

文章编号 1004-924X(2007)06-0945-06

三维运动分析中的运动-立体双匹配约束

张春森

(西安科技大学 测量工程系, 陕西 西安 710054)

摘要: 为保证在基于点特征的三维运动分析中运动物体不同时刻任意物方特征点的对应, 对该过程中存在的图像运动-立体匹配问题进行了研究。提出了运动-立体匹配相结合, 分阶段的运动-立体双匹配约束的方法。即采用松弛法点特征匹配算法完成图像间的基本匹配, 通过运动-立体双匹配约束完成运动物体特征点的对应。给出了一组真实的实验数据, 结果表明: 该算法总的正确率达 76.5%, 基本达到了三维运动物体定位跟踪中特征点对应的要求。

关键词: 图像匹配; 序列图像; 三维运动分析

中图分类号: TP751 **文献标识码:** A

Motion-stereo double matching restriction in 3D movement analysis

ZHANG Chun-sen

(Department of Survey, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to realize the correspondence of arbitrary object side feature points of moving object in the different time in three-dimensional (3D) movement analysis, motion-stereo image matching in the process is studied. A algorithm of double matching restriction and motion-stereo image of matching is presented. The basic image matching based on point feature is completed by correlation coefficients and relaxation algorithm, and the feature point correspondence of movement object is performed by motion-stereo double matching restriction of binocular sequence image. A set of experiment results are presented, it shows that the accuracy of the final correspondence is about 76.5%, which can meet the requirements of the 3D motion object tracking and locating the feature points.

Key words: image matching; sequence image; 3D motion analysis

1 引言

在计算机视觉领域, 序列图像的三维运动分析占有重要地位。通过由双目立体计算机视觉系统获取不同时刻运动物体的双序列图像从而进行三维物体运动估计的方法, 与单序列方法相比较

具有较强的抗噪性, 而且能够得到空间物体运动的绝对量^[1,4], 因此具有较大的吸引力。常规的方法是首先确定运动物体任意特征点间的对应, 然后根据这些对应点来估计三维运动参数, 其中对应点的求解是一个难点。目前国内外对该问题的研究仅停留在采用模拟数据验证算法的有效性方面 ([Zhang Z, 1995], [P. K. Ho&R.

收稿日期: 2006-10-19; 修订日期: 2007-01-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 40171080); 陕西省教育厅专项科研计划项目(No. 06KJ239)

Chung2000], [Y. Altunbasak 1995], [F. Dornaika and R. Chung & R. Chung2000]等)。在双序列图像运动分析的特征对应中,不但存在不同序列间的双目立体匹配,同时还存在同一序列前后图像间的运动匹配,因此双序列图像的运动、立体图像匹配及其结合就成为三维运动分析走向实用最具挑战性的问题。本文采取松弛法点特征匹配算法,首先提取运动物体任意特征点,并以灰度相似性为准则建立起初始匹配集;通过基于匹配支持度的概率松弛迭代法完成图像间的特征匹配。在上述图像匹配的基础上,利用运动—立体图像双匹配约束,确定运动物体特征点的对应。最后采用上述方法,给出了一组真实数据的实验结果。

2 双匹配约束

2.1 物体特征点提取及其初始匹配

从图像中提取特征点是基于特征图像匹配的第一步,本文采用 Harris 算子,对序列图像上任意特征点(角点)进行提取。实验表明该算子具有简单、稳定,对噪声、光照等情况不敏感,可以定量提取且所得特征点分布合理的特点。

初始匹配的目标即确定一个候选匹配对集合 T ,本文采用相关系数法^[2]:即对每个特征点 m_1 图像 a , m_2 的图像 b , 设它们的图像坐标分别为 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) , 如果 m_1, m_2 的坐标相差不超过某一阈值, 分别计算以 m_1, m_2 为中心的 $(2n+1) \times (2n-1)$ 窗口的灰度相关系数。给定一对对应点, 如果认为是候选匹配点, 则相关系数必须大于某一阈值。这样就建立了图像 a 某一特征点与图像 b 中若干特征点的候选匹配关系。将该点对加入到候选匹配对集合 T 中。

2.2 基于匹配支持度的松弛法

松弛法是指允许候选匹配对集合 T 中的候选匹配对通过迭代自我解散、自我重新配对。使得其“连续性”和“唯一性”得到最大的满足。“连续性”指正确匹配对的邻域内通常存在着大量其它正确匹配对;“唯一性”则是指同一特征点最多只能存在于一个匹配对中。也可表述为候选匹配若为正确匹配, 则其周围存在较多的候选匹配; 候选匹配若为错误匹配, 则其周围存在较少的候选匹配。将邻域候选匹配对该候选匹配的支持程度

定义为匹配支持度, 也就是匹配支持度越大, 该候选匹配越可能为正确的匹配。具体的算法如下^[2,3]:

设有两特征点集 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 和 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$, 对每一点对 (P_i, Q_j) , 定义两特征点集间的相对的偏移。令 $\delta_{ij}(h, k)$ 为当 P_i 与 Q_j 配对时(仅作平移) P_i, P_h 与 Q_j, Q_k 间的相对距离。

$$\delta_{ij}(h, k) = \frac{|d(P_i, P_h) - d(Q_j, Q_k)|}{\text{dist}(P_i, P_h; Q_j, Q_k)} \quad (l=1, 2, \dots), \quad (1)$$

这里, $d(P_i, P_h) = \|P_i - P_h\|$, 为 P_i 和 P_h 之间的欧几里得距离。 $d(Q_j, Q_k) = \|Q_j - Q_k\|$, 为 Q_j 和 Q_k 之间的欧几里得距离。

$\text{dist}(P_i, P_h; Q_j, Q_k) = [d(P_i, P_h) + d(Q_j, Q_k)]/2$ 。假如 $|\delta_{ij}(h, k)| = 0$, 则表示 Q_k 相对于 Q_j 等同于 P_h 相对于 P_i , 因此点对 (P_h, Q_k) 应当给予 (P_i, Q_j) 以最大的支持。随着 $|\delta_{ij}(h, k)|$ 的增加, 其支持度减少。

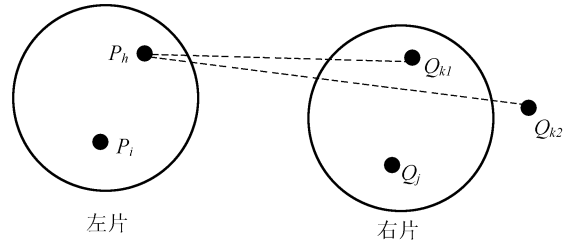


图 1 松弛匹配中的支持度计算示意图

Fig. 1 Illustration of matching support measure in relaxation matching

如图 1 所示, Q_j 是 P_i 的一个候选匹配特征点, 需要给这个匹配对一个支持度来表示它是正确匹配对的可信程度。如果 P_i 和 Q_j 是正确的匹配, 那么其邻域内的特征点分布就应该是相似的。即 P_i 的邻域内如果有一个点 P_h , 那么 P_h 的候选匹配点 Q_{k1}, Q_{k2} 中就会有某个点落在 Q_j 的邻域中, 或者全部落在邻域中。定义 (P_h, Q_k) 对 (P_i, Q_j) 的支持度为:

$$\phi(|\delta_{ij}(h, k)|) = \frac{1}{1 + |\delta_{ij}(h, k)|^2}, \quad (2)$$

假定当 P_i 和 Q_j 配对时, P_h 仅与一个 Q_k 相配对, 即与 P_h 相联系的且对 (P_i, Q_j) 的支持度最大的 Q_k 只有一个。该支持度由下式给出:

$$\phi(|\delta_{ij}(h,k)|) = \begin{cases} \max_{k \neq j} \phi(|\delta_{ij}(h,k)|) \\ e^{-\delta_{ij}(h,k)/\epsilon_r} \text{ 如果 } Q_j \text{ 是 } P_i \text{ 的一个候选匹配点, 同时 } |\delta_{ij}(h,k)| < \epsilon_r \\ 0 \text{ 其它,} \end{cases} \quad (3)$$

其中: ϵ_r 是相对距离变化的阈值, 计算中取经验值。

由于 P_h 的候选匹配点 Q_{kl} 不止一个, 所以 $\phi(|\delta_{ij}(h,k)|)$ 的值不止一个, 只取其中最大值 $\max_{k \neq j} \phi(|\delta_{ij}(h,k)|)$ 作为点 P_h 和其待匹配点对 (P_i, Q_j) 支持度。实际计算中, P_i 邻域中的点不止一个, 如果用 $N(P_i)$ 来表示点 P_i 邻域中的点集 (不包括 P_i), 逐个计算 $N(P_i)$ 中的点对 (P_i, Q_j) 的支持度, 最后用累加后的平均值作为总的初始支持度:

$$S^0(P_i, Q_j) = \frac{1}{m} \sum_{h \neq i} \max_{k \neq j} \phi(|\delta_{ij}(h,k)|), \quad (4)$$

其中: m 是 $N(P_i)$ 中点的个数。

在计算 $S^0(P_i, Q_j)$ 时, 因为没有先验知识, 平等地看待每一个点对 (P_h, Q_k) , 但是在第 r 次迭代 ($r > 0$) 后, (P_h, Q_k) 对 (P_i, Q_j) 的支持度不仅依赖于 P_h 和 Q_k 间的位置差别, 也依赖于它们的 $S^{-1}(P_i, Q_j)$ 值, 即允许局部支持度的反馈。这两个因素可以以不同的方式结合在一起, 取它们中的最小值, 因此有:

$$S^r(P_i, Q_j) = \frac{1}{m} \times \sum_{h \neq i} \max_{k \neq j} [\min[S^{-1}(P_i, Q_j), \phi(|\delta_{ij}(h,k)|)]] \quad (5)$$

对每一个 P_i 除最可能的点对以外其余所有点对的支持度均小于给定的阈值时迭代结束。

2.3 双匹配约束

在基于物方“图像”序列三维运动分析中, 同时间、不同序列间的双目立体图像匹配与不同时间、同序列前后图像间的运动匹配, 是同时存在的。从图像处理的方法来说, 这两种匹配的目的是相同的。在保证运动物体三维特征点对应的过程中, 既可采取先运动后立体的匹配策略也可采取先立体后运动的匹配策略。然而不同的匹配顺序对最终获得的运动物体任意三维特征点的整体对应却将产生不同的效果。在实际操作过程中, 由于运动图像序列相邻像幅运动间隔较近, 获得的图像相似。因此同一摄像机的运动匹配具有解决特征对应问题相对容易的优点; 与此对应, 不同

摄像机间通常具有一定的基线, 虽然视点间的距离大, 可使立体视觉间的三维重建精度高, 但立体匹配困难, 特别是当存在大视差、图像变形时, 情况更是如此。“双匹配约束”是指为保证运动物体任意特征点运动前后物方坐标点整体的对应, 运动-立体两种匹配必须同时满足的一种约束匹配。双匹配约束过程如图 2 所示, 其中: t_i 时刻立体视觉的左右图像分别用 I_i 和 I_i' 表示, 图像平面 I_i 与 I_i' 上对应的特征点分别用 m_i 和 m_i' 表示, 与 m_i, m_i' 对应的运动物体三维特征点用 M_i 表示, $R_{i,i+1}, t_{i,i+1}$ 为描述运动物体自 t_i 时刻到 t_{i+1} 时刻的旋转与平移量, $R_{L,R}, t_{L,R}$ 为描述立体视觉左右摄像机间的旋转与平移量。特征点 m_i 与 m_i' 间的匹配为立体匹配; 特征点 m_i 与 m_{i+1} 或 m_i' 与 m_{i+1}' 间的匹配为运动匹配; 特征点 M_i 与 M_{i+1} 间的对应为运动物体任意三维特征点的对应。图中 $i=3$ 。

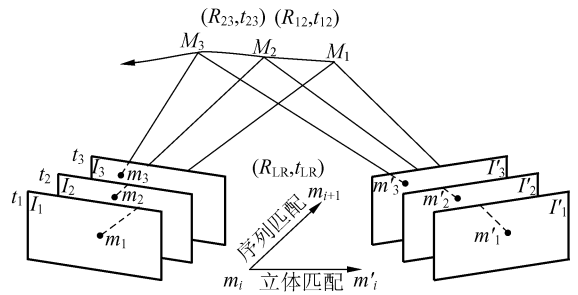


图 2 运动-立体双匹配约束示意图

Fig. 2 Motion-stereo double matching restriction of binocular sequence image

为完成双匹配约束, 首先对不同时刻同一序列(前后)运动图像进行特征提取, 在两图像的特征之间建立起原始匹配表, 找出某一特征在另一图像上所有可能的候选匹配特征。根据上述的匹配方法和一些假设, 在一定范围内考虑周围特征匹配的相容性, 找出最佳候选特征作为最终的匹配结果, 确定序列图像中提取特征点的对应关系, 完成双图像序列(其中之一)的运动(序列)匹配。这时只要图像序列采样密度合适, 就能保证获得可靠的运动序列图像特征匹配; 其次, 用上述运动

匹配获得的匹配对应点和与之对应的、同一时刻的不同序列图像进行(左右图像)立体匹配。为提高计算速度与匹配精度,在进行运动匹配前,采取通过图像差分检测出动态运动物体,将匹配对象限制在运动物体上(摒弃运动物体静止背景部分)的策略。

3 真实数据实验结果

通过为本研究而建立的双目立体视觉系统,对室内以某种方式运动的模型小车获取双序列运动图像。根据三维运动物体定位跟踪的要求,通过运动—立体双匹配约束,以达到运动物体任意三维特征点的对应。其具体步骤如下:

(1)对运动物体双序列图像进行运动匹配,得到如图 3 所示的同一序列 t_1, t_2 时刻对应图像的运动匹配结果,其坐标匹配文件如表 1。其中的 X, Y 与 X', Y' 分别为 t_1, t_2 时刻,同一特征点运动匹配的坐标。

(2)将步骤(1)的匹配结果,分别与同一时刻的对应图像进行立体匹配,根据前一阶段的匹配结果(坐标),有目的地去寻找与之立体配对的另一序列图像上的对应特征点,实现双匹配约束。图 4、5 分别为 t_1, t_2 时刻不同序列对应图像的立体匹配结果,表 2 与 3 分别为其对应的匹配坐标文件。其中 X, Y 与 X', Y' 分别为 t_1 (或 t_2) 时刻,同一特征点立体匹配的坐标。

表 1 t_1, t_2 时刻图像匹配坐标

Tab. 1 Image matching coordinate at time t_1 and t_2

像点坐标(pixel)	X	Y	X'	Y'
1	129.0	150.0	139.0	151.0
2	133.0	152.0	143.0	153.0
3	127.0	153.0	137.0	154.0
4	160.0	126.0	170.0	127.0
5	157.0	126.0	167.0	127.0
6	180.0	136.0	190.0	137.0
7	153.0	149.0	163.0	150.0
8	110.0	130.0	121.0	131.0
9	138.0	148.0	148.0	149.0
10	162.0	148.0	171.0	149.0
11	157.0	148.0	167.0	149.0
12	183.5	135.5	194.5	136.5
13	108.0	148.0	118.0	149.0
14	187.5	131.5	197.5	132.5
15	172.0	128.0	182.0	129.0



图 4 t_1 时刻不同序列对应图像立体匹配结果

Fig. 4 Results of the different sequence stereo matchings at time t_1

表 2 t_1 时刻立体图像匹配坐标

Tab. 2 Stereo image matching coordinates at time t_1

像点坐标(pixel)	X	Y	X'	Y'
1	129.0	150.0	158.0	148.0
2	133.0	152.0	162.0	150.0
3	127.0	153.0	156.0	151.0
4	160.0	126.0	190.0	123.0
5	157.0	126.0	187.0	123.0
6	180.0	136.0	211.0	132.0
7	153.0	149.0	183.0	146.0
8	110.0	130.0	139.0	129.0
9	138.0	148.0	168.0	146.0
10	162.0	148.0	193.0	144.0
11	157.0	148.0	187.0	145.0
12	108.0	148.0	136.0	147.0
13	172.0	128.0	203.0	124.0



图 3 同一序列 t_1, t_2 时刻前后对应图像运动匹配结果

Fig. 3 Results of the same sequence motion matchings at time t_1 and t_2



图 5 t_2 时刻不同序列对应图像立体匹配结果

Fig. 5 Results of the different sequence stereo matchings at time t_2

表 3 t_2 时刻立体图像匹配坐标

Tab. 3 Stereo image matching coordinates at time t_2

像点坐标(pixel)	X	Y	X'	Y'
1	139.0	151.0	169.0	149.0
2	143.0	153.0	173.0	150.0
3	137.0	154.0	167.0	152.0
4	170.0	127.0	200.0	123.0
5	167.0	127.0	197.0	123.0
6	190.0	137.0	222.0	132.0
7	163.0	150.0	193.0	146.0
8	121.0	131.0	151.0	129.0
9	148.0	149.0	178.0	146.0
10	171.0	149.0	202.0	145.0
11	167.0	149.0	198.0	145.0
12	118.0	149.0	147.0	148.0
13	182.0	129.0	213.0	125.0

(3)根据所得的摄像机检校参数,计算运动前后 t_1, t_2 时刻与表 2 与 3 对应的物方空间坐标,该坐标是 t_1, t_2 时刻运动物体三维特征对应点的物方空间坐标。计算结果如表 4 与 5 所示。

在完成运动物体特征点对应的过程中,特征点匹配是由相关法、松弛法得到的,而这些方法使用的是启发知识,如灰度的相似等。同时,在实际摄像时,左右摄像机坐标系存在一定旋转角度,摄像机也存在量化误差,同一个空间点在左右图像上的位置都会有变化,由此造成透视投影误差。此外,左右两个摄像机的内部参数不完全相同,使得对应点的灰度不完全相同,造成非校准误差等。

表 4 t_1 时刻运动物体特征点物方空间坐标

Tab. 4 Spatial coordinates of moving object feature points at time t_1

点号	X(dm)	Y(dm)	Z(dm)
1	1.499	1.007	-0.128
2	1.435	1.074	-0.078
3	1.516	0.957	-0.065
4	1.041	1.626	-0.681
5	1.089	1.573	-0.682
6	0.613	1.896	-0.514
7	1.075	1.418	-0.178
8	1.809	0.713	-0.597
9	1.291	1.139	-0.209
10	0.867	1.546	-0.249
11	1.016	1.493	-0.198
12	1.860	0.642	-0.159
13	0.770	1.788	-0.688

表 5 t_2 时刻运动物体特征点物方空间坐标

Tab. 5 Spatial coordinates of moving object feature points at time t_2

点号	X(dm)	Y(dm)	Z(dm)
1	1.266	1.146	-0.143
2	1.213	1.222	-0.097
3	1.284	1.097	-0.079
4	0.886	1.803	-0.664
5	0.935	1.752	-0.664
6	0.374	2.022	-0.548
7	0.926	1.601	-0.156
8	1.587	0.887	-0.605
9	1.152	1.328	-0.181
10	0.719	1.698	-0.226
11	0.784	1.629	-0.226
12	1.639	0.791	-0.166
13	0.602	1.953	-0.669

上述因素不可避免地使所得到的匹配结果存在误匹配的可能。这里虽然采用了基于特征的图像相关匹配、基于匹配支持度的松弛法匹配、基于灰度的图像相关匹配以及限定范围在局部区域内进行匹配等多种图像匹配策略以保证运动物体特征点的对应,但发现仍有个别数量的误匹配点,如在上述实验中,由步骤(1)到步骤(3)的过程中正确特征点的个数是在逐步减少的。如步骤(1)同序列图像特征提取、图像匹配特征点数为 17 个,正确匹配的为 15 个,即步骤(2)不同序列对应图像立

体匹配的特征点数为 15 个,而完全满足三维对应的特征点有 13 个,其总体正确匹配率为 76.5%。为此在程序中增加了特征匹配的稳健算法,如采用摄影测量领域中成熟的光束法平差理论,自动发现特征匹配或对应中的错误,在系统中形成一个反馈控制过程。所以,提高求解特征对应的稳健性等问题值得进一步研究。

4 结 论

为完成基于点的三维运动物体定位跟踪,本

文讨论了该过程中最具挑战性的运动物体特征点的对应问题,通过分析该过程中不同形式图像匹配的特点,提出了运动、立体匹配相结合,分阶段的运动—立体双匹配约束的方法。利用运动视频图像重叠多的有利条件,通过真实实验验证,其总体正确匹配率为 76.5%,达到了三维运动物体定位跟踪特征点的要求。进一步优化特征点对应的稳健算法,将是今后研究的课题。

参考文献:

- [1] HARTLEY R, ZISSERMAN A. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Cambridge University Press, 2000.
- [2] 张春森. 序列立体图像三维运动物体定位与跟踪[D]. 武汉大学, 2004.
ZHANG CH S. Research of 3-D Motion Object Tracking Location Based on Stereo Sequence Images [D]. *Dissertation of Wuhan University*, 2004. (in Chinese)
- [3] ZHANG Z, DERCHE R, FAUGERAS O, *et al.*. A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry[J]. *Artificial Intelligence*, 1995, 78(1-2): 87-119.
- [4] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
MA S D, ZHANG ZH Y. *Computer Vision: Fundamentals of Computational Theory and Algorithms* [M]. Beijing: Sciences Press, 1998. (in Chinese)
- [5] HO P K, CHUNG R. Stereo-motion with stereo and motion in complement [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 2(2): 215-220.
- [6] DORNAIKA F, CHUANG R. Cooperative stereo-motion; matching and reconstruction [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2000, 79(3): 408-427.
- [7] ZHANG Z Y. Motion and structure of four points from one motion of a stereo rig with unknown extrinsic parameters [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(12): 1222-1227.
- [8] 曾峦, 张可黛, 李生良. 用极线束约束方法进行图像匹配后的质量控制[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(3): 221-224.
ZENG L, ZHANG K D, LI SH L. Quality control after matching or image using constraint of epipolar line bunch[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 221-224. (in Chinese)
- [9] 叶海加, 陈昱, 邢渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1): 71-75.
YE H J, CHEN G, XING Y. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 71-75. (in Chinese)
- [10] 胡小平, 廖海洋. 数字摄影测量中特征点的提取方法研究[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 242-245.
HU X P, LIAO H Y. Methodology study of feature point extraction in digital photogrammetry [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(Supp.): 242-245. (in Chinese)
- [11] 杜建军, 高栋, 孔令豹, 等. 光学自由曲面误差评定中匹配方法的研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(1): 137-142.
DU J J, GAO D, KONG L B, *et al.*. Study of matching methods for error evaluation of optical free-form surface[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(1): 137-142. (in Chinese)
- [12] YANG ZH H, QI ZH Q, FANG J CH. Immune recognition algorithm and its application to air target detection and recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 198-204.

作者简介: 张春森(1963—), 男, 陕西西安人, 副教授, 博士, 主要从事数字摄影测量计算机视觉及遥感应用技术的研究。

E-mail: zhchunsen@yahoo.com.cn