

文章编号:1000-6893(2008)01-0117-06

一种月球车视觉系统的匹配算法

王保丰^{1,2}, 唐歌实¹, 李广云², 邢帅²

(1. 北京航天飞行控制中心, 北京 100094)

(2. 解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

A Matching Algorithm for Lunar Rover Vision System

Wang Baofeng^{1,2}, Tang Geshe¹, Li Guangyun², Xing Shuai²

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China)

(2. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

摘 要: 对采用双目视觉来实现月球车自主导航提出了一种快速匹配的方法。首先,对相机的内外参数进行精确地标定,通过两相机的外参数对图像进行核线纠正,生成消除上下视差的核线;然后,在核线图像上,采用相关系数法进行由少到多的粗匹配,对匹配结果进行多重的检验,接着用最小二乘方法进行亚像素的精确匹配;最后,在匹配的像点间构建 Delaunay 三角网,建立两图像重叠区域的匹配关系,实现稠密匹配。对该方法进行了多组实验,实验结果表明:该方法可以快速、可靠地实现稠密的图像匹配。

关键词: 月球车; 立体视觉; 导航; 图像匹配; 核线

中图分类号: V526

文献标识码: A

Abstract: This paper put forwards a matching algorithm for lunar rover vision system that will use double cameras to navigate. Firstly, the elements of interior and exterior orientations of cameras are calibrated, and then the original images are matched to epipolar images without vertical parallax by elements of exterior orientation between two stations, and then points on epipolar images are matched increasingly by correlation coefficient algorithm, and the matched points are checked by many rules. Secondly points are matched accurately by least square match algorithm. Finally, Delaunay triangulated network between matched points is established and the relation algorithm of overlap regions between epipolar images is obtained. Some experiments are performed by the method in the paper. The experiment results indicate that the method can finish matching pictures of lunar rover quickly and reliably.

Key words: lunar rover; stereoscopic vision; navigation; image matching; epipolar line

中国的“嫦娥”工程主要分为环月飞行、月面探测、取样返回和载人登月 4 个阶段。在第二阶段中,月球车是关键系统之一。目前国外主要以“双目视觉”作为实现星际探测车自主导航的主要技术手段,如美国的火星探测车“机遇号”和“勇气号”等。视觉测量系统将是中国月球车的主要导航手段。在月球车的视觉导航中,相机参数的标定和图像快速、高精度匹配是两项关键技术。其中相机参数标定可以在地面进行,相关的方法已经较为成熟^[1-5]。当前,实现快速的、可靠的和稠密的图像匹配已经成为整个系统的“瓶颈”。图像匹配算法主要分为两类:一类是基于灰度匹配的方法^[6-8],另一类是基于特征匹配的方法^[9-11]。前者主要用空间域的二维或二维滑动模板进行图像

匹配;后者则通过在原始图像中提取点、线和区域等显著特征作为匹配基元,进而用于特征匹配。对于非特征像素点,则通过线性或分形等非线性的方法进行像素级匹配。由于月球车所处的月面环境通常纹理比较单一,灰度变化不明显。另外,视觉导航系统需要恢复详细的、可靠的车身周围环境信息,为下一步的路径规划做准备。如果直接采用基于特征的匹配方法,将只能实现少部分特征点的匹配,无法完成稠密恢复的任务;如果直接采用基于灰度信息的方法逐点进行匹配,虽然可实现较稠密的恢复结果,但需要很大的运算量,这对于月球车上的嵌入式系统来讲,实现快速的三维信息恢复是行不通的。因此,本文基于灰度匹配算法构建核线图像对月球车视觉系统的图像进行匹配,大大地减少了运算量,并采取多种策略对结果进行检验,提高了结果的可靠性。

1 核线影像纠正

核线是指摄影基线与任一被测点构成的核面与像面的交线^[1]。在立体像对上,同名像点一定位于同名核线上,而且同名核线对上的像点是一一对应的。如果能在立体像对上确定同名核线对,那么利用同名核线的上述性质,可将二维的影像匹配转变为沿核线的一维匹配,大大减少冗余计算,加快匹配速度,也降低了误匹配出现的可能性。在月球车导航系统中,两个相机是固定在一个定长的基线上进行工作的,在工作过程中相机的相对位置和姿态不发生变化,因此利用两相机的外参数可将相机拍摄的图像沿核线方向进行重采样,生成消除上下视差的核线图像,详细过程如下:

如图1所示, P 为空间任意一点, $O_L X_L Y_L Z_L$ 和 $O_R X_R Y_R Z_R$ 分别为左、右相机的像空间坐标系, P 在两坐标系下的坐标分别为 (X_{LP}, Y_{LP}, Z_{LP}) 和 (X_{RP}, Y_{RP}, Z_{RP}) ; S_L 和 S_R 为左、右像平面, o_L 和 o_R 分别为左、右像片的像主点,两像平面的焦距分别为 f_L 和 f_R ; $o_L x_L y_L$ 和 $o_R x_R y_R$ 为两像平面对应的

像坐标系, $o_L x_L$ 轴、 $o_L y_L$ 轴分别与 $O_L X_L$ 轴、 $O_L Y_L$ 轴平行, $o_R x_R$ 轴、 $o_R y_R$ 轴分别与 $O_R X_R$ 轴、 $O_R Y_R$ 轴平行; P'_L 和 P'_R 分别为 P 对应左、右像平面上的像点,像坐标分别为 (x_L, y_L) 和 (x_R, y_R) ;在 O_L, O_R, o_L 3点所确定的平面内,建立 $O_L XYZ$ 左相机虚拟像空间坐标系,以 O_L 为坐标系原点, O_L 指向 O_R 的方向为 X 轴的正方向,平面的法线方向为 Z 轴的正方向, Y 轴由 X 轴和 Z 轴确定; $O_R X' Y' Z'$ 为右相机的虚拟像空间坐标系,它由坐标系 $O_L XYZ$ 平移至 O_R 产生; P 在两坐标系下的坐标分别为 (X_P, Y_P, Z_P) 和 (X'_P, Y'_P, Z'_P) ; S'_L 和 S'_R 为 $O_L XYZ, O_R X' Y' Z'$ 虚拟像空间坐标系对应的虚拟像平面,两虚拟像平面的焦距均为 f ,显然虚拟像平面 S'_L 和 S'_R 共面。 o'_L 和 o'_R 分别为虚拟像平面 S'_L 和 S'_R 的主点, $o'_L x y$ 和 $o'_R x y$ 为两像平面对应的像坐标系, $o'_L x$ 轴、 $o'_L y$ 轴分别与 $O_L X$ 轴、 $O_L Y$ 轴平行, $o'_R x'$ 轴、 $o'_R y'$ 轴分别与 $O_R X'$ 轴、 $O_R Y'$ 轴平行。核线图像纠正的实质就是将左右两台相机在 S_L 和 S_R 上所成的像投影到以 $O_L XYZ, O_R X' Y' Z'$ 为虚拟像空间坐标系对应的虚拟像平面 S'_L 和 S'_R 上。

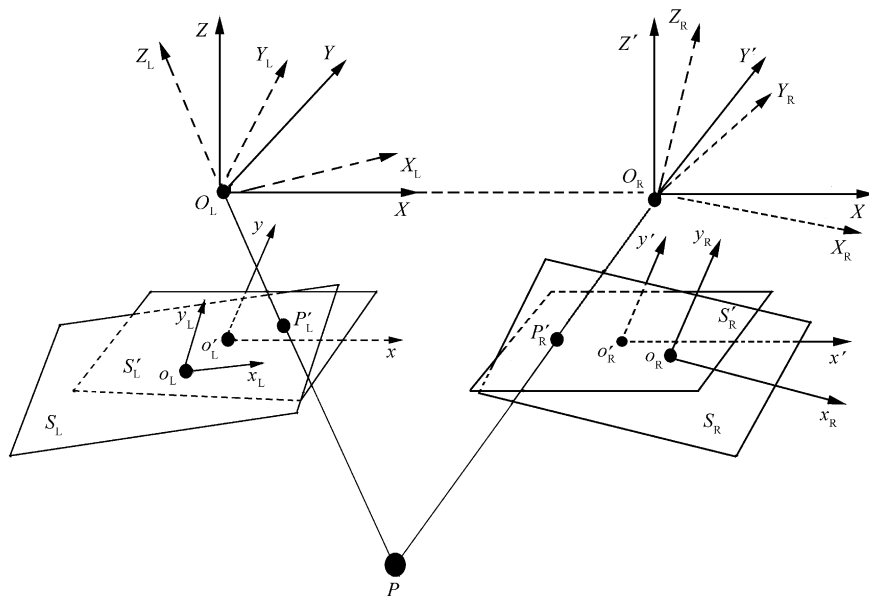


图1 生成核线图像示意图

Fig. 1 Making original images to epipolar images diagram

以左相机为例,计算坐标系 $O_L XYZ$ 与 $O_L X_L Y_L Z_L$ 坐标系的转换关系。利用文献[1]中的实验场标定的方法,可以精确地标定出右相机的像空间坐标系 $O_R X_R Y_R Z_R$ 相对于左相机的像空间坐标系 $O_L X_L Y_L Z_L$ 的外方位元素,即3个平移参数 (X_0, Y_0, Z_0) 和3个旋转参数 $(\omega, \kappa, \varphi)$,如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} X_R - X_0 \\ Y_R - Y_0 \\ Z_R - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N 为3个旋转参数 $(\omega, \kappa, \varphi)$ 的函数,具体表达参考文献[12]。

利用式(1)可以计算出点 O_R 在 $O_L X_L Y_L Z_L$

坐标系下的坐标 $(X_{L O_R}, Y_{L O_R}, Z_{L O_R})$,表达式为

$$\begin{bmatrix} X_{L O_R} \\ Y_{L O_R} \\ Z_{L O_R} \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} -X_0 \\ -Y_0 \\ -Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在 $O_L XYZ$ 坐标系的 $O_L Z$ 轴上找单位长度为 1 的点 P_1 ,坐标为 $(0,0,1)$ 。 P_1 在 $O_L X_L Y_L Z_L$ 坐标系下坐标 $(X_{L P_1}, Y_{L P_1}, Z_{L P_1})$ 可由向量 $V_{O_L O_R}$ 和向量 $V_{O_L O_L}$ 叉乘并单位化,得到

$$V_{O_L P_1} = \frac{V_{O_L O_R} \times V_{O_L O_L}}{|V_{O_L O_R} \times V_{O_L O_L}|} = X_{L P_1} i + Y_{L P_1} j + Z_{L P_1} k \quad (3)$$

O_L, O_R 和 P_1 这 3 点在 $O_L XYZ$ 坐标系下的坐标为 $(0,0,0)$, $(\sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2}, 0, 0)$ 和 $(0,0,1)$,在 $O_L X_L Y_L Z_L$ 坐标系下的坐标为 $(0,0,0)$, $(X_{L O_R}, Y_{L O_R}, Z_{L O_R})$ 和 $(X_{L P_1}, Y_{L P_1}, Z_{L P_1})$ 。由文献[13]可计算得到坐标系 $O_L XYZ$ 与 $O_L X_L Y_L Z_L$ 坐标系的转换参数 $X'_0, Y'_0, Z'_0, \omega', \kappa', \varphi'$ 。

由式(1)可将像平面 S_L 的像点 P'_L 在 $O_L X_L Y_L Z_L$ 坐标系下的坐标 $(x_L, y_L, -f_L)$,转换为在 $O_L XYZ$ 坐标系下的坐标 (X_u, Y_v, Z_f) 。在 $O_L XYZ$ 坐标系下,由 $(0,0,0)$ 和 (X_u, Y_v, Z_f) 建立空间直线方程,并求出它与平面 $Z = -f$ 的交点 P_L 的坐标 $(x, y, -f)$,则 (x, y) 即为点 P 在虚拟像平面上核线排列的像点。采用该方法可计算得到像平面 S_L 上每一个像素在虚拟像平面 S'_L 上的像点。由于计算的位置不一定恰好落在整像素的位置上,采用双线性插值法进行灰度内插,从而生成左核线图像。同理,对于右相机拍摄的图像同样进行核线重排得到右核线图像,最终得到一对消除了上下视差的核线图像。

2 匹配过程

对以上生成的核线图像,采用以下的匹配策略,具体过程如下:

① 以生成的左核线图像为参考图像,生成的右核线图像为匹配图像,先在左核线影像上均匀地取 5 个像点,沿核线方向按照相关系数法进行整像素精度的匹配;用一次多项式建立两核线图像间的位置关系,并由匹配得到的 5 对同名像点解算出多项式的系数。

② 用上述多项式可以计算出两核线图像的重叠区域,按照一定间隔(20 像素 \times 20 像素)在参考图像重叠区域中建立格网点,以参考图像上的每个格网点为中心建立 7 像素 \times 7 像素的模板,

由建立的多项式在匹配图像上的核线方向计算出概略的匹配位置,以概略位置为中心建一个 11 像素 \times 9 像素(由于误差的存在上下视差方向上为 9 像素而不是 7 像素)的模板,在给定的阈值 T 下进行相关系数匹配;对匹配完的格网点进行双向匹配和连续性检查,并进行最小二乘亚像素匹配。

③ 对上述匹配结果进行构建 Delaunay 三角网,用多项式建立三角形内部点之间的匹配关系式。

④ 最后计算出图像中重叠区域所有点对应的空间三维坐标。

2.1 相关系数匹配

相关系数采用标准化的协方差函数表示。它具有目标影像的灰度与搜索影像的灰度之间即使存在线性畸变仍然能较好地评价它们之间的相似性程度的优点。参考图像 (x, y) 与目标图像中 (x', y') 对应灰度 $g(x, y)$ 与 $g(x', y')$ 的相关系数为^[14-15]

$$\rho(p, q) = \frac{C(p, q)}{\sqrt{C_{gg}(p, q)C_{g'g'}(p, q)}} \quad (4)$$

式中: $C(p, q)$ 为两窗口对应灰度的协方差; $C_{gg}(p, q)$ 和 $C_{g'g'}(p, q)$ 为左右对应窗口中灰度的方差,各参数意义可参考文献[14]。理论上对于核线方向上的一维相关应有 $q=0$,由于各种误差的存在,取 $q=2$ 。

假设左核线图像的宽度为 W ,高度为 H ,左核线图像中均匀选取坐标为 $(-W/4, H/4)$, $(W/4, H/4)$, $(0, 0)$, $(-W/4, -H/4)$ 和 $(W/4, -H/4)$ 5 个点,并开设 7 像素 \times 7 像素的模板窗口,分别在右核线图像上沿对应的核线开设高度为 9 像素的模板进行相关系数匹配,找到对应的匹配点,如图 2 所示。

用一次多项式来描述左右两核线图像间的左右视差关系,表达式为

$$x' = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (5)$$

由得到的 5 组匹配点坐标,进行最小二乘计算,求得系数 a_0, a_1, a_2 。

用式(5)可以计算出两核线图像的重叠区域,按照一定间隔(20 像素 \times 20 像素,可根据测量的精度、图像大小等因素调整),在参考图像重叠区域中建立格网点,以参考图像上的每个格网点为中心建立 7 像素 \times 7 像素的模板,由式(5)在匹配图像上的核线方向计算出概略的匹配位置,以概略位置为中心建一个 11 像素 \times 9 像素的模板,在给定的阈值 T 下进行相关系数匹配,获取格网点的匹配点。

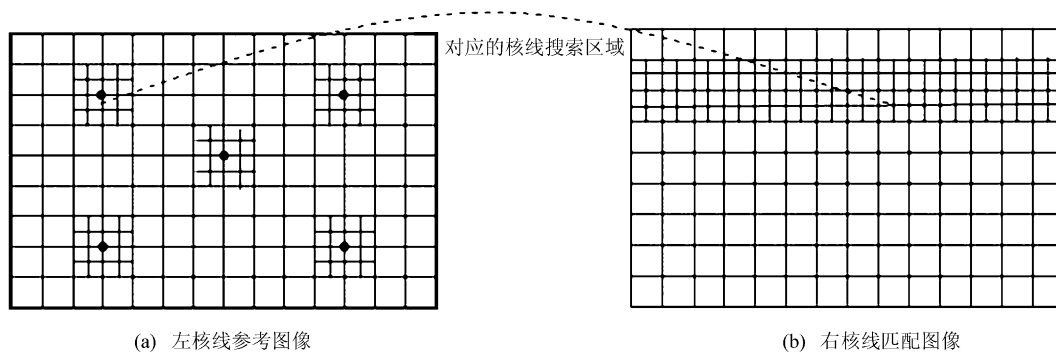


图 2 相关系数匹配示意图

Fig. 2 Matching points by correlation coefficient algorithm diagram

2.2 匹配结果的多重检验

为了进一步检验匹配结果,提高匹配结果的可靠性,采用连续性控制和双向匹配策略对匹配结果进行双重检验。

(1) 连续性控制

连续性控制是一种局部约束,其理论依据如下:自然空间总是具有空间连续性的,而且它作为相位调制信号是依赖影像灰度为载波信号携带到图像上的,所以影像信号的变化频率具体到某一局部,至少应在一个方向上呈连续性。因此,可以利用空间连续特性检查出匹配结果中的粗差点,更好地保证匹配结果的精度^[15]。

采用具有普遍性的局部协调法进行检验。利用点 (i, j) 周围的若干点计算平均视差 p_{aver} ,其与点 (i, j) 的视差 $p_{(i, j)}$ 之差的绝对值为

$$p = |p_{(i, j)} - p_{aver}|$$

若 $p > T$,则认为该点是粗差点, T 为粗差阈值。 T 与基线的长度以及被测区域的地形起伏状况有关。

(2) 双向匹配策略

采用双向匹配策略的主要过程:令 (x_{ref}, y_{ref}) 为参考图像上的特征点,已经匹配获得它在匹配图像上的同名点为 (x_{mat}, y_{mat}) ,再将同名点 (x_{mat}, y_{mat}) 作为目标点,在参考图像上匹配获得一同名点 (x'_{ref}, y'_{ref}) ,这一过程称为反向匹配。若 (x_{ref}, y_{ref}) 与 (x'_{ref}, y'_{ref}) 间的距离小于 1 个像素,则确定 (x_{mat}, y_{mat}) 为 (x_{ref}, y_{ref}) 的同名点,否则不是同名点。

2.3 最小二乘亚像素匹配

采用最小二乘匹配在匹配窗口内迭代解算出其辐射参数和几何参数,使匹配精度达到亚像素

以上,从而将初匹配结果从像素级提高到子像素级,该理论已十分成熟不再赘述。

2.4 稠密实现图像匹配

在匹配的像点间构建 Delaunay 三角网,将图像划分为若干个三角形网格,两核线图像上对应三角形内部的对应像点之间的几何关系可描述为

$$\begin{cases} x' = a_0 + a_1x + a_2y \\ y' = b_0 + b_1x + b_2y \end{cases} \quad (6)$$

这样就得到场景内所有同名像点之间的关系,如图 3 所示^[15]。

由三角形的 3 个顶点坐标,用最小二乘的方法可以计算得到式(6)中的各个系数。由于每个三角形都很小,故可以使用式(6)来表示三角形内部点的匹配关系。通过构成的这些小三角形,并结合对应的式(6)可快速实现两核线图像重叠区域所有像点的匹配。

3 实验结果

在实验室内进行如下模拟试验,将两台 CCD 固定在摄影基线约为 20 cm 的基线上,并进行了精确标定,相机的内方位元素结果见表 1,外方位元素结果见表 2,参数意义参考文献[12]。

用两相机构成的导航系统,在试验场内获取一系列图像,图像大小为 640 像素 \times 480 像素,部分图像如图 4(a)和(e)所示。按照本文算法首先进行核线纠正,生成如图 4(b)和(f)所示的核线图像;并用由粗到精的匹配策略进行匹配和检验结果,构建 Delaunay 三角网如图 4(c)和(g)所示。并用匹配的点进行了点坐标和三维可视化的恢复,图 4(d)和(h)为从不同角度恢复的三维图形。

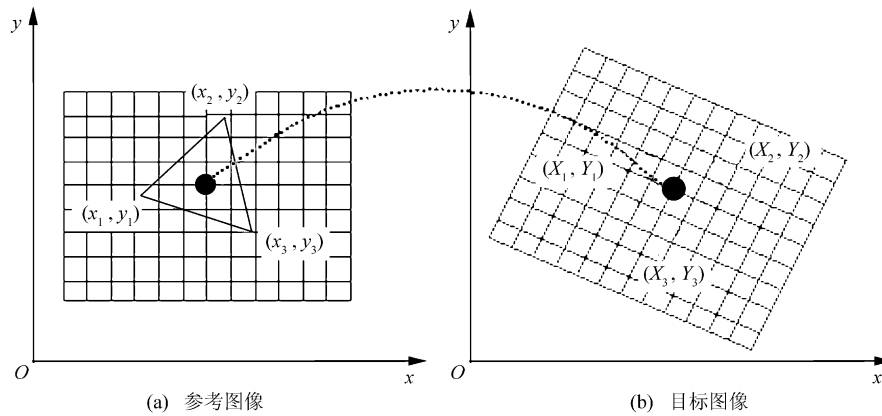


图 3 三角形内对应像点的匹配关系

Fig. 3 Obtaining relation algorithm of overlap regions diagram

表 1 两相机内参数

Table 1 Interior parameters of two cameras

相机	f/mm	x_0/mm	y_0/mm	$k_1/10^{-2}$	$k_2/10^{-5}$
左	4.89	0.02	-0.05	1.93	-2.16
右	4.93	-0.12	-0.02	1.92	-3.80

相机	$k_3/10^{-5}$	$p_1/10^{-4}$	$p_2/10^{-4}$	$b_1/10^{-2}$	$b_2/10^{-5}$
左	9.65	-3.35	-1.94	-4.10	5.56
右	7.22	-2.48	-1.00	-4.08	-8.95

表中： f 为焦距； x_0, y_0 为像主点坐标； k_1, k_2, k_3 为径向畸变参数； p_1, p_2 为偏心畸变参数； b_1, b_2 为像平面畸变参数。

表 2 右相机相对左相机的外参数

Table 2 Exterior parameters of two cameras

X/mm	Y/mm	Z/mm
197.76	0.71	-2.40

ω	κ	φ
$180^\circ 49' 24.8''$	$183^\circ 40' 30.9''$	$180^\circ 26' 21.9''$

表中： X, Y, Z 为右相机像空间坐标系相对于左相机像空间坐标系的平移参数； ω, κ, φ 为右相机像空间坐标系相对于左相机像空间坐标系的旋转参数。

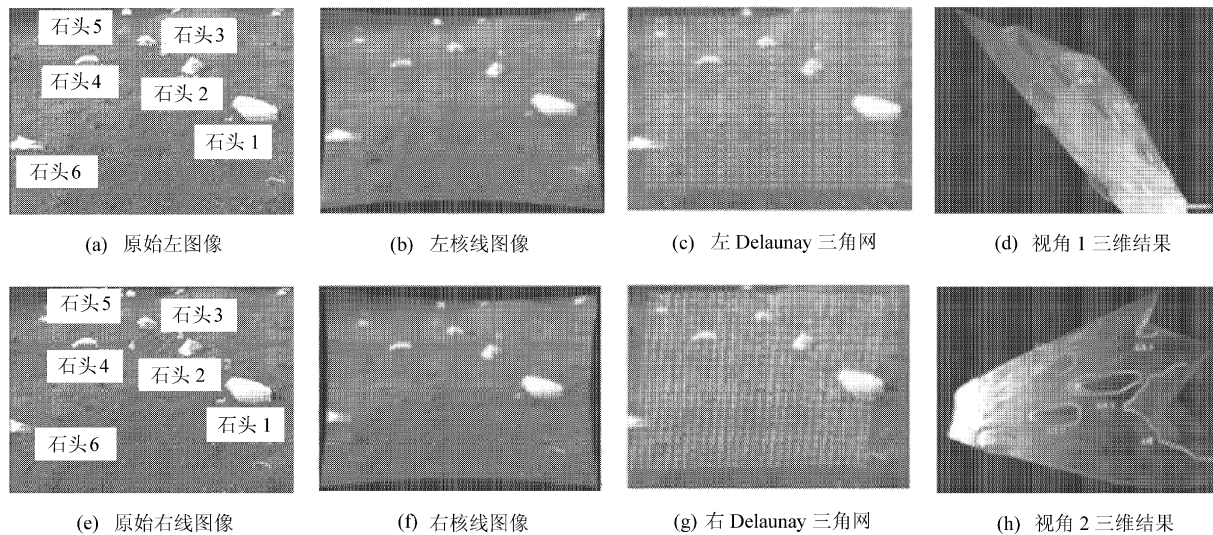


图 4 匹配实验结果示意图

Fig. 4 Results of matching two pictures diagram

在生成的地形图中，对特征地物进行了量测并与实际长度进行了比较（如图 4 中的石头），在 10 m 的范围内误差在 4 cm 以内。系统的匹配整体结果较为稳定可靠，但也存在个别区域匹配较差，通过对 20 组图像中格网点的人工检验，匹配误差大于 3 个像素的占 4.6%。影响匹配误差的

主要原因包括：相机硬件的优劣和标定参数精度的高低。文献[1]对标定参数精度的影响进行了详细的推导，并给出了精度估算的数学模型。受实验条件限制，当前未能完成不同相机对匹配结果的分析比较，有待进一步完善。上述的匹配计算是在 Pentium4 CPU2.4 GHz、内存为 512 MB

和显卡为 REDEON9550 的计算机上进行的,整个过程耗时 1 min 15 s。如果格网间隔增加或减少 Delaunay 三角网的匹配点数量,均可以进一步提高匹配的速度,可根据设计要求进行调整。

4 结 论

本文基于核线约束条件,采用由少到多、由粗到细和多重检验的策略对月球车立体视觉系统中的图像进行稠密恢复,该算法兼顾了匹配的速度、精度和可靠性。先使用相关系数匹配实现图像的粗匹配;用连续性控制和双向匹配来进行结果的检查,提高粗匹配的可靠性;对粗匹配进行最小二乘匹配,实现亚像素匹配;在精确匹配的基础上,构建 Delaunay 三角网实现重叠区域的稠密匹配;实验结果进一步验证了上述结论。下一步,将采用专业的相机进行匹配试验,对不同硬件取得的匹配结果进行分析比较;对匹配算法进行进一步优化,从而提高匹配的速度;增加一些辅助手段如激光测距,为视觉系统的匹配提供一些先验的信息,从而进一步提高匹配的准确性和可靠性。

参 考 文 献

- [1] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉:武汉大学出版社,2002.
Feng Wenhao. Close-range photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press,2002. (in Chinese)
- [2] 黄桂平. 数字近景摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津:天津大学,2005.
Huang Guiping. Study on the key technologies of digital close range photogrammetry and applications[D]. Tianjing: Univerisity of Tianjing,2005. (in Chinese)
- [3] Kurada S, Rankin G W, Sridhar K. A trinocular vision system for close-range position sensing[J]. Optics & Laser Technology, 1995,27(2):75-79.
- [4] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3(4):323-344.
- [5] 权铁汉,于起峰. 摄影测量系统的高精度标定与修正[J]. 自动化学报,2000,26(6):748-755.
Quan Tiehan, Yu Qifeng. High-accuracy calibration and correction of camera saystem[J]. Acta Automatic Sinica, 2000,26(6):748-755. (in Chinese)
- [6] 朱永松,国澄明. 基于相关系数的相关匹配算法的研究[J]. 信号处理,2003,19(6):531-534.
Zhu Yongsong, Guo Chengming. The research of correlation matching algorithm based on correlation coefficient [J]. Signal Processing, 2003, 19(6): 531-534. (in Chinese)
- [7] Liao J H, Yin B Z, Lao W W. Photoelectric detection system in the recognition and sorting equipment of bill[C]// Proc SPIE Int Soc Opt Eng. 1998,3558:646-651.
- [8] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo corespondence algorithms [J]. IJCV,2002,47:7-42.
- [9] Schaffalitzky F, Zisserman A. Viewpoint invariant texture matching and wide baseline stereo[C]// Proc IEEE Int Conf Computer Vision. 2001:636-643.
- [10] van Ee R, Schor C M. Unconstrained stereoscopic matching of lines[J]. Vision Research, 2000,40(2):151-162.
- [11] Loayza H, Triboulet J, Lelandais S, et al. Matching segments in stereoscopic vision[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2001,4(1):37-42.
- [12] 王保丰. 计算机视觉工业测量系统的建立与标定[D]. 郑州:信息工程大学,2004.
Wang Baofeng. Establishing and calculating industring survey system of computer vision[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2004. (in Chinese)
- [13] 孙纪章,陈继华. 空间直角坐标转换参数初值的确定[J]. 军事测绘,2004,4:25-26.
Sun Jizhang, Chen Jihua. Calculating transition preliminary parameters between two right-angled coordinate system [J]. Journal of Martial Surveying and Mapping, 2004,4: 25-26. (in Chinese)
- [14] 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,1996:159-210.
Zhang Zuxun, Zhang Jianqing. Digital photogrammetry [M]. Wuhan: Geomatics and Information Science of Wuhan University Publishing Company, 1996: 159-210. (in Chinese)
- [15] 邢帅. 多源遥感影像配准与融合技术研究[D]. 郑州:信息工程大学,2004.
Xing Shuai. Study on matching and fusing multi-sensors remote sensing image data[D]. Zhengzhou: Information Engineering University,2004. (in Chinese)

作者简介:

王保丰(1977—) 男,博士。主要研究方向:计算机视觉测量与精密工程测量等。

Tel:010-66363139

E-mail:hnwbf@163.com

(责任编辑:张利平,鲍亚平)