

УДК 004.932.2::004.051

СНИЖЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАТРАТ НА ПРОЦЕСС УСТАНОВЛЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ КАДРОВ И СТЕРЕОПАР

Гришин В. А., к.т.н., старший научный сотрудник Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), доцент Московского государственного технического университета имени Н. Е. Баумана, e-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

Ключевые слова: системы технического зрения, бортовые системы реального времени, алгоритмы установления соответствия, вычислительные затраты

Введение

В статье рассматриваются алгоритмы, предназначенные для установления соответствия изображений одних и тех же точек поверхности при обработке последовательностей кадров и стереопар. Алгоритмы предназначены для установления соответствия разреженного множества точек изображений, что характерно для использования систем технического зрения (СТЗ) в системах управления мобильными объектами, работающими в режиме реального времени [1].

Все многообразие методов установления соответствия можно разделить на два больших класса: методы, устанавливающие соответствие между фрагментами изображений (area-based) и методы, устанавливающие соответствие между особенностями двух изображений (feature-based), использующие наличие пятен, перепадов яркости, угловых точек и т.п. Далее рассматриваются только первые из указанных методов.

Пути уменьшения вычислительных затрат

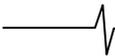
Наиболее эффективным является сочетание методов быстрого вычисления критериальной функции соответствия и динамического программирования [2-4]. Для построения алгоритмов быстрого вычисления критериальных функций соответствия используются методы, характерные для быстрых алгоритмов фильтрации скользящим окном (box-filtering technique). Указанные методы могут использоваться для расчета различных критериальных функций соответствия (корреляционная, сумма модулей разностей, сумма квадратов разностей и т.д.). Следует отметить, что такие алгоритмы установления соответствия требуют для своей реализации больших объемов оперативной памяти. Указанные алгоритмы хорошо подходят для формирования плотного "облака" точек, для которых устанавливается соответствие. В нашем же случае формирование плотного "облака" отсчетов с одной стороны невозможно в силу жестких ограничений на вычислительную сложность, с другой стороны не очень нужно для решения задачи определения параметров относительного движения. В работе [5] для ускорения установления соответствия осуще-

Значительная часть вычислительной мощности процессоров, входящих в системы технического зрения (СТЗ), расходуется на выполнение алгоритмов установления соответствия при обработке последовательностей кадров и стереопар. Особенно это критично для бортовых СТЗ, предназначенных для решения задач управления полетом летательных аппаратов в режиме реального времени. Сравнительному анализу различных путей сокращения вычислительных затрат посвящена данная статья. Анализ ведется применительно к СТЗ, использующей ограниченное число точек привязки на изображениях.

вляется предварительный поиск особенностей (features) на том фрагменте изображения, для которого устанавливается соответствие и на всей области поиска соответствия.

В [6] предлагается использовать базис Уолша-Адамара с переменным числом используемых коэффициентов разложения. Это дает возможность сократить вычислительную сложность в 5-10 раз по сравнению с обычными корреляционными алгоритмами. В [7] предложена весьма эффективная последовательная схема вычисления коэффициентов разложения Уолша-Адамара с формированием оценки нижней грани критериальной функции близости изображений и отбрасыванием бесперспективных вариантов на максимально ранней стадии. Указанные алгоритмы также требуют большого объема оперативной памяти.

Для формирования образов окрестностей точек в данной статье использованы спектральные представления на вложенных носителях [8-10] – рис. 1. Такие представления позволяют уменьшить чувствительность процесса установления соответствия к проективным искажениям, а также сократить вычислительные затраты. Поскольку основная доля энергии реальных изображений сконцентрирована в области низких частот, то для сокращения вычислительных затрат целесообразно ограничиться расчетом спектральных коэффициентов, относящихся к этой области. На рис. 2 представлен набор спектральных коэффициентов для трех окрестностей, используемый для установления соответствия (выделены темным цветом). Верхний левый угол каждого из квадратов соответствует нулевой частоте. В качестве системы ортогональных функций, по которой рассчитываются коэффициенты, используется базис преобразования Уолша-Адамара. Для указанного базиса спектральные коэффициенты вычисляются достаточно просто, кроме того, имеются некоторые дополнительные возможности сокращения вычислительных затрат. В то



же время по величине вероятности аномальных ошибок данный базис весьма мало уступает таким системам ортогональных функций, как Хаара, синусного, косинусного и наклонного преобразований [10]. На рис. 3 приведены использованные базисные функции Уолша-Адамара. Можно отметить, что фактически производится расчет вектора признаков (сигнатуры) изображения, для которого устанавливается соответствие.

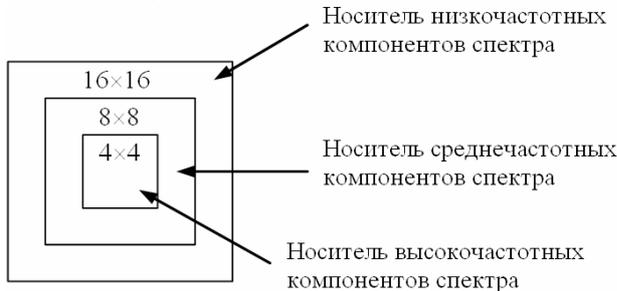


Рис. 1. Вложение носителей пространственных частот.

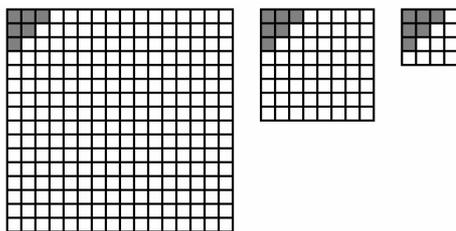


Рис. 2. Набор низкочастотных коэффициентов, используемый для установления соответствия.

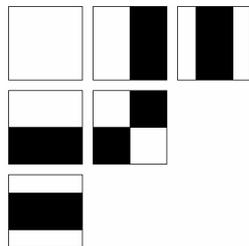


Рис. 3. Использованные базисные функции Уолша-Адамара. Белый цвет соответствует +1, черный –1.

Можно выделить четыре направления снижения вычислительных затрат, используя:

- 1) быстрые алгоритмы вычисления спектральных коэффициентов;
- 2) "поточные" методы вычисления спектров, сходных с методами фильтрации скользящим окном;
- 3) предварительный поиск и классификацию особенностей;
- 4) многоканальные методы установления соответствия на изображениях разного разрешения.

Рассмотрим первое направление. Алгоритмы, предложенные в [6, 7], специально разработаны для решения задач установления соответствия и достаточно эффективны на изображениях малого размера. Однако они требуют для работы большого объема оперативной памяти.

В нашем случае размер наибольшей окрестности равен 16×16 . Можно сделать пересчет окрестностей размера 8×8 и 16×16 к окрестностям 4×4 путем суммирования соседних пикселей и выполнять расчет коэффициентов для них. Для указанных на рис. 3 коэффици-

ентов оба подхода эквивалентны, но второй обеспечивает некоторое сокращение количества вычислительных операций. Кроме того, некоторое уменьшение вычислительных затрат дает формирование промежуточных векторов, являющихся вертикальной и горизонтальными проекциями яркости изображения окрестности (или ее части) на оси координат – рис. 4. Дальнейшие операции по вычислению спектральных коэффициентов производятся с этими одномерными массивами.

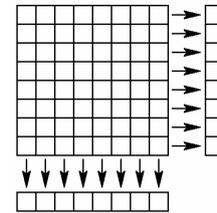


Рис. 4. Проекция яркости на оси координат.

Использование второго направления предполагает минимизацию обращений к памяти. В данном случае могут быть использованы методы, сходные с методами фильтрации скользящим окном (box-filtering technique). А именно, можно обновлять значения яркости только тех пикселей, которые на каждом шаге поиска соответствия попадают во фрагмент изображения, для которого рассчитываются спектральные коэффициенты. Значения яркости тех пикселей, которые выходят из фрагмента – стираются (рис. 5). Кроме того, используется специальный выбор порядка обхода точек (дискретных координат сдвига) в области поиска соответствия. Необходимо обеспечить однократное прохождение каждой из точек траекторией поиска (отсутствие самопересечений). Другим требованием является смещение только на один пиксель по одной из двух координат. Для прямоугольной области такая траектория в простейшем случае имеет вид, показанный на рис. 6.

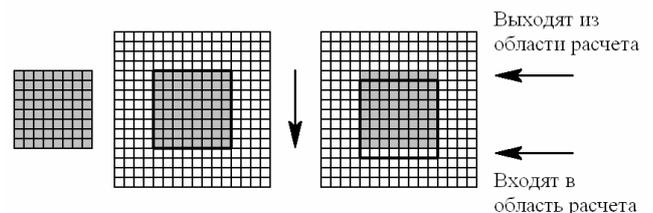


Рис. 5. Перемещение области расчета по изображению.

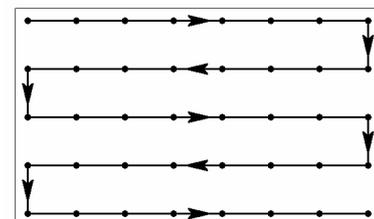


Рис. 6. Траектория поиска соответствия в прямоугольной области.

Использование третьего направления предполагает проведение предварительного поиска особенностей с оценкой значения их целевых функций и сравнения с целевой функцией той особенности, для которой устанавливается соответствие. В этом случае необходимо установ-

ливать границы значений целевой функции особенностей, при попадании в которые производится вычисление спектральных коэффициентов. Если значение целевой функции точки не попадает в указанные границы, то данная точка отбрасывается как бесперспективная. Таким образом, в отличие от второго направления, производится расчет спектральных коэффициентов для ограниченного набора точек, находящихся в области поиска соответствия. Данный подход можно рассматривать как переходную форму к feature-based методам установления соответствия с формированием вектора признаков особенностей (image signature) по их окрестностям.

Четвертое направление предполагает использование идей мультиразрешения, "от грубого к точному" (coarse-to-fine). При этом первоначальный поиск и установление соответствия осуществляется на изображении низкого разрешения. Полученное значение координат используется при поиске на изображении более высокого разрешения в качестве начального приближения. В данном случае использование этого метода связано с некоторыми трудностями, обусловленными тем, что особенность, найденная на изображении низкого разрешения не обязательно будет таковой на изображении более высокого разрешения. По этой причине приходится искать особенности на изображении высокого разрешения в некоторой области, окружающей особенность, обнаруженную на изображении низкого разрешения.

Вычислительный эксперимент

Для получения данных о сравнительной эффективности указанных выше методов был проведен вычислительный эксперимент. Использована последовательность из 8 изображений (1000×1000 пикселей) для монокулярного режима, полученных на натурном стенде Института космических исследований, разработанном в рамках проекта "Фобос-грунт". На рис. 7. приведены два кадра из этой последовательности. Из этой последовательности сформированы 7 пар кадров. По мере уменьшения расстояния до поверхности область поиска соответствия каждой точки увеличивалась от 90×90 до 170×170 пикселей, а количество точек (особенностей), для которых устанавливалось соответствие – уменьшалось с 424 до 256. Общее количество точек, для которых устанавливалось соответствие на

всех 7 парах изображений, равно 2095. Для поиска особенностей, для которых целесообразно устанавливать соответствие, использовался специальный оператор, который можно считать аппроксимацией оператора Лапласа. Указанный оператор отличается малой вычислительной сложностью и удовлетворительным качеством найденных особенностей.

Использованные для оценки эффективности четвертого направления двухканальные алгоритмы обрабатывали изображения низкого разрешения 250×250 пикселей и изображение высокого разрешения - 1000×1000 пикселей. Изображения низкого разрешения были подготовлены заранее. Время, необходимое для формирования 8 изображений низкого разрешения (около 50 мс), не учитывалось при определении времени выполнения двухканальных алгоритмов. Эксперимент проводился на ПЭВМ с процессором AMD Athlon 64X2 Dual Core processor 5200+ (использовалось только одно ядро этого двухядерного процессора). Для уменьшения влияния динамики процессов кэширования информации на время выполнения программы, процесс установления соответствия прогонялся 10 раз для каждой пары изображений, результат усреднялся. Определялась **суммарная** длительность процесса установления соответствия на всех 7 парах изображений.

Следует отметить, что реально количество обрабатываемых точек на кадре может быть порядка 10-30, и размер областей поиска для установления соответствия существенно меньше указанных величин. Таким образом, время обработки кадров будет существенно меньше. Указанные значения были заданы для получения более точных статистических оценок ряда параметров.

Результаты вычислительного эксперимента приведены в табл. 1. Для сравнения приведено также время установления соответствия без использования спектральных представлений (критериальная функция соответствия равна сумме модулей разности яркостей сравниваемых фрагментов) – алгоритм 6. Предварительный поиск и классификация особенностей использовались только в алгоритмах 3 и 5. В алгоритмах 3, 4 и 5 использовался такой же метод вычисления спектральных коэффициентов, как и в алгоритме 1.

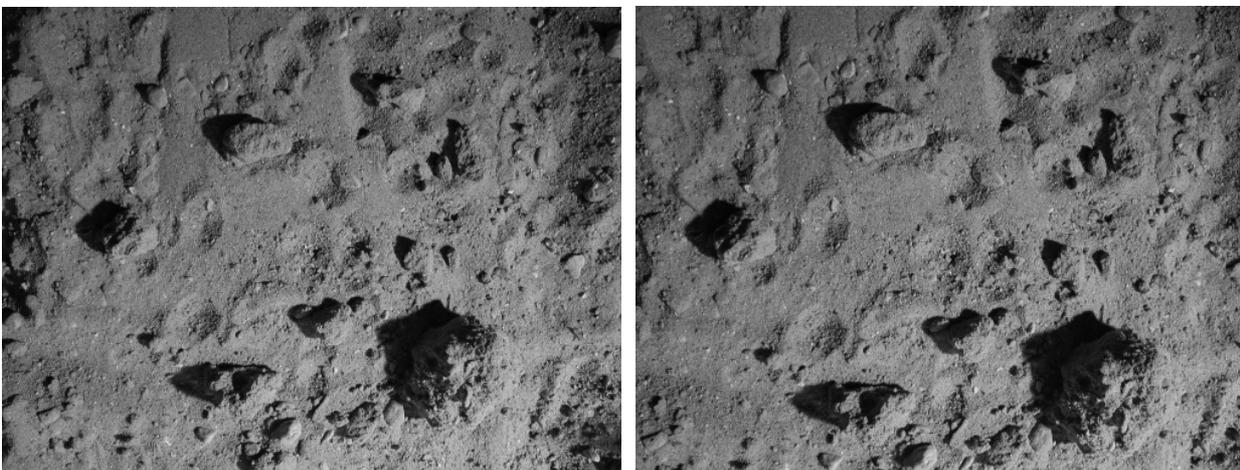


Рис.7. Изображения двух последовательных кадров.

Время, необходимое для выполнения различных видов алгоритмов установления соответствия.

№ алгоритма	Метод установления соответствия	Время выполнения, с.
1	Вычисление спектров с пересчетом окрестностей 8*8 и 16*16 к окрестностям 4*4 и формированием векторов – проекций яркости окрестностей на оси координат.	563
2	Вычисление “поточковых” спектров.	72
3	Предварительный поиск и классификация особенностей.	42
4	Двухканальный алгоритм без предварительного поиска и классификации особенностей.	12
5	Двухканальный алгоритм с использованием предварительного поиска и классификации особенностей.	3,4
6	Поиск без использования спектральных представлений (минимизация суммы модулей разности яркостей сравниваемых фрагментов).	648

Следует отметить, что алгоритм 2 обеспечивает несколько более надежные результаты, чем алгоритм 3. Из рассмотренных алгоритмов наиболее эффективны алгоритмы 4 и 5. Дополнительный прирост производительности обусловлен тем, что изображение малого размера (250×250 пикселей) может полностью поместиться в кэш L1 процессора, что ускоряет вычислительный процесс. Алгоритмы 4 и 5 обеспечивают установление соответствия несколько меньшего количества точек (на 5-10%) вследствие того, что на изображении низкого разрешения (250×250 пикселей) труднее найти особенности с хорошими свойствами привязки.

Получаемые оценки вычислительных затрат приведены для случая трансляции с оптимизацией по времени выполнения программы. Оценки могут отличаться при использовании процессоров с другой архитектурой и системой команд.

Заключение

Таким образом, для указанного спектрального представления на вложенных носителях и ограниченном числе используемых спектральных коэффициентов можно построить алгоритмы установления соответствия, отличающиеся высокой эффективностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 06-08-01497-а, 06-01-00524-а.

Литература

1. Zhukov B., Avanesov G., Grishin V., Krasnopevtseva E. On-Board Real-Time Image Processing to Support Landing on Phobos // Proceedings of the 7th International Symposium: Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations (RCSGSO). Moscow, Russia. 2007. P. 423-428.
2. Faugeras O., Hotz B., Mathieu H., Viéville T., Zhang Z., Fua P., Théron E., Moll L., Berry G., Vuillemin J., Bertin P., Proy C. Real time correlation-based stereo: Algorithm, implementations and applications // INRIA, Tech. Rep. RR-2013, 1993.
3. Sun C. Fast optical flow using 3D shortest path techniques // Image and Vision Computing. 2002, vol. 20, issues 13-14. P. 981-991.
4. Sun C. Fast Algorithms for Stereo Matching and Motion Estimation // Proceedings of Australia-Japan Advanced Workshop on Computer Vision (AJAW03). 2003. P. 38-48.
5. Saleem M., Siddiqui A., Touqir I. An efficient Image Matching Algorithm // Proceedings of 10th world Multiconference on

Systemics, Cybernetics and informatics WMSCI 2006. 2006, vol. V. P. 175-179.

6. Nililus P., Eklundh J.-O. Fast Block Matching with Normalized Cross-Correlation using Walsh Transforms // Computational Vision and Active Perception Laboratory (CVAP), Tech. Report, ISRN KTH/NA/P-02/11-SE, Sept. 2002.
7. Hel-Or Y., Hel-Or H. Real-time pattern matching using projection kernels // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005, vol. 27, issue 9. P. 1430-1445.
8. Гришин В. А., Книжный И. М., Хрекин К. Е. Алгоритмы установления соответствия при обработке изображений для решения задач управления посадкой летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Вып. 4, Т. 1. М.: ООО “Азбука-2000”, 2007. С. 25-32.
9. Гришин В. А. Оптимизация состава спектральных коэффициентов базиса преобразования Адамара для решения задач установления соответствия изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Вып. 5. Т. 1. М.: ООО “Азбука-2000”, 2008. С. 77-83.
10. Гришин В. А., Белинская Е. В. Сравнение спектральных представлений образов окрестностей точек для решения задач установления соответствия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Вып. 6. Т. 1. М.: ООО “Азбука-2000”, 2009. С. 105-112.

REDUCTION OF CORRESPONDENCE ALGORITHM COMPUTATIONAL EXPENSES

Vladimir A. Grishin

Significant part of a computer vision system (CVS) processor computational power is expended during the correspondence algorithm execution. It is particularly significant to on-board CVS, which is intended for flight control tasks in real time. This paper is devoted to the comparative analysis of different ways of computational expense reduction. Analysis has been made in the context of the CVSs, which use limited quantity of feature points.