

# 基于静止气象卫星的三维云图测量技术研究

姜灵峰

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:** 云图三维数据有着广泛的实际应用, 在航空气象中, 利用云图三维数据生成的云顶高度图用处非常大。同时, 它也是识别天气系统强度, 尤其是确定最强对流云区的有效工具。研究方法通过确定两幅或多幅图像之间的对应点, 得到视差数据, 从而计算物体在三维空间的位置、朝向和深度等信息, 重建三维场景。本文应用静止气象卫星FY-2E、FY-2C的VISSR云图数据进行三维云图测量, 使用FY-2E、FY-2C在不同角度对同一区域进行同时拍摄的两幅图像对, 进行数据处理获取VISSR云图的三维数据。使用的数据处理方法中, 视差图中准确匹配的点在70%左右, 可以分辨最低的云顶高度在3km左右。重点介绍云图数据处理中的虚拟相机模型建立、图像匹配及空间三维获取等关键技术。

**关键词:** 立体匹配, 视差, VISSR

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.006

## Study of the Measurement of Three Dimensional Cloud Image Based on the Geostationary Meteorological Satellite

Jiang Lingfeng

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

**Abstract:** Cloud 3D data have a wide range of practical applications. The generation of cloud top height by using 3D data is very important in aviation synoptics. It is also an effective tool for identifying the weather system strength, especially for recognizing the cloud area. The method determines the parallax data by detecting the corresponding points between two or more images, and calculates the position, orientation and depth of objects in 3D space, and reconstruct 3D scene. This paper employs the VISSR cloud data to measure 3D image from geostationary meteorological satellite FY-2E, FY-2C, and uses the pair of shoot images from the FY-2E and FY-2C at different angles in the same area to obtain 3D data of the VISSR images. The data processing method got around 70% of accurate disparity maps, about 3km of the lowest cloud-top altitude. The key technologies such as virtual camera model building, image matching and spatial 3D acquisition are introduced.

**Keywords:** stereo matching, disparity, VISSR

### 0 引言

目前使用卫星遥感数据对地形进行三维数据获取的技术已经比较成熟, 在很多方面得到了应用, 已经可以通过卫星遥感数据获取地球、月球地表三维数据。但使用卫星遥感数据进行云图三维数据获取的技术还有许多问题有待解决。本文使用FY-2系列卫星遥感数据进行三维数据获取的初步研究。

FY-2C/2D/2E的星下点的位置分别为 $0^{\circ}\text{N}$ ,  $123.5^{\circ}\text{E}$ ;  $0^{\circ}\text{N}$ ,  $86.5^{\circ}\text{E}$ 和 $0^{\circ}\text{N}$ ,  $104.5^{\circ}\text{E}$ , 如图1所示, 其中S表示南半球方向。使用FY-2E、FY-2C同时在不同角度对同一区域拍摄的两幅图像对进行数据处理, 获取可

见光红外自旋扫描辐射计(VISSR)数据。FY-2系列卫星的VISSR图像的每个像素的分辨率在1.2km。本文使用VISSR图像中L1级数据, 压缩全圆盘展宽图像进行数

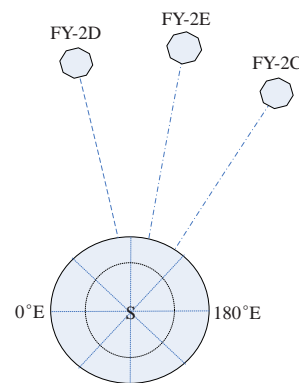


图1 FY-2C/2D/2E的观测区域  
Fig. 1 FY-2C/2D/2E observed area

收稿日期: 2015年12月15日; 修回日期: 2016年7月6日

第一作者: 姜灵峰(1983-), Email:jianglf\_email@aliyun.com

据处理，获取VISSR云图的三维数据。

### 1 三维云图数据处理流程

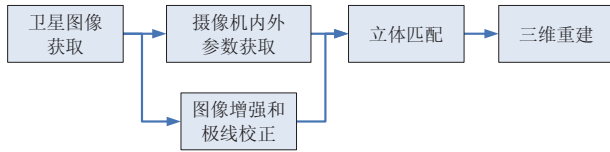


图2 数据处理流程图  
Fig. 2 Flow chart of data processing

1) 卫星图像获取。图像的获取是立体视觉的基础，即通过摄像机获取 3D 物体的二维图像。关键点为获取卫星图像中像素点的定位信息。

2) 摄像机内外参数获取。匹配点对相应的位置差异称为视差。视差由景物中点的位置以及立体摄像系统中摄像机的位置、方向和物理特性决定。一旦摄像机的属性一致，则图像对应对应点的三维空间坐标就可以确定。摄像机标定的目的就是建立有效的成像模型，并确定摄像机的内、外部参数，以便正确地建立空间坐标系中物点和它在图像平面上像点之间的对应关系。

3) 图像增强和极线校正。图像增强的目的有两个：一是去除图像中无效信息甚至噪声点对后续处理的干扰；二是可以减少两幅图中匹配点的灰度差异。极线校正：消除两幅图中的垂直或水平方向的视差，简化立体匹配计算。

4) 立体匹配。立体匹配是指根据所选择特征的计算，建立特征间的对应关系，将同一空间物理点在不同图像中的成像点对应起来，并由此得到相应的视差图像。立体匹配是立体视觉重建中最困难的步骤，当空间三维场景被投影为二维图像时，同一场景在不同视点下的图像会有很大不同，而且场景中存在诸多变化因素，如光照条件、噪声干扰、景物几何形状畸变、表面物理特性及摄像机特性等，都被综合到单一的图像灰度值中。

5) 三维重建。匹配问题是立体视觉重建中最重要也是最困难的一个步骤。一旦有了准确的匹配，根据成像几何的关系很容易求出深度图像，并恢复场景 3D 信息。影响距离测量精度的因素主要有数字量化效应、摄像机标定误差、特征检测与匹配定位精度等。一般来说，距离测量精度与匹配定位精度成正比。增大基线长度可以改善深度测量精度，但同时会增大图像间的差异，增加匹配的困难程度。因此，要设计一个精确的立体视觉系统，必须综合考虑各个方面的因素，保证各个环节都具有较高的精度。

## 2 云图数据处理流程中的关键点

### 2.1 物理相机模型转换成虚拟相机模型

#### 1) 小孔成像模型

世界坐标系表示的  $P$  点坐标  $(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$  与其投影点  $p(\mu, \nu)$  坐标的关系：

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \nu \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & \mu_0 \\ 0 & 1/dy & \nu_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & \mu_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & \nu_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 P_w = M P_w$$

式中， $\alpha_x = f/dx$ ， $\alpha_y = f/dy$ ； $f$  为摄像机的焦距， $(dx, dy)$  为像素点大小， $(\mu_0, \nu_0)$  为图像中心点， $t$  为平移项， $R$  为旋转项， $M_1$  为  $3 \times 4$  矩阵，被称为投影矩阵； $M_1$  与摄像机的内部结构有关，称为摄像机内部参数； $M_2$  完全由摄像机相对世界坐标系的方位决定，称为摄像机外部参数， $P_w$  为  $P$  点的齐次坐标（图3）。

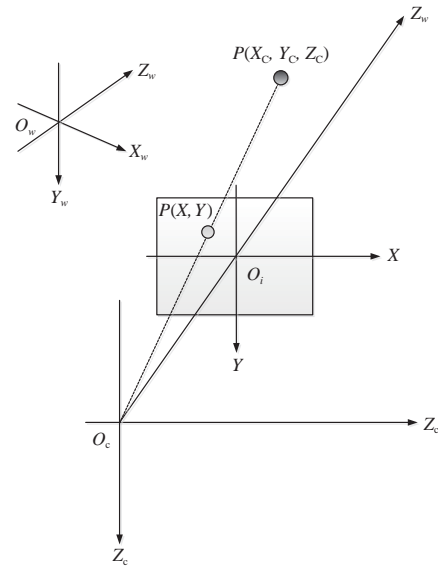


图3 小孔成像模型坐标系和世界坐标系关系  
Fig. 3 Relationship between the pinhole imaging model coordinate system and world coordinate system

#### 2) 基于控制点进行小孔成像摄像机模型内外参数获取

卫星图像中像素点的定位信息，即每一个像素的经纬度，是通过卫星成像的物理模型计算获得的，而基于控制点生成小孔成像摄像机模型的处理过程正好相反，是通过图像中像素点的定位信息来计算生成小孔成像摄像机模型。根据控制点的空间坐标和对应像

点的图像坐标计算小孔成像摄像机内、外参数。本文使用RANSAC算法<sup>[1]</sup>。

使用虚拟相机模型的优点：减少物理相机模型中的参数，简化立体匹配的计算难度；使算法具有通用性和可比性。

## 2.2 云图立体匹配方法

1) 图像校正。图像校正的目的：规范极线约束中的极线分布，使匹配效率得到进一步提高；使图像对从汇聚视角变换成平行视角。

2) 立体匹配。这一任务主要是建立两幅图像中像素点的匹配关系，即点到点的匹配关系。本文使用文献[2-3]中提及的方法。

3) 视差图生成。以图像对中任一幅图像为基准，其大小为该基准图像的大小，元素值为视差值的图像。其原理是把计算得到的视差值映射到相对应的灰度空间0~255像素。因此在视差图像中，灰度值越高，则说明物体越靠近摄像机；反之，灰度值越低，则说明离摄像机越远。

4) 三维点坐标获取。世界坐标系下 $P(X_w, Y_w, Z_w, 1)^T$ 点坐标，经过校正的图像中找到的两个匹配点为 $p_1 = (\mu_1, \nu_1, 1)^T$ 和 $p_2 = (\mu_2, \nu_2, 1)^T$ ，由 $p_1$ 和 $p_2$ 决定的空间点 $P$ 在摄像机 $C_1$ 坐标系下的坐标为 $P(X, Y, Z, 1)^T$ ，在摄像机 $C_2$ 坐标系下的坐标为 $P(X-T, Y, Z, 1)^T$ ，其中 $T$ 为基线长度， $Z$ 为点 $P$ 到像平面的距离，点 $C_1(u_0, v_0)$ 和 $C_2(u_0, v_0)$ 为主光轴与像平面的交点。

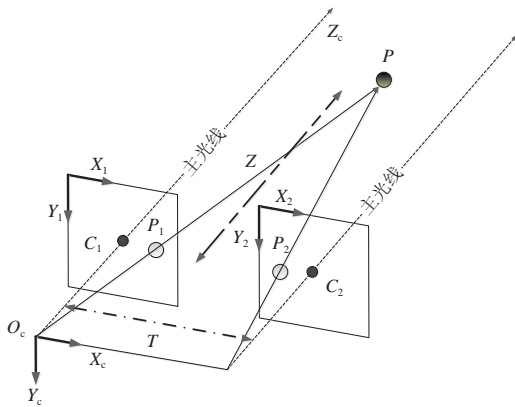


图4 双摄像头模型立体视图  
Fig. 4 Stereo view of double camera model

图像点和三维空间点的映射关系为：

$$\begin{aligned} \mu_1 - \mu_0 &= \frac{fX + Y\alpha_x}{Z}, \\ \nu_1 - \nu_0 &= \frac{Y\alpha_y}{Z}, \\ \mu_2 - \mu_0 &= \frac{f(X-T) + Y\alpha_x}{Z}. \end{aligned} \quad (2)$$

因为 $d = \mu_1 - \mu_2$ 为视差值，从式(2)可以得到：

$$\begin{aligned} X &= \frac{T}{d} \left[ \mu_1 - \mu_2 - \frac{(\nu_1 - \nu_0)\alpha_x}{f} \right], \\ Y &= \frac{(\nu_1 - \nu_0)Tf}{da_y}, \\ Z &= \frac{Tf}{d}. \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)求出的三维空间点坐标是以摄像机的坐标系 $O_c$ 为参考坐标系。从摄像机坐标系到WGS-84坐标系还需要进行坐标系间的平移旋转操作。

## 3 实验及结果分析

使用的图像数据分别为FY-2E和FY-2C拍摄的可见光数据(分辨率1.2km数据)，FY-2C和FY-2E的星下点经纬度分别为 $0^\circ\text{N}$ ,  $123.5^\circ\text{E}$ 和 $0^\circ\text{N}$ ,  $104.5^\circ\text{E}$ 。使用这两颗星进行数据处理的优势在于它们星下点的位置较近，有比较大的公共视野区域；可以进行立体匹配数据点比较多，进行图像匹配准确性会更高。同时也有一些不足：为了提高图像匹配准确性，减少了视差图的量化等级，及视差值( $d$ )的取值范围；视差图的量化等级越高，越能突出物体离拍摄位置越近的关系。

图5a和5b分别为FY-2E和FY-2C生成的云图，两张云图生成的时间为2010年9月14日05:00 UTC，云图中心点为 $13^\circ\text{N}$ ,  $115^\circ\text{E}$ 。图5c为校正图像对匹配后生成的视差图，颜色越深视差越大，表明物体离拍摄位置越近。通过 $d$ 和图像对的空间几何关系可以求出图像点的三维空间点坐标。

从定性的角度可以分析出：两张云图的拍摄视角越大(即星下点越远)，视差图的精度会降低， $d$ 量化等级会越高；如果拍摄视角越小(即星下点越近)，视差图的精度会越高， $d$ 量化等级会降低。在本文使用的数据处理方法中，视差图中准确匹配的点在70%左右，获取 $d$ 量化范围在0~15像素，进行三维点坐标获取后，可以分辨最低的云顶高度在3km左右。

## 4 讨论

云图三维数据获取技术还有许多问题有待解决，本文只是对三维云图数据获取的初步研究，还有很多需要改进的地方和待解决的问题。主要问题如下。

1) 小孔相机模型的精度取决于的图像定位精度。如果图像定位精度较差会给整个图像数据处理过程带来较大误差。

2) 立体匹配的准确性还有很大的提高空间，特别需要结合云的图像特点改进立体匹配算法。

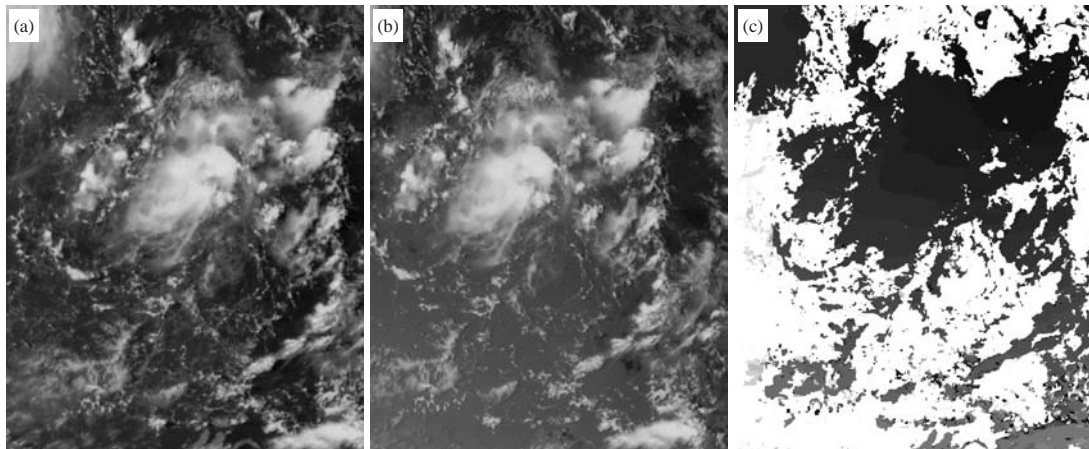


图5 校正图像对匹配后生成的视差图  
Fig. 5 The disparity map generated after matching

3) 计算出的三维空间点坐标没有一个可以参考的实际空间坐标值,不能有效地进行反向分析,需要修改整个图像数据处理流程。

4) 进一步研究和改进使用两颗或两颗以上的FY-2卫星进行三维云图测量的方法,在提高图像匹配准确性的前提下,同时提高视差图的量化等级。

#### 参考文献

- [1] Rousseeuw P J. Least median of squares regression. *J Amer Statist Asso*, 1984, 79(388): 871-880.
- [2] Boykov Y, Kolmogorov V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(9): 1124-1137.
- [3] Bleyer M, Gelautz M. A layered stereo algorithm using image segmentation and global visibility constraints. *ISPRS J Photogrammetry and Rem Sens*, 2005, 59(3): 128-150.

(上接26页)

#### 参考文献

- [1] 杨洪平, 张沛源, 程明虎, 等. 多普勒天气雷达短时预报技术研究进展. *暴雨灾害*, 2007, 25(2): 90-96.
- [2] 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验. *气象学报*, 2006, 64(3): 39-53.
- [3] 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. *大气科学*, 2006, 30(4): 94-107.
- [4] 李国静, 徐幼平, 成巍, 等. 一次大暴雨过程的多普勒雷达资料同化的敏感性试验. *暴雨灾害*, 2009, 27(2): 3-9.
- [5] 徐广阔, 孙建华, 雷霆, 等. 多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 36-46.
- [6] 刘青松, 董海萍, 郭卫东, 等. 多普勒雷达资料的直接同化对降雨预报的影响. *暴雨灾害*, 2010, 28(2): 20-26.
- [7] 赵文斌, 齐琳琳, 何宏让, 等. 多普勒天气雷达资料在暴雨数值模拟中的同化应用. *气象科学*, 2011, 31(3): 318-324.
- [8] 杨艳蓉, 曾明剑. 雷达资料同化对暴雨预报影响的数值模拟研究. *气象科学*, 2012, 32(2): 31-38.
- [9] 陈锋, 冀春晓, 董美莹, 等. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响. *气象*, 2012, 38(10): 1170-1181.
- [10] 李华宏, 王曼, 曹杰, 等. 雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验. *热带气象学报*, 2014, 30(5): 83-95.
- [11] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center Global Spectral Statistical Interpolation Analysis System. *Wear Forecasting*, 1992, 120(8): 1747-763.
- [12] Zhu Y, Gelaro R. Observation sensitivity calculations using the adjoint of the Gridpoint Statistical Interpolation (GSI) Analysis System. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(1): 335-351.
- [13] Kleist, Daryl T, Parrish, et al. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System. *Wear Forecasting*, 2009, 24(6): 1691-1705.
- [14] Hu Ming, Xue Ming. Implementation and evaluation of cloud analysis with WSR-88D reflectivity data for GSI and WRF-ARW. *Geophys Res Lett*, 2007, 34(7): 248-265.
- [15] Zhao Kun, Xue Ming. Assimilation of coastal Doppler radar data with the ARPS 3DVAR and cloud analysis for the prediction of Hurricane Ike (2008). *Geophys Res Lett*, 2009, 36(12): 91-100.
- [16] Wu Wanshu, Purser R J. Three-Dimensional Variational Analysis with Spatially Inhomogeneous Covariances. *Mon Wea Rev*, 2002, 130(12): 2905-2916.
- [17] 丁一汇. *高等天气学*. 北京: 气象出版社, 1991, 442-454.