

分层关联的多目标跟踪算法研究

杨国亮 张进辉

(江西理工大学电气工程与自动化学院 赣州 341000)

摘 要 检测跟踪(Tracking by detection)是近年来多目标跟踪领域的一个主要研究方向。遵循检测跟踪框架,提出一种基于分层关联的全局性的数据关联算法。首先利用目标检测器在整个视频上检测目标,得到检测响应;然后利用广义最小团图在视频片段中对检测响应进行数据关联,得到轨迹片段;最后再在整个视频中对轨迹片段进行分层关联,得到最终的轨迹。在公共数据集上的测试结果表明,该算法能够有效地对多个目标进行数据关联,具有较强的处理遮挡能力。

关键词 检测,多目标跟踪,分层数据关联,广义最小团,轨迹片段,遮挡处理

中图分类号 TP391.9 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.09.059

Research on Multi-object Tracking Using Hierarchical Data Association

YANG Guo-liang ZHANG Jin-hui

(School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract Tracking by detection is a main research direction in the field of multi-target tracking in recent years. We proposed a global multi-object tracking algorithm using hierarchical data association following the tracking by detection framework. We first obtained the detection response in the whole video using an object detector, and then utilized the to solve the data association problem on detection response in video clip and obtained tracklets. At last we obtained the object track by solving the association problem on tracklets in whole video using a hierarchical method. Experiments on the public datasets show the proposed method can solve data association and handle occlusion effectively.

Keywords Detection, Multi-object tracking, Hierarchical data association, Generalized minimum clique graphs, Tracklet, Occlusion handling

1 引言

多目标跟踪是许多计算机视觉应用的基础,提升多目标跟踪的性能对这些应用至关重要。虽然对此有大量的研究,但是由于存在遮挡等各种各样的原因,目前鲁棒跟踪多个目标依然十分困难。

近些年科研人员提出很多多目标跟踪算法,它们基本上都是从全局优化的角度来求解,本文提出的算法也是一种基于全局优化的多目标跟踪算法。这种方法主要是考虑在整个视频序列上进行数据关联。其优点是利用了全局的信息,即整个视频中目标的信息,所以能够较好地处理 ID 转换、遮挡等问题,该类方法可以分为以下几类。

第一类可以概述为基于费用网络流图的跟踪。如 Hao J^[1]等将目标数量固定的跟踪建模为一个离散优化问题,然后采用线性规划来获得该问题的最优解。Li Z^[2]等将多目标跟踪建模为一个最大化后验概率问题(MAP),然后指出该 MAP 问题可以映射到一个具有源点和汇点的费用流网络上,再采用一个最小费用流算法来解该问题。更进一步, Pirsivash H^[3]等分析了该最小费用流问题,并提出用贪心算法来解决该网络流问题,显著提高了计算效率。Berclaz J^[4]等通过

将待跟踪区域进行离散化分割,然后将多目标跟踪视为整数规划问题再采用一种 K 最短路径(K-shortest Path)算法解该问题,他们提出的算法大大地提高了收敛速度。后来, Shitrit H B^[5]等又在该算法中融入了表观信息。Butt A A 和 Collins R T^[6]提出以连续两帧中成对的检测作为图中的节点,然后对目标函数采用拉格朗日松弛以获得一个结果可接受的解。这样做的好处是,融入了高阶运动信息,获得的轨迹具有一定的平滑性。

另一类算法考虑一种基于迭代分层关联的方法连接轨迹片段(Tracklets)。Huang C^[7]等提出了一种分层关联检测响应的方法,该方法用 3 层关联以得到最终的轨迹。Yuan L^[8]等使用一种称为 HybridBoost 的算法来学习目标的相似函数。进一步地,Bo Y^[9]等使用 CRF 模型移除了轨迹片段相互独立的假设,并且使用 RankBoost 算法来选择用于计算费用的特征。

其他类的算法比较有代表性的有: Brendel W^[10]等提出了一种基于最大加权独立集(Maximum Weight Independent set)的跟踪,他们把连续两帧中的检测响应进行关联作为一个节点,然后把不满足非交叉约束(Non-overlapping Constraint)的节点相连,最后将多目标跟踪建模为在图中寻找最

到稿日期:2013-11-08 返修日期:2014-02-24 本文受国家自然科学基金项目(51365017),江西省科技厅青年科学基金(20132bab211032)资助。
杨国亮(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为模式识别与图像处理、智能控制, E-mail: ygliang30@126.com; 张进辉(1987-),男,硕士,主要研究方向为模式识别与图像处理。

大加权独立集的问题。Andriyenko A^[11]等另辟蹊径,直接考虑目标与检测响应的关系、目标之间的关系、目标的全局运动模型等等,把多目标跟踪建模为一个无约束条件的目标函数最小化问题。后来,他们又在该算法中融入了对遮挡的建模^[12]。使用广义最小团问题(Generalized Minimum Clique Problem, GMCP)来建模多目标跟踪^[13]是 Zamir A 等最近提出的一种算法,他们把视频帧分割为多个分割段,先在每个分割段中用 GMCP 对多目标跟踪建模,得到轨迹片段,然后在整个视频上用 GMCP 建模,解该 GMCP 问题得到目标的轨迹。本文所提出的算法受该算法的启发。

在检测跟踪框架中,首先从输入为视频帧的检测器中得到检测响应,然后采用数据关联算法对不同帧中的检测响应进行对应,以找出属于同一目标的检测响应,同一个目标在不同帧中的检测响应就构成了该目标的运动轨迹。可以看出,在该框架中检测与跟踪是两个独立的步骤。本文提出的算法遵循检测跟踪框架,即首先采用基于梯度方向直方图(HOG^[14])的目标检测算法对视频中的目标进行检测,然后采用本文提出的数据关联算法对检测响应进行关联,最后输出目标轨迹。

本文第 2 节阐述如何由检测响应得到轨迹片段;第 3 节阐述如何将轨迹片段生成最终的轨迹;第 4 节为实验结果;最后总结全文。

2 在视频片段中跟踪

2.1 GMCP 概述

设 $G=(V, E, W)$ 表示无向加权图,其中 V 表示图中的节点集合, E 表示边界集合, $W: E \rightarrow R^+$ 表示边上的权值集合。将节点集合划分为 f 个不相交集 C_1, \dots, C_f , 满足 $C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_f = V$ 且 $C_1 \cap C_2 \cap \dots \cap C_f = \emptyset$ 。GMCP 的目标是在 G 中的每个不相交的集合 $C_i (i=1, \dots, f)$ 中找一个顶点,由这些顶点诱导的完全子图具有最小费用^[15]。GMCP 的可行解可以表示为 $G_s=(V_s, E_s, W_s)$, 其中 V_s 表示 V 的子集, E_s 为由 V_s 诱导的完全图的边集, $W_s: E_s \rightarrow R^+$ 为该完全子图边上的权值集合。GMCP 及其可行解如图 1 所示。在图 1 中 $f=4$, 实线顶点及边构成 GMCP 的一个可行解, 虚线顶点及边也构成 GMCP 的一个可行解, GMCP 的最优解就是在可行解中寻找具有最小权值和的解。

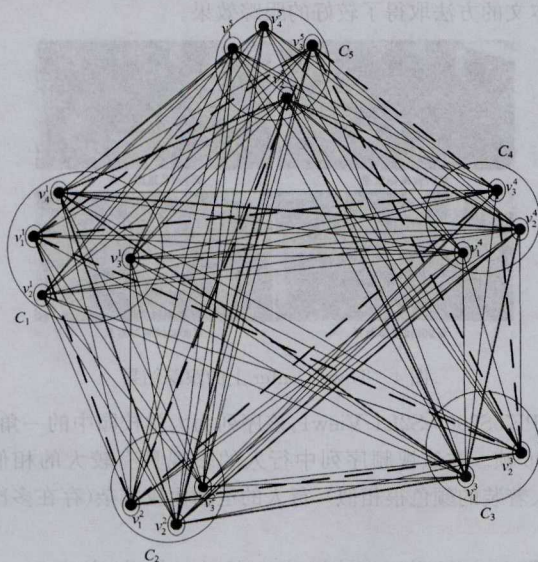


图 1 广义最小团问题及其可行解

2.2 建模多目标跟踪为 GMCP

首先,将视频分割为 S 个片段,每一片段包含 f 帧,在视频片段中跟踪即并行地在每一片段中进行跟踪。在某一片段中,第 i 帧的检测响应集合用 $C_i (i=1, \dots, f)$ 表示, $C_i = \{v_1^i, v_2^i, v_3^i, \dots\}$, 其中第 i 帧中的第 j 个检测响应用 v_j^i 表示,与 v_m^i 和 v_n^i 关联的边上的权值用 $w(v_m^i, v_n^i)$ 表示,则在视频片段中跟踪多目标问题可以用算法 1 来描述。

算法 1

1. 构图:以视频片段中的检测响应为节点,在不同帧的节点之间创建一条边,构建广义团图 G ;
2. 解 GMCP:在图 G 中寻找 G_s 最优解,此时得到的 V_s 即为某个目标在各个帧中的位置集合,这些节点即构成目标的轨迹片段;
3. 重新构图:在图 G 中删除由步骤 2 找出的顶点及关联的边,得到新的图 G ;
4. 判断:图 G 中是否还有剩余顶点,若有则转至 2, 否则结束。

2.3 目标相似度计算

计算目标的相似度即为计算图 G 的边的权值。在视频片段中,本文假设目标的表现变化不大,通常这也是符合实际情况的。所以,采用的边权值计算方法为: $w(v_m^i, v_n^i) = k(\phi_m^i, \phi_n^i)$, 其中 $k(\phi_m^i, \phi_n^i)$ 表示两个目标 v_m^i 和 v_n^i 的直方图 ϕ_m^i 和 ϕ_n^i 之间的相似性,本文采用 Bhattacharyya 距离来计算。

2.4 GMCP 数学描述

由上述描述可知,在视频片段中跟踪的关键是寻找 GMCP 的最优解。设 E 为边集,设置如下的指示变量:

$$x_{uv} = \begin{cases} 1, & \text{表示解包含边 } uv \\ 0, & \text{表示解不包含边 } uv \end{cases} \quad (1)$$

$$x_u = \begin{cases} 1, & \text{表示解包含顶点 } u \\ 0, & \text{表示解不包含顶点 } u \end{cases} \quad (2)$$

则可将 GMCP 表述为:

$$\text{Minimize } \sum_{uv \in E} w_{uv} x_{uv} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{u \in C_i} x_u = 1, \text{ for } i=1, \dots, f \quad (4)$$

$$\sum_{u \in C_i} x_{uv} = x_v, \text{ for } i=1, \dots, f \text{ and for all } v \in V \setminus C_i \quad (5)$$

$$x_u, x_{uv} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

其中, w_{uv} 表示边 uv 权值。可以看出该问题是 NP-hard 的,目前尚无较有效的解法。本文通过将 x_u, x_v 的 0,1 约束松弛至 $[0, 1]$, 然后利用线性规划来求解,即使用单纯形法迭代地寻找可行域的极点。虽然该问题的约束矩阵并不为全幺模矩阵,但是在本文的实验中,有较大的概率能够获取整数解。

2.5 短时遮挡处理

若以手动标定的数据作为检测结果,那么以上的算法能够很好地解决在视频片段中跟踪的问题,但是通常检测响应包含很多不确定因素,如漏检、误检等,而其很大一部分原因是由遮挡引起的,所以分析遮挡是多目标跟踪的关键。

遮挡可分为部分遮挡和完全遮挡:当目标被部分遮挡时,有对应的检测响应,但该响应的某一部分被其它目标的检测响应覆盖,如图 2(a)所示;当目标被完全遮挡时,该目标无对应的检测响应,如图 2(b)所示。

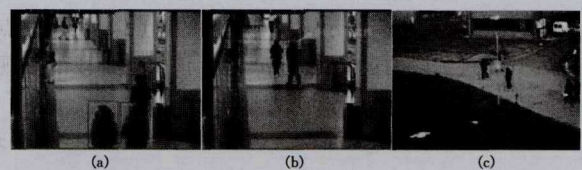


图 2 目标遮挡情况分析

同时,遮挡又可以分为目标间的遮挡、背景对目标的遮挡

及目标的自遮挡(本文不考虑自遮挡):当目标间存在遮挡时,可以根据遮挡推理^[12]来处理;当目标被背景遮挡时(如图2(c)所示),通常很难去判断这种遮挡的存在,也就很难去单独处理这种情况。受文献^[13]的启发,本文在每一帧中增加一个假设节点来处理遮挡问题。具体做法如下:

当目标被遮挡时,将无法利用其表现信息;但是对某个目标而言,在短时间内,其运动却不会发生变化,所以此时可以利用其运动信息。基于此,假设对目标在短时间内(一个视频片段中)的运动用常速运动模型建模,则目标应该符合直线运动,设该直线方程为 $x(t) = \alpha \cdot t + \beta$, 其中 $x(t)$ 表示目标在第 t 帧中的位置, α, β 为待确定的二维运动参数。假设采用单纯形法迭代求解 GMCP 问题时获得的解为 $X = \{x_j^{i+1}, x_k^{i+2}, \dots, x_m^{i+f}\}$, 则根据最小二乘法,可以计算参数 α 和 β 。此时当某一帧中的检测响应的位置 x 与直线的距离小于 θ 时,说明目标符合运动模型,在该帧中不增加假设节点;当距离大于 θ 时,说明目标的运动不符合运动模型,认为目标被遮挡,此时增加一个假设节点,该假设节点的位置可根据直线方程计算。该假设节点的表现符合该运动模型的节点的平均表现。不同于文献^[13],当目标存在比较充分的证据时,本文不增加假设节点。此时可根据增加的假设节点来替代被遮挡的节点来计算目标函数(3)。遮挡处理的结果如图3所示。



图3 遮挡处理

3 在整个视频中跟踪

3.1 轨迹片段分析

经过上述的短时跟踪方法生成的轨迹片段具有以下特点:1. 因为假设运动模型为线性,所以轨迹片段具有平滑性;2. 因为当目标被遮挡时,将生成一个假设节点,所以轨迹片段具有连续性;3. 根据轨迹片段可以获得目标的运动信息。所以,本文通过采用逐步关联的方法来对轨迹片段进行关联。

3.2 关联轨迹片段

在视频中跟踪就是对各个视频片段中所生成的轨迹片段再逐步关联,以得到目标在整个视频中的轨迹。此时,若将轨迹片段表示为图中的节点,则可再用 GMCP 对该问题建模^[13]。实际上,对轨迹片段进行数据关联无须再采用 GMCP,可以利用轨迹片段的特征采用一种更高效的方法。具体方法如下:

1) 对第 i 个视频片段中的第 j 条轨迹片段,用 $v_j = (b_j, e_j, m_j^i, a_j^i)$ 表示,其中 b_j 表示该轨迹片段的起点, e_j 表示终点, m_j^i 表示该轨迹片段的运动模型, a_j^i 表示该轨迹片段的表现,为该条轨迹上所有目标的平均表现。

2) 对连续两条轨迹片段 v_j, v_k , 其中 $|i-l|=1$, 根据式

(7)计算轨迹片段相似度,根据式(8)进行关联:

$$\text{similarity}(v_j, v_k) = \begin{cases} \alpha_1 \exp(-|e_k - b_j|) + \alpha_2 \exp(-|m_j^i - m_k^l|) + \alpha_3 \exp(-|a_j^i - a_k^l|), & \text{if } i > l \\ \alpha_1 \exp(-|e_j - b_k^l|) + \alpha_2 \exp(-|m_j^i - m_k^l|) + \alpha_3 \exp(-|a_j^i - a_k^l|), & \text{if } i < l \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{if } \text{similarity}(v_j, v_k) > \zeta \text{ then associate } v_j \text{ and } v_k \quad (8)$$

其中, $e_k - b_j, e_j - b_k^l$ 表示两个连续两段中轨迹片段的位置偏差, $m_j^i - m_k^l$ 表示两条轨迹片段的运动方向的偏差, $a_j^i - a_k^l$ 表示两条轨迹的表现偏差, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 表示位置、运动、表现权重,在我们的实验中设置 $\alpha_1 = 2.0, \alpha_2 = 1.0, \alpha_3 = 2.0$ 。因为,对连续两个视频片段而言,同一目标轨迹的位置应该具有连续性,表现具有相似性,运动方向具有一致性,同时参数设置会考虑到场景的复杂性。经过上述关联方法,若还存在未关联轨迹片段,则判断发生轨迹片段遮挡。

3) 当发生轨迹片段遮挡时,对未关联的轨迹片段在整个视频中进行关联。本文使用与式(7)同样的相似度计算方法,但是设置参数 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0.5, \alpha_3 = 2.0$ 。因为,在整个视频中,目标的运动可能会有很大的改变,此时表现信息将发挥主要的作用。

经过上述轨迹片段关联,可以得到目标在整个视频片段中的轨迹。

4 实验结果

本文提出的算法在2个标准测试序列(Town Center^[16], PETS2009-S2L1-View1)^{1),2)}上进行了测试,这些测试序列包含了很多难以处理的情况,如目标数量较多、短时遮挡、长时遮挡、目标间的遮挡、目标被场景遮挡等。使用C++和OpenCV2.3.1实现了本文的代码,实验结果在双核CPU为2.93GHz,内存为2GB的PC机上得出。

Town Center:该序列为某个闹市区的一角,包含4500帧。因为行人基本上以直线路径行走,所以本文以40帧为一个片段进行分割。该视频中的行人数量很多且行人之间存在大量遮挡。在第57帧、第190帧、第966帧及第2002帧上的跟踪结果如图4所示(检测结果来自于文献^[16])。可以看出,本文的方法取得了较好的跟踪效果。



图4 Town Center上的跟踪结果

PETS2009-S2L1-View1:该序列为大学校园中的一角,包含795帧。在该视频序列中行人的表现具有较大的相似性(行人着装的颜色很相似),行人的运动比较复杂(存在多次的

¹⁾ Town Center 数据集: http://www.robots.ox.ac.uk/ActiveVision/Research/Projects/2009bbsfold_headpose/project.html#datasets

²⁾ PETS2009 数据集: <http://www.cvg.rdg.ac.uk/PETS2009/a.html>

往复运动、圆周运动等),且目标可能被背景遮挡。本文以 15 帧为一个片段进行分割,在第 235 帧、第 480 帧、第 549 帧及第 643 帧上的跟踪结果如图 5 所示(检测结果来自于 Anton Milan¹⁾,可以看出本文的算法能够较好地处理遮挡问题。



图 5 PETS2009-S2L1-View1 上的跟踪结果

同时,本文以 CLEAR MOT^[17]对提出的跟踪算法进行了定量的性能评价。其中,多目标跟踪准确度(Multiple Object Tracking Accuracy, MOTA)表示对误检、假正和标识转换的评价,多目标跟踪精度(Multiple Object Tracking Precision, MOTP)表示对检测精度的评价。本文的算法的评价结果如表 1 所列。

表 1 CLEAR MOT 评价结果

	MOTA	MOTP
Town Center	74.42	70.5
PETS2009-S2L1-View1	84.47	67.8

本文将提出的算法与 Berclaz J^[4]的基于 KSP 的跟踪、Li Z^[2]的基于网络流的跟踪(Network)和 Fitzgibbon A^[13]的基于 GMCP 的跟踪在 PETS2009-S2L1-View1 和 Town Center 数据集上进行了对比,结果如图 6 和图 7 所示。

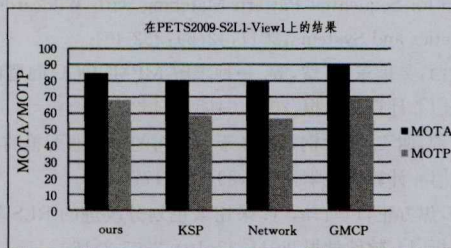


图 6 在 PETS2009-S2L1-View1 上的对比结果

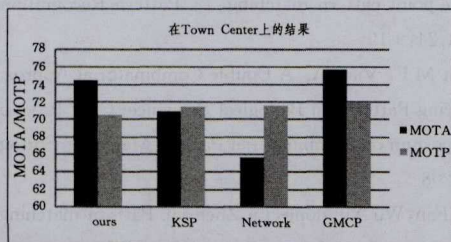


图 7 在 Town Center 上的对比结果

本文提出的算法的运行速度与场景中的目标数量及视频

片段的帧数有较大的关系,但是在本文的实验中,处理速度可以达到 4fps/s。

结束语 根据目标在短时间内和长时间内的表现及运动信息不同,本文构建了一种分层关联的多目标跟踪算法。算法首先将短时间内的多目标跟踪建模为广义最小团图问题,通过解广义最小团图,获得了短时间内目标的轨迹;在长时间的跟踪阶段,利用目标在长时间内的表现和运动特点对上一步获得的轨迹进行关联,获得目标的最终轨迹。实验表明,本文算法能够有效地处理短时遮挡问题,且具有较好的跟踪效果。但是对于长时间的遮挡,本文算法跟踪效果还不是特别完善,这是我们下一步的工作重点。

参考文献

- [1] Hao J, Fels S, Little J J. A Linear Programming Approach for Multiple Object Tracking[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007 (CVPR' 07). Minneapolis, MN, 2007: 1-8
- [2] Li Z, Yuan L, Nevatia R. Global data association for multi-object tracking using network flows[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008 (CVPR 2008). Anchorage, AK, 2008: 1-8
- [3] Pirsiavash H, Ramanan D, Fowlkes C C. Globally-optimal greedy algorithms for tracking a variable number of objects[C]// 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, RI, 2011: 1201-1208
- [4] Berclaz J, Fleuret F, Turetken E, et al. Multiple Object Tracking Using K-Shortest Paths Optimization[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(9): 1806-1819
- [5] Ben Shitrit H, Berclaz J, Fleuret F, et al. Tracking multiple people under global appearance constraints[C]// 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Barcelona, 2011: 137-144
- [6] Butt A A, Collins R T. Multi-target Tracking by Lagrangian Relaxation to Min-cost Network Flow[C]// 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Portland, OR, USA, 2013: 1846-1853
- [7] Forsyth D, Torr P, Zisserman A, et al. Robust Object Tracking by Hierarchical Association of Detection Responses[M]// Forsyth D, Torr P, Zisserman A. Computer Vision-ECCV 2008. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 788-801
- [8] Yuan L, Chang H, Nevatia R. Learning to associate: Hybrid-Boosted multi-target tracker for crowded scene[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009 (CVPR 2009). Miami, FL, 2009: 2953-2960
- [9] Bo Y, Chang H, Nevatia R. Learning affinities and dependencies for multi-target tracking using a CRF model[C]// 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, RI, 2011: 1233-1240
- [10] Brendel W, Amer M, Todorovic S. Multiobject tracking as maximum weight independent set[C]// 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, RI, 2011: 1273-1280
- [11] Andriyenko A, Schindler K. Multi-target tracking by continuous

¹⁾ <http://www.gris.informatik.tu-darmstadt.de/~aandriye/data.html>

energy minimization[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, RI, 2011; 1265-1272

- [12] Andriyenko A, Roth S, Schindler K. An analytical formulation of global occlusion reasoning for multi-target tracking[C]//2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops). Barcelona, 2011; 1839-1846
- [13] Roshan Zamir A, Dehghan A, Shah M. GMCP-Tracker: Global Multi-object Tracking Using Generalized Minimum Clique Graphs[C]//Computer Vision-ECCV. 2012; 343-356
- [14] Suard F, Rakotomamonjy A, Benshair A, et al. Pedestrian Detection Using Infrared images and Histograms of Oriented Gradients [C] // Intelligent Vehicles Symposium, 2006. Tokyo:

IEEE, 2006; 206-212

- [15] Feremans C, Labbe M, Laporte G. Generalized network design problems[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 148(1):1-13
- [16] Benfold B, Reid I. Stable multi-target tracking in real-time surveillance video[C]//2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Providence, RI, 2011; 3457-3464
- [17] Kasturi R, Goldgof D, Soundararajan P, et al. Framework for Performance Evaluation of Face, Text, and Vehicle Detection and Tracking in Video: Data, Metrics, and Protocol[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009, 31(2):319-336

(上接第 273 页)

本实验的目的在于比较 SBO 和 SPLIT_SBO 的时间消耗,其中每一组数据都是 50 个随机模式匹配时间的累加,以消除随机误差。可得如下结论:

(1)由图 11 和图 12 可知,在不同模式模长 m 和通配符跨度 g 的情况下,相比于 SBO, SPLIT_SBO 能够有效降低时间消耗,且随着 B 的增加, SPLIT_SBO 时间优势逐渐加大。当 B 增加到一定阈值时,图 12 中 SPLIT_SBO 的时间消耗会上升,因为此时 B 的大小已超过完备划分下子空间的数目。SPLIT 只能消耗更多的搜索分割点的时间,却无法进一步划分子空间。

(2)比较图 11 和图 12,在较长的文本中调用 SPLIT,解空间较大,可提高 B 的阈值。本文认为文本长度、模式特征与 B 阈值大小满足某种关系,这也作为下一步研究工作。

综上所述,实验结果表明:(1)SPLIT 对解空间的划分是完备的,即在不影响原有匹配解的结构下能快速定位分割点;(2)SPLIT 可以有效降低非线性匹配算法的时间复杂度,且时间消耗与通配符跨度、模式模长、子空间数目和文本长度有关。

结束语 本文以 PMWL 问题为研究对象,着重研究了问题的解空间,有如下贡献:(1)描述了 PMWL 问题的解空间,分析了解空间的可分性;(2)提出一种面向 PMWL 解空间的划分算法 SPLIT。该算法在不影响匹配解结构的前提下能显著降低非线性匹配算法的时间复杂度。对此本文在生物 DNA 序列数据上进行了实验验证。下一步工作将从模式特征角度和并行计算角度对 PMWL 问题的复杂性进行研究。

参 考 文 献

- [1] Chen Gong, Wu Xin-dong, Zhu Xing-quan, et al. Efficient string matching with wildcards and length constraints[J]. Knowledge and Information Systems, 2006, 10(4): 399-419
- [2] Cole J R, Chai B, Marsh T L, et al. The ribosomal database project (RDP-11): Sequences and tools for high-throughput rRNA analysis[J]. Nucleic Acids Research, 2005, 33(1): 294-296
- [3] Xie Fei, Wu Xin-dong, Hu Xue-gang, et al. Sequential Pattern Mining with Wildcards[C]//22nd IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI). Arras, France, 2010; 241-247
- [4] He Yu, Wu Xin-dong, Zhu Xing-quan, et al. Mining Frequent Patterns with Wildcards from Biological Sequences[C]//IEEE

International Conference on Information Reuse and Integration. Las Vegas, IL, 2007; 329-334

- [5] Califf M E, Mooney R J. Bottom-up relational learning of pattern matching rules for information extraction[J]. Journal of Machine Learning Research, 2003, 4(6): 177-210
- [6] Manber U, Baeza-Yates R. An algorithm for string matching with a sequence of don't cares[J]. Information Processing Letters, 1991, 37(3): 133-136
- [7] Fischer M J, Paterson M S. String matching and other products [R]. Massachusetts Institute of Technology Cambridge Project MAC, 1974; 113-125
- [8] Zhang Ming-hua, Kao B, Cheung DW, et al. Mining periodic patterns with gap requirement from sequences[C]//Proc. of ACM SIGMOD. Baltimore Maryland, 2005; 623-633
- [9] Bille P, Gørtz I L, Vildhøj H, et al. String matching with variable length gaps[C]//Proc. of 17th SPIRE. 2010; 385-394
- [10] Muthukrishnan S, Krishna P. Non-standard stringology: algorithms and complexity [C]//Proc. of the twenty-sixth annual ACM symposium on Theory of computing. New York, NY, USA, 1994
- [11] Guo Dan, Hong Xiao-li, Hu Xue-gang, et al. A Bit-Parallel Algorithm for Sequential Pattern Matching with Wildcards[J]. Cybernetics and Systems, 2011, 42(6): 382-401
- [12] 武优西, 吴信东, 江贺, 等. 一种求解 MPMGOOC 问题的启发式算法[J]. 计算机学报, 2011, 34(8): 1452-1462
- [13] 侯宝剑, 谢飞, 胡学钢, 等. 基于后缀树的带有通配符的模式匹配研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 177-180
- [14] 张雁, 焦方正, 卢昕玮, 等. 采用染色划分改进的 RLS 算法及性能分析[J]. 软件学报, 2011, 22(10): 2305-2316
- [15] Zhang Li-hua, Xu Wen-li, Chang Cheng. Genetic algorithm for affine point pattern matching[J]. Pattern Recognition Letters, 2003, 24: 9-19
- [16] Sagot M F, Viari A. A Double Combinatorial Approach to Discovering Patterns in Biological Sequence[C]//Proc. of the 7th Symposium on Combinatorial Pattern Matching. Springer, 1996; 186-208
- [17] Min Fan, Wu Xin-dong, Lu Zhen-yu. Pattern matching with independent wildcard gaps[C]//Eighth IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC-2009). Chengdu, China, 2009; 194-199
- [18] National center for biotechnology information website[OL]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>