景像匹配误匹配点的剔除算法

黄锡山 陈慧津 陈 哲
(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要 景像匹配过程的复杂性不可避免地会产生误匹配点. 基于巡航导弹机动性能的规律，巡航导弹飞越一个匹配区得到的各个匹配点的拟合曲线具有一定的变化规律. 据此，提出了景像匹配误匹配点剔除的 3 种算法：(1) 基于匹配点拟合曲线曲率较小的算法；(2) 基于匹配点拟合曲线为直线的算法；(3) 利用惯性导航短时间测量距离的精确性剔除误匹配点的方法. 采用试飞试验数据对这 3 种算法进行仿真验证的结果表明，这 3 种算法在相应条件下，均能有效地剔除误匹配点，并能满足景像匹配实时性的要求.

关键词 景像匹配 误匹配点 拟合曲线

中图法分类号：TP391.41 **文献标识码**：A **文章编号**：1006-8961(2002)08-0783-05

Algorithms of Eliminating the Mismatching Points in Scene Matching Guidance System

HUANG Xi-shan, CHEN Hui-jin, CHEN Zhe
(*School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083)

Abstract Mismatching points are inevitable in scene matching because of the complexity of the matching conditions. In order to improve the reliability of scene matching guidance system, it is necessary to develop the methods of automatic recognition and elimination of the mismatching points. Due to the limitations of the aircraft maneuverability, the flight paths are rather smooth, and sometimes are linear, especially during the process of scene matching. So the relationships among the correct matching points in one matching area are regular. Three algorithms are developed according to the changing regulation of the fitting curve of matching points. The three algorithms are as follows: (1) on the basis of small curvature of the fitting curve of the matching points; (2) on the basis of the linear curve generated by the matching points; (3) taking advantage of the accuracy of the distance-measurement accuracy of INS in short period of time. These three algorithms are tested by the data gained in flight-test, and the results show that, all of the three algorithms can distinguish and eliminate the mismatching points effectively and can meet the need of real-time ability of the matching system, though the real-time ability, adaptability and reliability are somewhat different. The proper algorithm should be selected according to the practice conditions in flight, and algorithms (1) and (3) or algorithms (2) and (3) can be fused according to the matching conditions to improve the eliminating trustability of the mismatching points.

Keywords Scene matching, Mismatching point, Fitting curve

0 引 言

由于景像匹配的计算量较大，以往导弹飞越一个匹配区时，只能完成数次匹配(如战斧巡航导弹 Tomahawk BGM-109C 飞越两个匹配区，每个匹配区完成 3 次匹配[1]). 目前见到的景像匹配算法大都是研究如何提高单个匹配点的可靠性及匹配精度等性能指标的，而这些算法不可避免地会产生误匹配点，从而影响导弹命中目标的可靠性. 随着计算机处理速度的飞速发展，导弹飞越一个匹配区已能够获得较多个匹配点，如何利用这些匹配点自身或引入其他限制条件来剔除其中的误匹配点，提高命中目标的可靠性，成为一个重要的研究课题. 根据导弹机动性能的局限性或导

基金项目：航空基础科学资助项目(99E51018)
收稿日期：2001-08-10；改回日期：2001-12-17

弹上装备的惯导系统短时间测量距离的精确性，在此提出了剔除误匹配点的3种有效方法.

1 误匹配点的剔除原理及算法实现

假设飞行器飞越一个匹配区共进行了 $n+1$ 次匹配，$n+1$ 次匹配的时刻分别为 $t_0,t_1,\cdots,t_n$；采用任一匹配算法获得 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 时刻的匹配点分别为 $P_0(x_0,y_0),P_1(x_1,y_1),\cdots,P_n(x_n,y_n)$.

1.1 算法1 飞行轨迹曲率不大时误匹配点的剔除

准则1 由 $n+1$ 个匹配点 $P_0(x_0,y_0),P_1(x_1,y_1),\cdots,P_n(x_n,y_n)$ 拟合得到的飞行轨迹曲率最大值大于给定阈值时，则离该曲率最大值最近的匹配点为误匹配点，予以剔除.

由于一般飞行器的机动性能有限，所以其飞行轨迹应是比较平滑的，即其曲率不会很大. 因此，如果 $P_0(x_0,y_0),P_1(x_1,y_1),\cdots,P_n(x_n,y_n)$ 是正确匹配点，则由其拟合得到的曲线曲率不会很大. 采用三次样条插值方法，设 $y=s(x)$ 为各匹配点纵、横坐标 (y,x) 的拟合曲线，由三弯矩法，容易得到

$$\gamma_i s''(x_{i-1})+2s''(x_i)+\alpha_i s''(x_{i+1})=\beta_i \quad i=1,2,\cdots,n-1 \tag{1}$$

式中，$\alpha_i=\dfrac{x_{i+1}-x_i}{x_{i+1}-x_{i-1}}$，$\gamma_i=\dfrac{x_i-x_{i-1}}{x_{i+1}-x_{i-1}}$

$$\beta_i=\frac{6}{x_{i+1}-x_{i-1}}\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}-\frac{y_i-y_{i-1}}{x_i-x_{i-1}}\right).$$

由于式(1)中 $s''(x_0)$，$s''(x_1)$，$\cdots$，$s''(x_n)$ 总共有 $n+1$ 个变量，而方程数只有 $n-1$ 个，因此需增加两个边界条件方程，这里增加的是自然样条边界条件，即

$$\begin{cases} s''(x_0)=0 \\ s''(x_n)=0 \end{cases} \tag{2}$$

由式(1)、(2)联立的 $n+1$ 个方程即可求出 $s''(x_0)$，$s''(x_1),\cdots,s''(x_n)$. 根据方程

$$s(x)=\frac{s''(x_i)}{6h_i}(x-x_{i-1})^3+\left(\frac{y_i}{h_i}-\frac{s''(x_i)}{6}h_i\right)(x-x_{i-1})+\frac{s''(x_{i-1})}{6h_i}(x_i-x)^3+\left(\frac{y_{i-1}}{h_i}-\frac{s''(x_{i-1})}{6}h_i\right)(x_i-x) \tag{3}$$

$$s'(x)=-\frac{s''(x_{i-1})}{2h_i}(x_i-x)^2+\frac{s''(x_i)}{2h_i}(x-x_{i-1})^2+\frac{y_i-y_{i-1}}{h_i}-\frac{h_i}{6}(s''(x_i)-s''(x_{i-1})) \tag{4}$$

和

$$s''(x)=\frac{s''(x_{i-1})}{h_i}(x_i-x)+\frac{s''(x_i)}{h_i}(x-x_{i-1}) \tag{5}$$

式中，$x_{i-1}<x<x_i,i=1,2,\cdots,n$.

即可求出飞行轨迹任一点处的函数值及其一、二阶导数. 由曲线的曲率定义

$$K(x)=\frac{|s''(x)|}{(1+s'(x)^2)^{3/2}} \tag{6}$$

即可求出拟合曲线任一点处的曲率 $K(x)$，$x\in[x_0,x_n]$. 根据曲率不能太大的原则，如果计算所得拟合曲线曲率的最大值大于预先给定的阈值，则认为匹配点横坐标与拟合曲线曲率最大值对应的横坐标的距离最近的匹配点为误匹配点，剔除该匹配点；重新计算剩余的 n 个匹配点处的曲率，并重新确定是否有误匹配点；如此反复，直至剩余的所有匹配点拟合曲线的曲率均小于预先给定的最大曲率为止，则剩余的匹配点为正确匹配点.

算法步骤可归纳如下：

(1) 计算拟合曲线及其一、二阶导数；

(2) 计算拟合曲线的曲率最大值 $K(x_m)$；

(3) 判断：如果 $K(x_m)$ 大于飞行器机动性能所能做出的轨迹曲率，则按如前所述方法剔除该误匹配点，而将剩余的匹配点数目减1，即 $n=n-1$，并重复执行步骤1、2、3；否则，认为剩余各匹配点均为正确匹配点，结束.

1.2 算法2 飞行轨迹近似为直线时误匹配点的剔除

准则2 当飞行器在匹配区内近似直线飞行时，若 $P_0(x_0,y_0),P_1(x_1,y_1),\cdots,P_n(x_n,y_n)$ 所有匹配点到由这些匹配点拟合得到的飞行轨迹直线的距离的最大值大于给定阈值，则相应的匹配点为误匹配点，予以剔除.

通常飞行器在匹配区内的飞行轨迹可近似为一直线，因此可以引入限制条件，即如果 $P_0(x_0,y_0)$，$P_1(x_1,y_1),\cdots,P_n(x_n,y_n)$ 是正确匹配点，则由其拟合得到的曲线应为一直线. 设拟合直线为 $y=c_1+c_2x$，根据最小二乘准则，

(1) 若 $x_0=x_1=\cdots=x_n$ 不成立，易得

$$c_2=\frac{(x_0y_0+x_1y_1+\cdots+x_ny_n)-\dfrac{x_0+x_1+\cdots+x_n}{n+1}}{(x_0^2+x_1^2+\cdots+x_n^2)-\dfrac{(x_0+x_1+\cdots+x_n)^2}{n+1}} \tag{7}$$

$$c_1=\frac{(y_0+y_1+\cdots+y_n)-(x_0+x_1+\cdots+x_n)c_2}{n}$$

不难求出任一匹配点 $P(x_m,y_m)$，$m\in[0,n]$ 到该拟合直线 $y=c_1+c_2x$ 的垂直距离 D_m 为

$$D_m=\sqrt{\frac{(y_m-c_2x_m-c_1)^2}{1+c_2^2}},m=0,1,\cdots,n \tag{8}$$

如果 D_m 的最大值 $D_{\max}=\max\{D_m,m=0,1,\cdots,n\}$ 大于预先给定的阈值，则认为相应的匹配点为误匹配

点，予以剔除；然后重新计算剩余的 n 个匹配点到这 n 个匹配点的拟合直线的距离，并重新确定是否有误匹配点；如此反复，直至剩余的所有匹配点到拟合直线的距离均小于给定阈值为止.

(2)若 $x_0=x_1=\cdots=x_n$ 成立，则拟合直线为一平行于 y 轴的直线 $x=X$，$X=x_0=x_1=\cdots=x_n$，任一匹配点 $P(x_m,y_m)$，$m\in[0,n]$都在拟合直线上.

准则 3　所有时间相邻的两个匹配点之间的相对位置矢量方向相同.

根据准则 2 对误匹配点进行剔除之后，求取剩余的每一匹配点与其前一时刻匹配点之间的相对位置矢量方向，根据准则 3 进一步剔除误匹配点，剩余的匹配点即为正确匹配点.

算法步骤可归纳如下：

(1) 若 $x_0=x_1=\cdots=x_n$ 成立，则所有匹配点都在一条直线上，执行步骤 5.

(2) 若 $x_0=x_1=\cdots=x_n$ 不成立，则求匹配点 $P_0(x_0,y_0)$，$P_1(x_1,y_1)$，$\cdots$，$P_n(x_n,y_n)$的拟合直线.

(3) 求所有匹配点到拟合直线的距离 D_m，$m=0,1,\cdots n$.

(4) 求 $D_{\max}=\max\{D_m,m=0,1,\cdots,n\}$ 及与 $D_{\max}$对应的匹配点. d 为预先给定的最大匹配误差，若 $D_{\max}>d$，则认为对应的匹配点为误匹配点，予以剔除，而剩余的匹配点数目减 1，即 $n=n-1$，并重复执行步骤 2、3、4；否则，执行步骤 5.

(5) 求取剩余的每一匹配点与其前一时刻匹配点之间的相对位置矢量方向(总共有 2 个相对的方向)，剔除矢量方向占少数的匹配点，剩余的矢量方向占多数的匹配点即为正确匹配点，结束.

1.3　算法 3 利用惯导短时间测量距离的精确性剔除误匹配点

准则 4　相邻两个匹配点之间的相对位置应等于惯导系统测量对应的相对位置. 否则，其中必有一个是误匹配点.

1.3.1　算法原理

对于任意一种匹配算法，其匹配点的选取都是以相似度大小为准则[2]. 一般认为相似度最大的点为正确匹配点，但当实时图象受到外界环境干扰较大时，相似度最大的点可能不是正确匹配点. 实验证明，此时在正确匹配点处，实时图与基准图的相似度虽然不是最大，但通常仍然是局部极大值点，并接近最大值. 据此，选取任意一种匹配算法所得的相似度值为局部极大值的所有点作为准匹配点，然后根据如下所述方法剔除误匹配点.

设 $m_0,\cdots,m_i,m_{i+1},\cdots,m_n$ 分别为在 $t_0,\cdots,t_i,t_{i+1},\cdots,t_n$ 时刻进行的 $n+1$ 次匹配所得的准匹配点数目，各时刻的准匹配点分别为 $P_{0,1},P_{0,2},\cdots,P_{0,m_0},\cdots,P_{i,1},P_{i,2},\cdots,P_{i,m_i},P_{i+1,1},P_{i+1,2},\cdots,P_{i+1,m_{i+1}},\cdots,P_{n,1},P_{n,2},\cdots,P_{n,m_n}$，则 t_i 时刻任一准匹配点 $P_{i,j}$，$j\in[1,m_i]$和 t_{i+1}时刻任一准匹配点 $P_{i+1,k}$，$k\in[1,m_{i+1}]$之间的距离以复数表示为

$$D_{i,j,k}=(x_{i+1,k}-x_{i,j})+\mathrm{i}(y_{i+1,k}-y_{i,j})$$

设惯导系统测得的飞行器从 t_i 时刻到 t_{i+1}时刻的飞行距离以复数表示为 $D_i=\Delta x_i+\mathrm{i}\Delta y_i$，由惯导短时间测量距离的精确性可知 t_i 时刻到 t_{i+1}时刻正确匹配点之间的距离以复数表示应为 D_i，即

$$x_{i+1,k}-x_{i,j}=\Delta x_i,\ y_{i+1,k}-y_{i,j}=\Delta y_i$$

因此，对于 t_i 时刻任一准匹配点 $P_{i,j}$，$j\in[1,m_i]$，如果 $P_{i,j}$到 t_{i+1}时刻的所有准匹配点 $P_{i+1,k}$，$k=1,2,\cdots,m_{i+1}$的距离不满足

$$|x_{i+1,k}-x_{i,j}-\Delta x_i|<d_x\quad 或$$
$$|y_{i+1,k}-y_{i,j}-\Delta y_i|<d_y\tag{9}$$

式中，d_x、d_y 分别为预先给定的 x 和 y 方向的最大匹配误差，则认为该匹配点为误匹配点，予以剔除；同样，如果 $P_{i+1,k}$，$k\in[1,m_{m+1}]$到 t_i 时刻的所有准匹配点之间的距离不满足

$$|x_{i,j}-x_{i+1,k}-\Delta x_i|<d_x\quad 或$$
$$|y_{i,j}-y_{i+1,k}-\Delta y_i|<d_y\tag{10}$$

则认为 $P_{i+1,k}$为误匹配点，予以剔除. 如此反复执行上述步骤，即可得到 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 每一时刻所剩余的唯一准匹配点，即正确匹配点. 实际试飞实验仿真验证，以上原理有两种特殊情况：一是 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 每一时刻所剩余的准匹配点多于一个，这种情况是由于飞行器飞越的匹配区图象与另一区域图象很相似造成的，通过延长匹配航线区域即可解决该问题；二是部分时刻剩余的准匹配点数目为零，这种情况是由于干扰太大，正确匹配点处的相似度值不是局部极大值，此种情况比较复杂，很难求出正确匹配点的位置，在剔除误匹配点时，应忽略该匹配点.

由上所述，可归纳本算法步骤如下：

(1) 按照 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 时间顺序，依次剔除 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 时刻为误匹配点的准匹配点；

(2) 按照 $t_n,\cdots,t_1,t_0$ 时间顺序，进一步剔除 $t_n,\cdots,t_1,t_0$ 时刻尚存的、为误匹配点的准匹配点；

(3) ①如果 $t_0,t_1,\cdots,t_n$ 每一时刻所余的准匹配点唯一，则认为这些余下的准匹配点即为正确的匹

配点、结束；② 如果 $t_0, t_1, \cdots, t_n$ 每一时刻所剩余的准匹配点多于一个，则表明存在与飞行航线相似的区域，建议延长匹配区域，重新匹配；③ 如果有某一时刻的准匹配点数为零，则忽略该时刻匹配点，重新执行步骤1、2、3；④ 除以上3种情况外，一律重复执行步骤1、2、3.

1.3.2　算法收敛速度

1.3.1节中算法的3个步骤每执行一次，即可剔除不满足式(9)和式(10)的所有准匹配点. 设 $P_{i,t_0}, P_{i+1,t_1}, \cdots, P_{i+s,t_s}$ 分别是 $t_i, t_{i+1}, \cdots, t_{i+s}$ 时刻的一组满足式(9)和式(10)的准匹配点，而 P_{i,t_0} 与 t_{i-1} 时刻的任一准匹配点均不满足式(10)，P_{i+s,t_s} 与 t_{i+s+1} 时刻的任一准匹配点也都不满足式(9)，则在执行步骤1时即可剔除 P_{i+s,t_s}，在执行步骤2时可剔除 P_{i,t_0}，这样经过 $\left[\frac{s+1}{2}+0.5\right]$(取整运算)次循环，即可将 $P_{i,t_0}, P_{i+1,t_1}, \cdots, P_{i+s,t_s}$ 全部剔除. 如果 $i=0$，则第1次循环只能剔除 P_{i+s,t_s}，需要循环 $s+1$ 次才能最终剔除 P_{i,t_0}(即 P_{0,t_0}). 同样，如果 $i+s=n$，则第1次循环只能剔除 $P_{i,t}$，需要循环 $s+1$ 次才能最终剔除 P_{i+s,t_s}(即 P_{n,t_s}). 如果 $i=0$，并且 $i+s=n$，则无论循环多少次，均保留 $P_{i,t_0}, P_{i+1,t_1}, \cdots, P_{i+s,t_s}$(即 $P_{0,t_0}, P_{1,t_1}, \cdots, P_{n,t_n}$ 认为是正确匹配点). 由上可见，当 $i=1$，并且 $i+s=n$ 或者 $i=0$ 并且 $i+s=n-1$ 时，要全部剔除 $P_{i,t_0}, P_{i+1,t_1}, \cdots, P_{i+s,t_s}$，需要的循环次数最长，两者均为 n 次循环，这是本算法收敛最慢的特殊情况.

2　误匹配点剔除算法实验结果分析

首先采用CCF匹配算法[3]对试飞试验中获得的26个匹配区景像图进行匹配，然后分别采用3种误匹配点剔除方法对匹配结果进行误匹配点剔除，得到了很好的效果. 图1为其中的一个匹配区基准图，表1和表2为该匹配区的计算结果.

图1　某匹配区基准图

表1　算法1的实验结果

序号	匹配点 (x,y)	$s''_1(x_i)$	$s''_2(x_i)$	$s''_3(x_i)$	$s''_4(x_i)$
1	(73,121)	0.0	0.0	0.0	0.0
2	(80,121)	−0.87	−0.32	−0.32	0.0
3	(88,120)	3.27	1.21	1.20	0.0
4	(95,120)	−13.0	−4.83	−4.79	0.0
5	$\boxed{(105,30)}$	32.75			
6	$\boxed{(106,30)}$	3.54	7.89	7.76	
7	(116,120)	−5.12	−6.41	−5.89	0.0
8	(124,120)	3.43	3.80	1.64	0.0
9	(131,120)	−8.86	−8.95	−0.30	0.0
10	$\boxed{(139,30)}$	14.75	14.77		
11	(146,121)	−9.0	9.0	0.10	0.0
12	(154,121)	2.56	2.56	0.03	0.0
13	(161,120)	−0.68	0.68	0.01	0.0
14	(168,120)	0.16	0.16	0.0	0.0
15	(176,120)	0.0	0.0	0.0	0.0

表2　算法3的实验结果

序号	准匹配点 (x,y)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	73,121*	144,48	51,147	106,63	35,144	150,84	22,75	123,57	81,118	15,57	159,117
2	80,121*	138,48	51,144	99,63	34,144	150,84	22,75	120,57	141,48	141,120	153,150
3	88,120*	130,48	102,144	96,66	17,152	138,123	17,152	66,84	87,15	102,144	
4	95,120*	127,48	156,105	96,66	17,152	63,84	38,21	65,84			
5	102,120	105,30*	111,24	21,72	16,152	63,74	31,66	138,48			
6	109,120	106,30*	33,19	45,48	37,24	153,18	142,48				
7	116,120*	151,481	30,18	42,48	29,105	111,144					
8	124,120*	158,481	30,18	51,49	51,84	108,144					
9	131,120*	165,48	51,152	69,75	51,84						
10	138,120	139,30*	83,90	51,84	107,48						
11	146,121*	150,84	105,144	45,36	83,90	99,15					
12	154,121*	147,84	96,15	96,63	33,105	102,144					
13	161,120*	147,87	49,152	51,57	22,81	93,15	32,63	32,105	144,48		
14	168,120*	144,87	93,63	93,105	37,24	48,57	16,152	21,84	87,15	144,48	
15	176,120*	42,36	48,56	48,152	21,87	72,105	30,105	31,66	96,152		

2.1　算法1实验结果

设定匹配点拟合曲线最大曲率阈值为0.5.

如表1所示，第2栏列出了采用CCF匹配算法所得的15个匹配点的坐标，根据式(1)、式(2)计算

求得三次样条拟合曲线在这 15 个匹配点处的二阶导数 $s_1''(x_i)$（表 1 第 3 栏），然后根据式(4)、式(5)、式(6)即可求出拟合曲线的曲率在 $x=102.4$ 处为最大值 $K(102.4)=20.8$，该点横坐标距匹配点横坐标 $x=105$ 最近，因此匹配点(105,30)为误匹配点，剔除该点. 剩余的 14 个匹配点的三次样条拟合曲线在各匹配点处的二阶导数 $s_2''(x_i)$ 见第 4 栏，拟合曲线在 $x=137.9$ 处曲率最大，$K(137.9)=9.2$，该点横坐标距匹配点横坐标 $x=139$ 最近，因此匹配点(139,30)为误匹配点，剔除该点. 继续计算剩余的 13 个匹配点的三次样条拟合曲线在各匹配点处的二阶导数 $s_3''(x_i)$ 如第 5 栏所示，拟合曲线在 $x=104.5$ 处曲率最大，$K(104.5)=5.8$，该点距匹配点横坐标 $x=106$ 最近，因此匹配点(106,30)为误匹配点，剔除该点. 剩余的 12 个匹配点的三次样条拟合曲线在各匹配点处的二阶导数 $s_4''(x_i)$ 见第 6 栏，拟合曲线的曲率最大值约等于零，小于给定阈值 0.5，因此，剩余所有匹配点均为正确匹配点.

2.2　算法 2 实验结果

设定匹配点到拟合直线的最大距离阈值为 2（根据匹配算法误差等因素决定）.

表 1 中匹配点 $P_1\sim P_{15}$ 的拟合直线为 $y=86.040+0.131x$，P_{10} 到该直线的距离最大，为 73.584，大于给定阈值 2，予以剔除. 剩余匹配点 $P_1\sim P_9$ 和 $P_{11}\sim P_{15}$ 的拟合直线为 $y=81.547+0.210x$，P_6 到该直线的距离最大，为 72.258，予以剔除. 剩余匹配点 $P_1\sim P_5$、$P_7\sim P_9$ 和 $P_{11}\sim P_{15}$ 的拟合直线为 $y=98.840+0.117x$，P_5 到该直线的距离最大，为 80.569，予以剔除. 剩余匹配点 $P_1\sim P_4$、$P_7\sim P_9$ 和 $P_{11}\sim P_{15}$ 的拟合直线为 $y=120.788-0.004x$，P_9 到该直线的距离最大，为 0.768，小于给定的阈值 2，而且每一剩余匹配点与其前一时刻匹配点的相对位置的矢量方向都相同. 因此匹配点 P_5、P_6、P_{10} 为误匹配点，其余匹配点为正确匹配点.

2.3　算法 3 实验结果

表 2 列出了采用 CCF 算法计算所得的图 1 所示匹配区中所有准匹配点，其中第 2 栏为正确匹配点，打 * 号的为相似度最大的匹配点（即表 1 中第 2 栏的匹配点），经过一次式(9)、式(10)计算，剩下满足条件的数据为第 2 栏和上标为 1 的数据. 再经过一次式(9)、式(10)的计算，所有非正确匹配点的准匹配点均被剔除，只剩下正确匹配点.

2.4　3 种算法比较

上述 3 种误匹配点剔除算法依据不同的机理，都能有效地剔除误匹配点. 从实时性看，算法 1 的计算量相对较大；从适用性看，算法 1 要求的条件最低，适用性更好，算法 3 则要求与惯导系统并行工作；从可靠性看，算法 2 和算法 3 具有更高的可靠性.

3　结　论

根据巡航导弹的机动规律，提出了 3 种误匹配点的剔除算法. 通过试飞试验的数据进行了仿真验证，试验结果表明，这 3 种算法均能够有效地辨别并剔除误匹配点. 事实上，巡航导弹在匹配区中，大多是直线飞行，即满足算法 2 的要求，所以算法 2 应用最多. 此外，由于一般巡航导弹均装备有 INS，因此在实际应用中，除可以单独应用这 3 种算法外，还可以根据实际情况将算法 1 和算法 3 或者算法 2 和算法 3 结合起来应用，以进一步提高误匹配点辨别的可信度.

参 考 文 献

1　傅伟. 四组合导航系统中的景像匹配技术研究[D]. 北京：北京航空航天大学，1998.

2　Brown L G. A survey of image registration techniques[J]. ACM Computing Surveys，1992，24(4)：325～376.

3　周志强. 四组合导航系统中的景像匹配技术研究[D]. 北京：北京航空航天大学，1998.

黄锡山　1968 年生，北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院博士生. 主要研究方向为景像匹配、多传感器图象信息融合、小波分析、神经网络等. 发表论文 20 余篇.

陈慧津　1979 年生，2000 年本科毕业于北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院，并被推荐免试在该学院直接攻读博士学位. 主要研究方向为景像匹配、多传感器信息融合、组合导航等.

陈　哲　1939 年生，北京航空航天大学自动化学院教授，博士生导师. 主要研究领域为组合导航、人工智能、机器人技术、信息融合. 发表论文 80 余篇.