

文章编号: 1007-4619(2005)01-0106-06

# 地形起伏对雷达景象实际匹配影响初探

叶 勤, 陈映鹰

(同济大学 测量与国土信息工程系, 遥感技术应用研究中心, 上海 200092)

**摘 要:** 雷达景象匹配由于具有全天候的特征, 在飞行器导航与定位中受到重视, 但因为地形起伏影响, 实际地物在雷达景象上的成像会发生变形与移位, 这将影响实时雷达景象与参考基准图匹配的精度。根据实时雷达景象的成像方式, 利用参考基准图模拟出地面平坦条件下的模拟雷达图一; 并利用 DEM 数据, 采用纠正方法, 在该模拟雷达图上引入地面起伏因素的影响, 得到地面起伏情况下的实际成像——模拟雷达图二。试验中, 将同一地区的两类模拟雷达实时图分别与参考基准图影像进行匹配, 比较匹配的结果, 针对其匹配差异分析地面起伏对雷达景象匹配的实际影响, 最后得出结论——实际地面在雷达图上的成像特征是影响匹配的最主要因素, 地形起伏对匹配的影响与地面特征的分布有关, 只有起伏区域存在明显地物特征时才会对匹配产生影响。

**关键词:** 景象匹配; 平距成像; 参考基准影像; 纠正  
**中图分类号:** TP79/TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引 言

景象匹配是飞行器导航定位及武器制导的一种重要方式, 它利用飞行器飞行时获取的景象与基准影像图(正射投影影像)进行匹配来实时确定飞行器的位置。机载实孔径侧视成像雷达在飞行时所实时获取的雷达图像为雷达景象, 它采用微波成像, 具有全天候特性, 因而在景象匹配定位中越来越受到人们的重视。然而雷达景象的成像方式与常规光学景象差异很大, 在地面平坦的情况下, 两者所成影像的几何特性一致; 但实际地面并不是一个理想的水平面, 存在着地形高低起伏, 此时地物在雷达景象上的成像与正射投影的基准图影像有很大不同, 这种地形起伏造成的成像差异必然会对景象匹配产生影响。为此文献[1]中就地形起伏对雷达景象成像的影响进行了分析, 给出在不同高度、不同分辨率成像时, 实时雷达景象不需要考虑地面起伏情况的高差限差值。而文献[2]中则根据实时雷达景象的成像方式, 推导出利用 DEM 数据对实时雷达景象消除地形起伏影响的方法。本文重点分析当地形起伏超过

文献[1]中的限差值时, 它对雷达景象匹配会造成多大的影响, 该影响与哪些因素有关; 在具体匹配过程中, 何时应对实孔径雷达景象匹配的结果进行高程改正。

## 2 实时雷达的成像原理

机载实孔径侧视成像雷达在飞行时采用圆扫描距离成像, 雷达工作波段为 X 波段, 成像时时间间隔为纳秒级, 具体方式如图 1。

当飞行器进行圆扫描生成实时雷达图像时, 雷达天线上测高仪同时对地面进行测高, 得到天线到成像区域平均面的高度  $H$ , 根据高度  $H$  以及雷达圆扫描时的最小与最大成像角  $\theta_1 = 10^\circ$ ,  $\theta_2 = 34^\circ$ , 计算出实时图的内径与外径回波  $R_1 = H/\cos 10^\circ$ ,  $R_2 = H/\cos 34^\circ$ , 然后由  $R_1$ 、 $R_2$  根据设计要求确定在回波信号上截取信号的区段, 回波信号有一个延迟时间, 以时间间隔  $\Delta t = 50\text{ns}$  截取延迟时间在  $t_1 = R_1/2c$  到  $t_2 = R_2/2c$  ( $c$  为光速) 的回波信号, 进行取样成像。在成像的后续处理中将斜距( $\Delta t$  对应的是斜距差异)转化为平距。

收稿日期: 2003-10-08; 修订日期: 2003-11-23

基金项目: 国家教委博士点基金项目资助(项目号 20010247024)

作者简介: 叶勤(1970—), 女, 现从事遥感影像处理、数字摄影测量等方面研究工作。

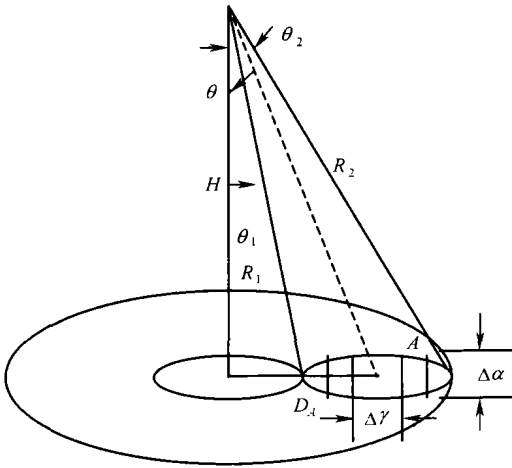


图 1 实时雷达成像方式  
Fig.1 Imaging of real-time radar

根据这一成像方式,文献[1]分析由于地形起伏对雷达实时图像产生的位移影响,得出不需考虑地形起伏影响的地面最大高差限值,指出在小于该限值时,地形起伏在雷达实时图像上产生的变形小于一个像素。但是当地面起伏产生的成像影响超过一个像素时,对实时雷达图匹配的影响究竟怎样?是否地形起伏产生了一个像素的像点位移就会导致一个像素的匹配误差?对匹配的影响与哪些因素有关?这些还需研究。

### 3 地面高程起伏对实时雷达景象匹配的影响

影响匹配精度的因素除了几何形状的位移变形,还有辐射特性的不一致,而本文主要是研究地形起伏产生的影像变形对匹配精度的影响,因此在进行研究前需首先排除辐射特性不一致的影响,为此考虑利用模拟的雷达实时图进行分析。此外在景象匹配实验阶段,可用于试验的实飞实时雷达图数据也不易取得,所以这里利用模拟雷达实时图进行分析。

根据雷达成像方式,利用上节中的实时雷达成像原理由参考基准图(利用星载雷达影像经过纠正而得的高分辨率 SAR 图像<sup>[3,4]</sup>),根据一定的飞行高度  $H$  ( $H$  取 4km、6km、8km、10km)和天线中心位置  $(Z_0, X_0)$  模拟天线旋转扫描采样的方式生成雷达实时图像。在模拟时假设地面是平坦的,而经过纠正后 SAR 图像上因地形高程起伏而产生的像点位移

也已消除;因此采用该方法模拟时,地面起伏的影响并没有在模拟雷达实时图上反映出来,即相当于地面平坦时的雷达景象,定义这种模拟雷达图为模拟雷达实时图一(见图 2(a))。将它与参考基准图进行匹配,匹配结果不受实际地面起伏的影响,本文将此匹配结果作为标准值。

实际成像时地面是不平坦的,为了分析高程起伏对匹配的影响,需有与实际成像一致的、考虑高程起伏影响的模拟雷达图,定义这种模拟雷达图为模拟雷达实时图二(见图 2(c))。它与参考基准图进行匹配,并将匹配结果与上述的标准值比较,其结果差异可以真实地反应地面高程起伏对匹配的影响。

#### 3.1 模拟实时雷达景象上高差影响的引入

根据高程起伏对成像影响的数学模型,对利用 2 节中原理生成的模拟雷达实时图一进行纠正,即在模拟雷达图像上加入高程影响,得到的模拟雷达实时图二。具体方法如下:

I. 根据生成的模拟雷达实时图上的像点坐标  $\alpha(j', i')$ 、模拟中心的位置  $(Z_0, X_0)$  以及像素分辨率,可以确定该坐标对应的地面位置  $A(Z_a, X_a)$ ;

$$\text{II. 计算 } A \text{ 点的方位角: } \beta = \arctg \frac{X_a - X_0}{Z_a - Z_0} \quad (1)$$

$$\text{地面平距: } D_A = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Z - Z_0)^2}; \quad (2)$$

III. 利用  $A$  点地面坐标,根据 DEM 确定其高程  $A_a$ , 以此计算  $A$  点实际航高为:  $H_0 - (A_a - A_0)$ , 在实际成像时  $A$  点的斜距:

$$R_A = \sqrt{(H_0 - (A_a - A_0))^2 + D_A^2};$$

IV. 确定在实际成像时,地形起伏造成的像点在径向的实际成像位置(平距值):

$$D'_A = \sqrt{R_A^2 - H_0^2} = \sqrt{(H_0 - (A_a - A_0))^2 + D_A^2 - H_0^2} \quad (3)$$

$D'_A$  相对于  $D_A$  有位移,此时  $A$  点在实时雷达图像上的成像位置为  $\hat{\alpha}(j, i)$ :

$$\begin{cases} j = j_0 + D'_A \cos \beta / r_p \\ i = i_0 + D'_A \sin \beta / r_p \end{cases} \quad (4)$$

式中  $r_p$  为雷达图像的像素分辨率;

V. 通过 I 到 IV,可以得到加上起伏影响的模拟雷达实时图上  $(j, i)$  的灰度为原模拟图上  $(j', i')$  点的灰度,对原实时图上每一像素进行纠正计算,确定它在纠正后图像上的位置。

由于上述步骤是一个直接解法的纠正过程,即根据像素在待纠正影像上的位置计算其在纠正后影

像上的位置,因此计算出的纠正后图像上的像素位置( $j, i$ )值一般不为整数。此时得到的纠正后模拟影像无法用数字阵列表示,所以在对原图像每一像素的计算结束后,还需再通过内插来确定整像素位置的灰度。内插是根据整数像素位置周围的邻近像

素(非整数像素)灰度值,以及相距的距离通过加权平均获得,最终得到反映地形起伏位移影响的模拟雷达实时图二。

图 2 中(a)为采用 2 节中原理模拟出的实时雷达图像,图 2(b)为参考基准图。

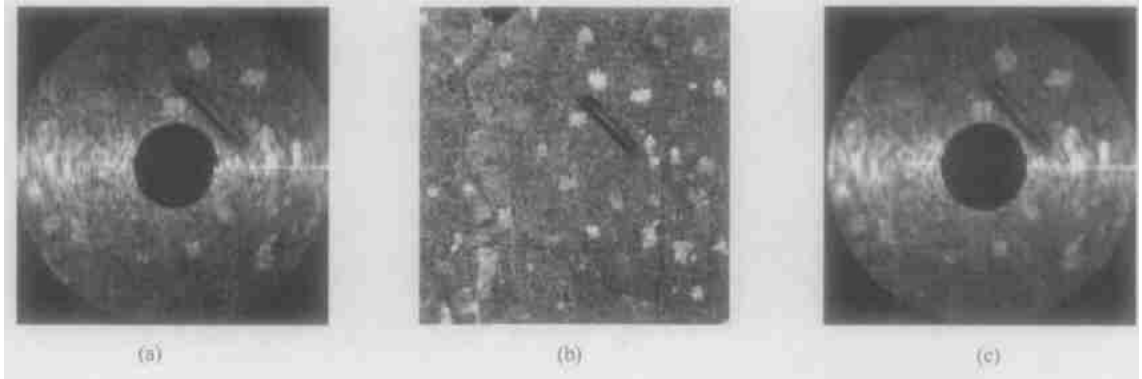


图 2 (a) 模拟雷达实时图一(高度 6km); (b) 参考基准图; (c) 模拟雷达实时图二

Fig. 2 (a) Analogy real-ardar image one(fight height 6km);

(b)Reference image; (c) Analogy real-ardar image two

利用图 2(a)中的模拟雷达实时图一,以及该地区的高差模拟数据(假定右上角的机场区域存在有 20m 高差),根据上述步骤 I 到 V 进行纠正,得到模拟雷达实时图二,如图 2(c)。与图 2(a)相比,机场影像有 1 到 2 个像素的向心位移(靠近中心点处位移相对较大)。

### 3.2 成像位移对雷达景象匹配的影响

影像匹配是一种评价影像分布相似性的手段,匹配时同名点对的确定依赖于测度  $m$ ,常用的“相关系数最大”影像匹配测度,其实质是搜索整个待匹配区域中信噪比最大处作为匹配位置,在配准时  $signal/noise$  为最大。雷达图像上噪音影响很大,所以其匹配是一个低信噪比匹配问题。当地形存在起伏时,成像发生位移,发生位移的区域有两种情况,一种没有明显影像特征,一种包含明显影像特征。

对不含明显影像特征的情况,地形起伏对图像中的特征不产生影响,可认为只是其中的噪音部分受影响,因此它的影响是随机的,而且很小;当匹配区域内有足够的特征信息时,此时地形起伏对匹配影响很小。而对于起伏区域包含明显地物特征的情况,此时地形起伏导致影像上特征发生位移,这对相关系数计算有一定影响,它对匹配结果的影响依赖于它是否影响到整个区域中相关系数值的分布情

况。当特征发生位移的区域范围较小时,它对相关系数值的分布影响较小,此时对匹配结果的影响也较小。而当起伏区域较大,造成范围较大区域的特征发生移位时,相关系数值的分布会受到影响;但相关系数值的计算依赖于整个区域的灰度特征,特征未发生位移的区域对相关系数计算结果有一定的限制作用,因此部分区域影像特征发生位移时,它对匹配产生的影响要小于特征自身的成像位移值。

### 3.3 高程起伏对雷达景象匹配精度影响的试验

试验中采用灰度最小二乘匹配方法,以充分利用匹配窗口内的灰度信息,引入匹配窗口之间的几何变形改正和辐射变形改正,使得相关影像的灰度差的均方差最小并消除噪音信息,达到最优估计。最小二乘匹配方法可在计算中直接求出匹配的子像素位置,匹配精度理论上可达到 0.05—0.001 个像素<sup>[5,6]</sup>。

利用 2 节中的原理生成模拟实时图一,将图 2(a)中的模拟实时图一与参考基准图进行匹配,匹配结果(162.34, 160.40)作为标准值。利用模拟实时图一,加上不同的高差影响进行纠正,得到各种起伏情况下的模拟实时图二,分别与参考基准图进行匹配,将匹配结果与标准值进行比较。试验情况如下。

表 1  
Table 1

| 序号 | 实时图中存在地形起伏的位置     | 高差大小 | 加上高差影响后与基准图匹配结果 | 与标准值的差/像素 |
|----|-------------------|------|-----------------|-----------|
| 1  | 图 2(a)右上角机场位置     | +50  | 162.44 160.39   | 0.10      |
| 2  | 图 2(a)右上角机场位置     | +20  | 162.45 160.38   | 0.11      |
| 3  | 机场及附近区域占整个区域的 1/6 | +20  | 162.44 158.60   | 1.80      |
| 4  | 机场及附近区域占整个区域的 1/6 | +12  | 162.51 160.33   | 0.18      |
| 5  | 机场及附近区域占整个区域的 1/6 | +50  | 162.46 158.58   | 1.82      |
| 6  | 机场及附近区域占整个区域的 1/6 | +100 | 162.47 158.57   | 1.82      |
| 7  | 左侧区域,位置占整个区域的 1/6 | +50  | 160.63 160.35   | 0.29      |
| 8  | 机场及附近区域占整个区域的 1/7 | -20  | 162.33 160.49   | 0.09      |
| 9  | 机场及附近区域占整个区域的 1/7 | -50  | 162.36 160.50   | 0.1       |
| 10 | 机场及附近区域占整个区域的 1/7 | -100 | 162.38 160.50   | 0.1       |

表 1 是利用假定的高程数据对模拟实时图进行 对该地区模拟实孔径雷达图像进行试验,结果如表 2 所示。同时本文还利用实际地面的 DEM 数据 2。

表 2  
Table 2

| 序号 | 实时图位置 | 模拟高度/km | 地形起伏情况       |              |                   | 模拟实时图一与基准图匹配结果 | 模拟实时图二与基准图匹配结果 | 两者差值/像素 |
|----|-------|---------|--------------|--------------|-------------------|----------------|----------------|---------|
|    |       |         | $H_{\max}/m$ | $H_{\min}/m$ | $H_{\text{平均}}/m$ |                |                |         |
| 1  | A 地区  | 10      | 214          | 0            | 37.8              | 144.27, 142.89 | 144.63, 142.84 | 0.36    |
| 2  | A 地区  | 8       | 203          | 0            | 39.2              | 179.34, 177.88 | 179.73, 179.33 | 1.50    |
| 3  | A 地区  | 6       | 68           | 0            | 23.8              | 145.48, 199.46 | 147.57, 199.58 | 2.09    |
| 4  | A 地区  | 4       | 53           | 0            | 19.6              | 134.88, 160.24 | 136.25, 160.54 | 1.40    |
| 5  | B 地区  | 10      | 541          | 6            | 94.7              | 145.10, 143.55 | 145.45, 145.12 | 1.61    |
| 6  | B 地区  | 8       | 430          | 16           | 91.6              | 179.15, 177.55 | 179.40, 179.16 | 1.65    |
| 7  | B 地区  | 6       | 291          | 16           | 82.7              | 237.05, 235.37 | 237.18, 235.36 | 0.42    |
| 8  | C 地区  | 10      | 307          | 20           | 58.5              | 144.02, 142.61 | 144.49, 142.36 | 0.53    |
| 9  | C 地区  | 8       | 265          | 20           | 66.7              | 177.75, 177.26 | 179.42, 177.36 | 1.67    |
| 10 | C 地区  | 6       | 246          | 20           | 72.2              | 233.34, 233.19 | 235.28, 233.35 | 1.95    |
| 11 | D 地区  | 10      | 498          | 20           | 88.1              | 143.98, 142.67 | 144.46, 142.56 | 0.49    |
| 12 | D 地区  | 8       | 379          | 20           | 83.3              | 177.77, 177.27 | 177.51, 179.20 | 1.95    |
| 13 | D 地区  | 6       | 353          | 23           | 77.5              | 233.36, 235.13 | 233.30, 237.33 | 2.21    |

从表 1 分析看出:首先地面高程起伏对匹配结果的影响与起伏区域的位置有关,同为占整个区域 1/6 范围大小、同样是 50m 的高程起伏,在机场及附近区域存在这样的高程起伏会产生 1.82 像素的匹配差异,而影像左侧区域只会产生 0.29 像素的匹配差异,这是因为虽然区域大小相似、高差相同,但是机场及附近区域的影像特征明显,而左侧区域的影像则没有明显的特征,因此虽然成像时产生了同样大小的影像位移,但是对匹配结果的影响却相差很大;其次高程起伏对匹配结果的影响与起伏高差的

大小有一定关系,试验中同样在机场及附近区域(占整个区域的 1/6)有高程起伏,高差 12m 时对匹配的影响为 0.18 像素,而高程起伏为 20m 对匹配的影响为 1.80 像素,高程起伏 50m 对匹配的影响为 1.82 像素,可以发现起伏值越大,产生的匹配影响就越大;此外即使是特征明显区域存在有较大的高差,如果构像面积小(起伏区域面积小)对匹配影响也不明显,如只有右上角机场位置存在 50m 高程起伏时,对匹配的影响很小,只有 0.1 像素;而若存在 20m 高程起伏对匹配的影响也只有 0.1 像素。当高差为负

时情况类似,对其它地区的模拟雷达图进行试验,得到结果也是类似的。

另外,从表 2 也可发现高程起伏对匹配的影响并不只与高差值的大小有关,而且高程起伏对匹配的影响要小于它对成像产生的位移影响。如表 2 中试验 4,该区域与平均面的最大高差是 33m,此时即使是 26m 的高差也会对成像产生 1.8 到 7.6 像素的位移,但试验中对匹配的影响只有 1.4 像素,其它情况下也是如此。

## 4 结 论

对上面的匹配结果进行分析得出如下结论:

(1)地面起伏对实时雷达图与参考基准图匹配的影响与起伏区域(偏离高程基准面区域)的地面特征有密切关系。在同样大小(高差值相同)地面起伏且起伏区域的面积也相当的情况下,明显特征区域有高程起伏对雷达图匹配产生的影响明显,而非明显特征区域有高程起伏,对匹配的影响极小,远小于相同高差值对雷达图构像的影响。

(2)即使特征明显区域存在大于文献[1]中所述高差限值的起伏,但如果该区域面积相对实时图整个成像区域比较小,则其对匹配产生的影响也不明显,这是因为匹配时其它区域影像特征约束的结果。这说明在整个成像区域存在小面积的地形起伏时,它对雷达图匹配的精度影响可以不考虑,即使起伏高差大大超过限差值也是如此。因此在匹配时对平坦区域中的小面积地形起伏可不考虑。

(3)当雷达图成像区域中较大范围(试验中大于 1/6)存在相对基准面的高程起伏时,它对雷达图匹配的影响与高差大小有关,总体上高差越大产生的影响就越大,但两者之间不存在线性比例关系;对于表 1 中的试验图像,同一区域存在 50m 高程起伏对匹配产生的影响与存在 20m 高程起伏产生的影响几乎相同。

(4)地面高程起伏对匹配结果的影响要小于同样高程起伏对雷达图成像产生的位移影响,即使地形起伏产生了一个像素的像点位移,其造成的匹配

误差也小于一个像素。

(5)由于地面起伏对匹配的影响与该起伏区域是否存在地面特征有关,因此当地面特征明显区域存在大范围的高差超限时<sup>[1]</sup>,应利用文献[2]中的方法对匹配结果进行高程改正。

综上所述,在实时雷达图与参考基准图匹配中,实际地面在雷达图上的成像特征是影响匹配的最主要因素,地形起伏对匹配的影响也要与地面特征的分布相结合才起作用。因此为了减少地形起伏对匹配的影响,在雷达图成像过程中,雷达飞行高度的准确获取,成像基准面的精确确定最为关键。成像基准面尽量选取成像区域的平均水准面,同时应尽量避免成像时存在系统性的高程起伏(成像区域整体偏离归化基准面)。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Ye Q, Li Q Y. Impact of Terrain Undulations on Imaging and Radar Scene Matching [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2002, **31**(Sup. ): 50—55. [叶勤, 李启炎. 地面起伏对成像及雷达景象匹配的影响[J]. 测绘学报, 2002, **31**(Sup. ): 50—55.]
- [ 2 ] Ye Q, Chen Y. Impact and Correction Methods of Terrain Undulations on Imaging and Radar Scene Matching [J]. *Journal of Tongji University*, 2003, **31**(1): 85—88. [叶勤, 陈鹰. 高程起伏对雷达景象匹配的影响及改正方法[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(1): 85—88.]
- [ 3 ] Li J. Research on Making Orthophoto Map with SAR Imagery [D]. Master Degree Paper. PLA College of Surveying and Mapping, 1996. [李晶. 利用 SAR 图像制作正射影像图的研究[D]. 解放军测绘学院, 硕士论文, 1996.]
- [ 4 ] Shu N. The Principles on Remote Sensing of Radar [M]. Beijing: Publishing House of Surveying and Mapping, 1997. 3 [舒宁编. 雷达遥感原理[M]北京: 测绘出版社, 1997.]
- [ 5 ] Chen Y, Ye Q, Zhong Z Y. Research on the Matching between Radar Image and Optical One Based on Wavelet [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2000, **29**(3): 245—249. [陈鹰, 叶勤, 钟志勇. 基于小波变换的雷达与光学影像匹配算法研究[J]. 测绘学报, 2000, **29**(3): 245—249.]
- [ 6 ] Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1996. [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996.]

## Impact of Terrain Undulation on Precision of Radar Scene Matching

YE Qin, Chen Yingying

(*Department of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

*Research Center of Remote Sensing Application Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China*)

**Abstract:** Radar image scene matching is an important means on navigation and location of aeroplane, due to its all-weather imaging capability. However, because of radar side looking and terrain undulation, the real objects distorts and displaces when radar scene is imaged. It impacts the matching precision between a radar image and the reference one. In this paper, based on the way of scene imaging, the analogy real-radar image (image one) is made from reference image firstly. And the impact of terrain undulation is introduced into the real-radar image one by rectification with DEM data. Then the real-radar image (image two) is produced, which contains the impact of terrain undulation. In the experiment, two types of the analogy real-radar images of the same area are matched with the reference one. The matching results are compared, and the difference of matching result is used to analyze the practical influence of terrain undulation on radar scene matching. At last, the article draw a conclusion——the imaging characteristic of actual surface object is a main factor that affects matching, and the terrain undulations just have influenle on matching only when it combined with object feature.

**Key words:** scene matching; horizon-range projective imaging; reference image; rectification