.370 819	-1 026.120 4	1 507.485 83	0.115 728 773	0.565 676 927	1.495 577 21	$7.17 \times 10^{-6}\%$
7	初始值	-1 261.270 7	185.586 4	1 373.951	0.656 078 2	-0.135 628 1	0.006 354 025	1.338 9%
	解法 1	-1 293.005 98	111.197 090	1 356.285 76	0.658 890 783	-0.085 321 001	0.009 289 53	$1.06 \times 10^{-6}\%$
	解法 2	-1 293.005 98	111.197 090	1 356.285 76	0.658 890 783	-0.085 321 001	0.009 289 53	$1.06 \times 10^{-6}\%$
	解法 3	-1 293.005 98	111.197 090	1 356.285 76	0.658 890 783	-0.085 321 001	0.009 289 53	$1.06 \times 10^{-6}\%$

续表

照片号	解法	Xs/mm	Ys/mm	Zs/mm	$\varphi$ /arc	$\omega$ /arc	k/arc	相对误差%
8	初始值	-4 031.476	-670.715	598.125	1.552 61	0.587 452	-3.128 745	27.16%
	解法 1	-2 519.639	-709.115 2	1 203.996 3	1.496 832 96	0.671 235 4	-2.796 3	13.75%
	解法 2	-2 896.115	-700.659	800.965 4	1.566 391 523	0.774 53 6	-2.105 69	10.65%
	解法 3	-3 221.938	-1 289.349	674.861 7	1.233 275 126	0.980 318 9	-2.695 367	$2.71 \times 10^{-6}$ %
9	初始值	1 185.745	1 027.113	-645.963	-0.408 563 2	0.577 523	0.503 37	25.114 7%
	解法 1	1 569.389	-846.365 9	704.639	-0.117 365 9	0.336 958 2	0.963 42	5.56%
	解法 2	972.642	-644.495 6	1 446.086 8	-0.308 050 5	0.224 056 3	0.730 73	$5.56 \times 10^{-6}$ %
	解法 3	972.642	-644.495 6	1 446.086 8	-0.308 050 5	0.224 056 3	0.730 73	$5.56 \times 10^{-6}$ %
10	初始值	52.787 9	468.621	1 307.631	0.453 691	0.398 412	-1.785 69	22.784%
	解法 1	-479.78	-1 488.966	1 894.125	0.671 296 3	0.895 582 3	-2.085 63	0.017%
	解法 2	-70.467 8	-896.166	1 207.234 6	0.578 915	0.963 21	-2.553 6	17.42%
	解法 3	-483.935	-1 489.733	1 892.551 5	0.654 263 9	0.874 117 3	-2.017 315	$1.74 \times 10^{-5}$ %
11	初始值	-448.989 2	-201.339	1 962.415	0.454 896 3	0.055 369	-2.045 696 3	12.33%
	解法 1	-590.528 9	-154.369 2	1 758.250 1	0.479 963	0.184 639 2	-2.536 39	2.25%
	解法 2	-558.578 7	-157.594 5	1 515.805	0.351 670 5	0.085 093 45	-2.436 069	$2.21 \times 10^{-6}$ %
	解法 3	-558.578 7	-157.594 5	1 515.805	0.351 670 5	0.085 093 45	-2.436 069	$2.21 \times 10^{-6}$ %

角锥体法也采用基于泰勒展开取一次项线性化的方法迭代求解外方位直线元素, 当直线元素初值不准确时, 同样也导致迭代不收敛或收敛至局部最优解。

## 2 搜索域自适应的蒙特卡洛单像后方交会

蒙特卡洛法适应性强、收敛性与问题维数无关, 原理及程序简单, 该方法能提高计算的可靠性, 结果更为稳定; 但是其收敛速度和结果精度与其搜索域 (具体参见表 1) 密切相关<sup>[11-12]</sup>。故笔者提出蒙特卡洛法的搜索域对摄影角度的自适应思想, 即建立搜索域大小 B 与外方位元素最大角度间的数学模型, 以便根据摄影角度自动确定最佳搜索域。

根据蒙特卡洛法原理, 搜索域 B 的定义<sup>[11-12]</sup>为: 用于反复产生均匀分布的随机数的区间[-B,B], 其中 B>0。

具体建模方法如下:

1) 对蒙特卡洛方法的搜索域进行大量的试验。数据如表 2。

表 2 搜索域 B 与最大角  $\alpha$  的关系

搜索域 B	最大角 $\alpha$ /arc	搜索域 B	最大角 $\alpha$ /arc	搜索域 B	最大角 $\alpha$ /arc
0.6	0.037 6	10	0.254 1	60	0.576 9
1.4	0.085 2	30	0.374 6	80	0.606 7
1.9	0.125 3	40	0.475 6	120	0.747 9

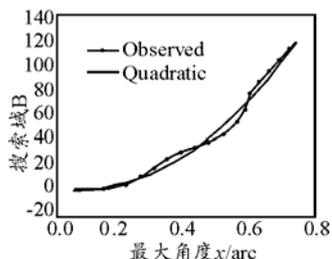


图 2 外方位元素最大角度与搜索域 B 的关系图

2) 采用美国商用统计分析软件 (Statistics

Package for Social Scienc11.5, SPSSe11.5) 对表 2 中搜索域 B 与外方位元素最大角度进行非线性回归分析。如图 2, X 轴表示摄影角度 ( $\varphi, \omega, k$ ) 中的最大角, Y 轴表示最大摄影角度所对应的蒙特卡洛法的搜索域 B, “—” 线为观察曲线, 根据观察曲线的形态, 选择 Quadratic 函数拟合得到:

$$B = 256.433x^2 - 35.932x + 2.436 9 \quad (2)$$

式 (2) 即为蒙特卡洛法的搜索域 B 与外方位元素最大角度间的映射模型, 图 2 中 “—” 线为根据观察曲线得到的均方逼近曲线。

以现有 3 个控制点的角锥体法求得初始值, 按照式 (2) 即可得到搜索域 B, 最后利用该蒙特卡洛算法解共线方程得到外方位元素。

## 3 实验验证与精度分析

文中算法已用 Microsoft Visual Studio 2005 的 C#语言实现, 表 1 与表 3 的数据都来源于 Nikon D80 定焦数码相机 (分辨率为 3 872×2 592, 感光元件尺寸为 23.6 mm×15.8 mm) 实际采集的图像, 表 1 中的相对误差由下式计算:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{R} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon$  为相对误差,  $\Delta l$  为像点残差 (像点真实值与计算值之差) 的最大值, R 为 CCD 对角线的长度。如图 3, 因篇幅有限仅举出了表 3 中 4 幅角度较大的照片。表 3 中 X、Y、Z 和 x、y 分别为控制点世界坐标和像平面坐标, 控制点编号 (从上到下) 分别是: 1 号到 7 号照片控制点号为 8、10、9 号, 8 号照片控制点号为 166、162、147, 9 号照片控制点为 4、1、3、10 号照片控制点号为 4、3、2、11 号照片控制点号为 4、6、2。

表 3 所选控制点世界坐标及像平面坐标信息

照片号	X/mm	Y/mm	Z/mm	x/mm	y/mm
1	-61.284	-519.79	72.003	-6.509 3	1.805 4
	455.377	-35.841	34.11	-0.082 5	-6.423
	-61.386	395.299	9.666	6.791 48	0.757 6
2	-61.284	-519.79	72.003	6.583 80	0.841 5
	455.377	-35.841	34.11	-0.303 5	5.033 6
	-61.386	395.299	9.666	-6.224 1	0.437 5
3	-61.284	-519.790	72.003	10.191 8	-1.346 7
	455.377	-35.841	34.11	2.025 40	7.373 57
	-61.386	395.299	9.666	-3.143 2	-0.510 01
4	-61.284	-519.79	72.003	1.314 76	-7.040 99
	455.377	-35.841	34.11	7.785 78	-0.552 41
	-61.386	395.299	9.666	2.066 52	5.529 92
5	-61.284	-519.79	72.003	-0.443 8	-6.300 59
	455.377	-35.841	34.11	7.562 23	0.588 76
	-61.386	395.299	9.666	0.343 69	7.362 52
6	-61.284	-519.79	72.003	-5.565 4	-0.551 03
	455.377	-35.841	34.11	0.623 04	-6.738 54
	-61.386	395.299	9.666	4.607 66	0.337 07
7	-61.284	-519.79	72.003	2.419 31	-6.335 4
	455.377	-35.841	34.11	6.486 97	0.322 31
	-61.386	395.299	9.666	2.059 31	5.861 28
8	-820.312	881.564	-75.05	2.252 81	6.231 38
	-1 576.389	817.604	-655.2	7.123 05	1.081 72
	-1 116.027	723.697	-666.2	7.140 85	4.486 28
9	97.338	-131.731	51.696	-3.007 19	5.510 87
	62.113	-5.773	42.401	-2.138 81	6.881 31
	-55.378	-38.254	44.721	-3.624 21	7.416 42
10	97.338	-131.731	51.696	8.201 99	-4.023 31
	-55.378	-38.254	44.721	7.491 78	-5.809 81
	-115.811	-55.787	46.063	7.668 73	-6.461 81
11	97.338	-131.731	51.696	-0.200 52	2.347 5
	25.766	123.351 1	31.949	-1.818 1	-1.275 1
	-115.811	-55.787	46.063	1.370 06	-0.575 7

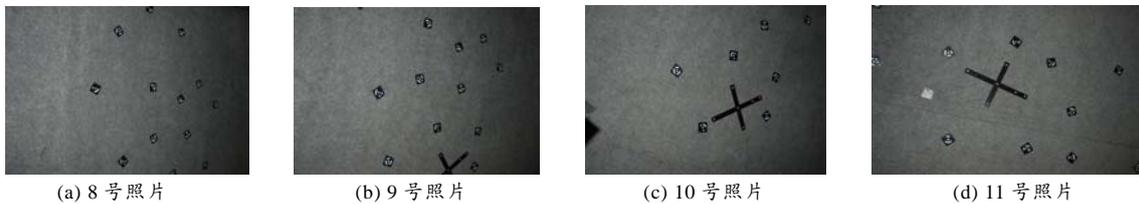


图 3 表 1 与表 3 中的摄影角度较大的 4 幅照片

如表 1，现有 3 控制点的角锥体法求得的初始值精度随着摄影角度  $\varphi$  或  $w$  增加而降低，当  $\varphi$  和  $w$  小于  $28^\circ$  时（表 1 中 1 号、3 号、4 号、5 号照片），现有角锥体法外方位元素初始值相对误差小于 1.8%；但随着  $\varphi$  或  $w$  的增大初始值相对误差增加，特别当角度达到  $71^\circ$  时（表 1 中 8 号照片）初始值相对误差已达 27.16%。

当初始值的相对误差小于 1.8% 时，光束平差法、蒙特卡洛法与文中算法均能得到正确解。如表 1，随着角度的增大，初始值相对误差变大时，光束平差法、蒙特卡洛法均收敛至局部最优解，而文中算法仍能得到正确解。

由此可见：1) 光束平差法对初始值精度依赖性较强；蒙特卡洛法在初始值精度不高时如果不能选择好适应的搜索域，同样得不到正确的解；文中算法能在初始值相对误差达到 27.16%（8 号照片）仍得到正确解；2) 与光束平差法和蒙特卡洛法相比，

文中算法对外方位元素初始值精度依赖性弱；即使在大角度摄影情况下（现有 3 控制点的角锥体法求得的外方位元素初始值相对误差达 27.16%）时，仍然保持了小角度下光束平差法和蒙特卡洛法的解算结果精度（相对误差小于  $2.46 \times 10^{-5}$ ）。

### 4 结论

与光束平差法和蒙特卡洛法相比，该方法对外方位元素初始值精度依赖性弱；在大角度摄影下仍然能取得小角度光束平差法的解算结果精度，尤其适于在高速风洞高速压实验条件测量试验模型的变形时解算外方位元素，具有一定的实用价值。

### 参考文献：

[1] 丁志安, 张丽艳. 基于单数码相机的三维结构测量[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007: 2-7.  
 [2] 郝继贵, 叶声华. 基于近景数字摄影的坐标精密测量关键技术研究[J]. 计量学报, 2005(7): 207-211.

(下转第 96 页)

```
Targetcut = False
Ourcomand = 49
```

Case 50

```
Dim tarpos As D3DVECTOR
Targetcut = True
Planetarget.GetPosition Nothing,tarpos
tarposy = tatpos.Y
tarposx = tatpos.X
tarposz = tatpos.Z
Ourcomand = 50
```

End Select

### 3 总结

系统运行结果表明,该系统可以逼真的模拟 X 型遥控模拟飞机的飞行操控动作,供操纵手进行模拟仿真训练,可以提高 X 型遥控模拟飞机操纵手的飞行操控训练水平,对实际训练有一定应用价值。

\*\*\*\*\*

(上接第 90 页)

[3] Danny A Barrows. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Applications[J]. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 2007: 8-11. Reno, NV, United States, AIAA Paper 2007: 60-63.

[4] 李广云, 黄桂平. 数字工业摄影测量中的单像空间后方交会[J]. 测绘通报, 2008(6): 4-6.

[5] 黄桂平, 叶声华, 李广云. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.

[6] 冯文灏. 近景摄影测量—物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.

[7] 武汉大学测绘学院. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005: 57-64.

[8] 陈义, 陆珏, 郑波. 近景摄影测量中大角度问题的探讨[J]. 测绘学报, 2008(11): 458-463.

[9] 丁丽娟, 程杞元. 数值计算方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.

[10] 刘国林. 非线性最小二乘与测量平差[M]. 北京: 测绘出版社, 2004: 177-192.

[11] 金畅, 夏尊铨. 蒙特卡洛方法中随机数发生器和随机抽样方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.

[12] Alexander, F. J., Garcia, A. L. The direct simulation of Monte Carlo method[M]. United States:Computers in Physics, 1997: 211-288.

\*\*\*\*\*

(上接第 92 页)

```
CString szStaConfig = g_3DMain.GetExePath();
//初始化三维静态目标,
szStaConfig += "\\Ini\\StaticModel.ini";
CString szPath = g_3DMain.GetExePath();
//初始化动态目标
```

### 参考文献:

[1] 王志辉. 飞行三维仿真系统关键技术研究(硕士学位论文)[D]. 长春: 吉林大学, 2005.

[2] 茅忠明, 王行骏, 陈玮. 基于 DirectX 软件包进行三维图形的开发应用[J]. 上海理工大学学报, 2002, 24(1): 49-50.

[3] Robers Chell A, Dessouky Yasser M. An Overview of Object-Oriented Simulation. Simulation, 1998, 70(6): 359-368.

[4] Moler T.A fast triangle-triangle intersection test. Journal of Graphics Tools, 1997, 2(2): 25-30.

[5] Menendez R G, Bernard J E. Flight simulation in synthetic environments. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2001, 16(9): 19-23.

[6] 方忆湘, 曹慧琴, 黄凤山, 等. 在 VB 中使用 DirectX-3D 处理三维图形. 河北科技大学学报, 2002, 23(3): 74-76.

[7] 王明福, 齐治文. 基于 DirectX 的游戏动画技术研究. 计算机工程与设计, 2005, 26(4): 940-943.

```
szPath += "\\model\\DynamicModel.scn
CString szPath51 = g_3DMain.GetExePath();
//初始化打击目标
szPath51 += "\\model\\Task.scn";
作战模拟训练演示截图如图 7。
```

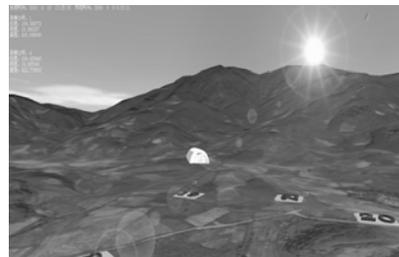


图 7 作战模拟训练演示截图

### 4 结束语

该系统能满足模拟作战训练的实时性要求,在逼真度和交互性等方面效果良好,可为实际作战训练中提高指挥人员的指挥决策能力和统筹协调能力提供重要帮助。

### 参考文献:

[1] 张亮. 基于 VR 技术的三维 GIS 试验系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

[2] 熊介. 椭球大地测量[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.

[3] George Shepherd, 等. Visual C++.NET 技术内幕[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[4] 戴雪峰. 基于 PC 的三维场景反坦克导弹模拟训练系统[J]. 兵工自动化, 2005.

[5] 董良东, 李靖. 多线程技术在火控雷达模拟训练系统中的应用[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 37-40.