

Использование спектральной теории графов для уменьшения количества ложных соответствий*

А.А. Захаров, А.Ю. Тужилкин, А.Л. Жизняков

aa-zaharov@ya.ru | ay-tuzhilkin@ya.ru | lvovich@newmail.ru

Россия, Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Рассматривается разработка метода уменьшения количества ложных соответствий на основе спектральной теории графов. Предлагается совместно использовать дескрипторный и структурный подходы для уменьшения количества выбросов. В работе совместно используются метод SURF и алгоритм на основе сингулярного преобразования матрицы смежности графа. Разработан алгоритм нахождения соответствий, проведено его сравнение с алгоритмом RANSAC. Приведен пример работы алгоритма.

Ключевые слова: спектральная теория графов, нахождение соответствий

1. Введение

Успешность нахождения и сопоставления особенностей во многом зависит от углов съемки, характеристик датчиков, временных различий съемки. Кроме того, существенные ограничения накладывают не только параметры съемки, но и геометрические и физические характеристики самой сцены: расположение источника света и элементов сцены, отражательные и рассеивающие свойства поверхностей, повторяемость объектов в сцене. При разработке методов нахождения соответствий пытаются достичь следующих показателей: полной автоматизации процесса; устойчивости к шумам, перекрытиям, оптическим эффектам; высокой скорости обработки, инвариантности к аффинным преобразованиям, возможности обработки снимков с различными фотометрическими характеристиками, масштабом и т.д.

Дескриптор представляет собой метод, который на основе набора признаков некоторой особенности изображения находит соответствия. Наиболее известны следующие дескрипторы: SIFT [5], SURF [1], DAISY [9], ORB [6], BRIEF [2], BRISK [4], HoG [3]. Недостатком подобных подходов является то, что сравниваются отдельные области. При этом не учитывается их взаимное расположение на изображениях. Важной задачей при использовании дескрипторов является уменьшение количества ложных соответствий. Одним из таких подходов для уменьшения ошибок является использование метода RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [8]. В этом случае на основе обнаруженных особенностей находится преобразование, при котором количество совмещаемых точек является максимальным. Следует отметить, что метод RANSAC вы-

полняется итеративно, находя наилучшее решение. Это, соответственно, требует значительных вычислительных затрат.

Для нахождения соответствий также используется сравнение структур особенностей, представленных в виде графов [7]. Недостатком таких подходов является то, что нахождение соответствий сильно зависит от взаимного ориентирования сопоставляемых снимков. В результате одинаковые структуры могут быть образованы различными особенностями на сопоставляемых изображениях. Для уменьшения количества ложных соответствий предлагается совместно использовать дескрипторные подходы (SIFT, SURF и др.) и спектральную теорию графов. Для нахождения соответствий с целью увеличения устойчивости алгоритма предлагается использовать информацию о структуре сцены на основе построения графа, вершинами которого являются особенности изображений.

2. Нахождение соответствий на основе дескрипторов и графов

Разработан алгоритм на основе сингулярного разложения матриц [7]. Пусть имеются два множества особенностей $S_1 = f_{1i} | i = 1, \dots, m$ и $S_2 = f_{2j} | j = 1, \dots, n$ которые получены на основе изображений I_1 и I_2 . Для нахождения соответствий строится матрица расстояний G . Элементы матрицы G находятся в диапазоне от 0 до 1. Каждый элемент матрицы вычисляется по формуле:

$$G_{ij} = e^{-\frac{r_{ij}^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

где: $r_{ij} = \|f_{1i} - f_{2j}\|$ – расстояние между особенностями f_{1i} и f_{2j} ;

σ – коэффициент, который регулирует степень взаимодействия между особенностями.

Уменьшить количество выбросов предлагается за счет использования коэффициента наличия соответствия K . Если соответствие на основе дескриптора найдено, то $K = 1$, иначе $K = 0$. Алгоритм на-

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-37-00236, 15-07-01612), задания на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки России (проект № 2918). Работа опубликована по гранту РФФИ №16-07-20482.

хождения соответствий в этом случае примет имеет вид.

Шаг 1. Построение матрицы расстояний G .

Шаг 2. Выполнение сингулярного разложения матрицы G : $G = TDU$, где D – матрица собственных значений; T и U – матрицы собственных векторов.

Шаг 3. Вычисление матрицы соответствий P путем замены матрицы D на единичную матрицу E : $P = TEU$.

Шаг 4. Вычисление матрицы $M_{ij} = K_{ij}P_{ij}$, где K_{ij} – матрица коэффициентов, определяющих наличие соответствия между i -ой и j -ой особенностями первого и второго изображений.

Шаг 5. Формирование бинарной матрицы L . Идея состоит в том, чтобы получить на основе матрицы M матрицу L , в которой значения, равные 1, свидетельствуют о наличии соответствий между особенностями f_{1i} и f_{2j} . Если текущий элемент матрицы M является максимальным в строке и в столбце, то в бинарную матрицу L записывается значение 1, иначе записывается значение, равное 0. Если значение элемента матрицы L равно нулю, то соответствий между особенностями не существует. Если значение элемента матрицы L равно единице, то соответствия между особенностями с индексами равными номерам строк и столбцов присутствуют. Для значений матрицы M , устанавливается порог z . Значение порога $0 < z < 1$. Если значение $M_{ij} < z$, то найденное соответствие на основе используемого дескриптора исключается из рассмотрения.

3. Исследование алгоритма

Исследование алгоритма проводилось на 50 стереопарах спутниковых изображений. Нахождение соответствий было осуществлено на начальном этапе с помощью метода SURF.

При расчете матрицы расстояний G (1) значение коэффициента σ устанавливается равным расстоянию d между наиболее удаленными особенностями изображений (рис. 1).

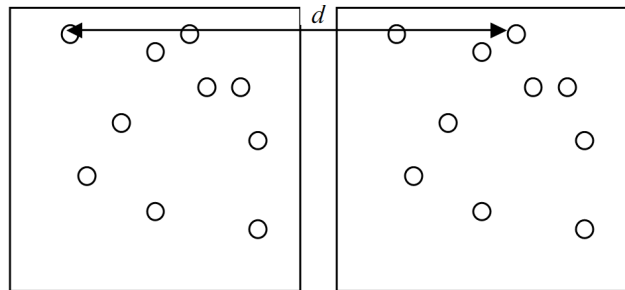


Рис. 1: Расчет коэффициента σ .

При значениях σ , меньших расстояния d в несколько раз, элементы матрицы G_{ij} стремятся к нулю,

что затрудняет сравнение. При значениях σ , больших расстояния d в несколько раз, элементы матрицы G_{ij} стремятся к единице, что также приводит к ошибочным результатам.

На основе разработанного алгоритма были найдены ложные соответствия (рис. 2). Ложные соответствия выделены пунктирными линиями.

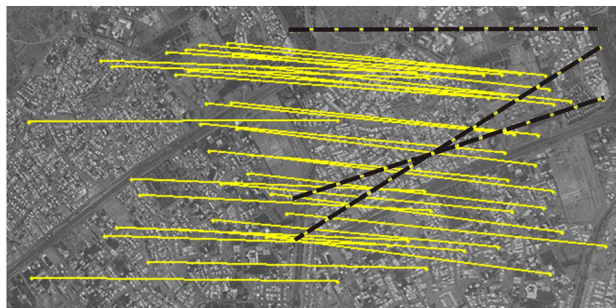


Рис. 2: Нахождение ложных соответствий с использованием разработанного алгоритма.

При выборе порога z установлено, что с уменьшением z количество ложных соответствий увеличивается, а при повышении – уменьшается (рис. 3). В ходе экспериментов было выявлено, что при значении порога 0.6 на некоторых изображениях может быть найдено до 90% ложных соответствий.

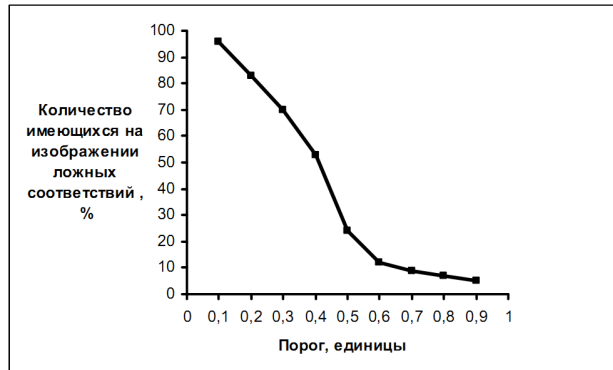


Рис. 3: График, отображающий зависимость количества ложных соответствий от выбранного порога z .

Алгоритм RANSAC (RANdom SAmple Consensus) оценивает исследуемую модель на основе поиска наилучшей гипотезы. Алгоритм RANSAC на основе обнаруженных особенностей находит преобразование, при котором количество совмещаемых точек является максимальным. Предлагается провести сравнение разработанного алгоритма и алгоритма RANSAC.

Сложность разработанного алгоритма в худшем случае составляет $O(m)$, где m – количество найденных соответствий.

Сложность алгоритма RANSAC составляет $O((\log(p)/\log(1 - 1/k^2))n^2)$, где p – вероятность ошибки для рассматриваемой модели, n – количество найденных особенностей, k – количество возможных соответствий для каждой особенности изображения. Таким образом, при реализации алгоритма RANSAC перебрать все возможные гипотезы за приемлемое время не представляется возможным. Поэтому на практике случайным образом для проверки выбирается только некоторое количество гипотез, что сказывается на точности результатов при нахождении соответствий.

4. Пример работы алгоритма

Пусть найдены соответствия между изображениями с помощью алгоритма SURF (рис. 4).

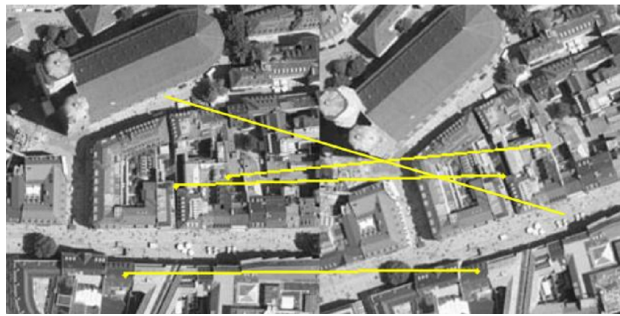


Рис. 4: Пример нахождения ложных соответствий.

Выполним маркировку вершин следующим образом (рис. 5).

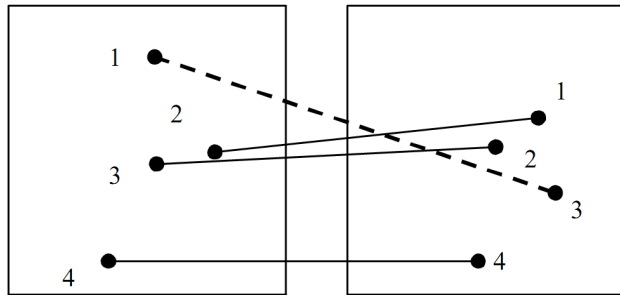


Рис. 5: Маркировка вершин.

Матрица коэффициентов, в которой номер строки соответствует номеру особенности первого изображения, а номер столбца – номеру особенности второго изображения, имеет вид:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Матрица соответствий имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} 0.533 & 0.625 & -0.564 & -0.079 \\ 0.62 & 0.131 & 0.679 & 0.317 \\ -0.576 & 0.726 & 0.216 & 0.31 \\ -0.011 & -0.257 & -0.417 & 0.872 \end{bmatrix},$$

По алгоритму Скотта и Лонгуэтта-Хиггинса [7] находим наибольший элемент в каждой строке и каждом столбце таблицы и получаем бинарную матрицу L , в которой 1 означает наличие соответствия:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Таким образом, по алгоритму Лонгуэтта-Хиггинса соответствия должны быть следующими: 2-3, 3-2, 4-4, что является неверным.

Согласно разработанному алгоритму получаем матрицу $M_{ij} = K_{ij}P_{ij}$:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.564 & 0 \\ 0.62 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.726 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.872 \end{bmatrix},$$

Все коэффициенты матрицы, которые меньше 0.6 считаем равными 0. Таким образом, в соответствии с разработанным алгоритмом получаем следующие соответствия: 2-1, 3-2, 4-4, что является верным.

5. Заключение

В работе предложен подход для уменьшения количества ложных соответствий на основе спектральной теории графов. Разработан алгоритм нахождения соответствий, отличающийся использованием структур дескрипторов, формируемых на основе графов, и позволяющий уменьшать количество ложных соответствий на некоторых изображениях до 90% по сравнению с подходами, основанными только на дескрипторах. Кроме того подход позволяет находить ложные соответствия за конечное число шагов. Сложность алгоритма зависит только от количества найденных соответствий с использованием дескрипторных подходов. Однако алгоритм не позволяет обнаруживать ложные соответствия в том случае, если структуры особенностей, представленных графами, слабо отличаются между собой.

Литература

- [1] Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding, 2008. – Vol. 110, №. 3. – P. 346-359.
- [2] Calonder M., Lepetit V., Strecha C., Fua P. BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features // ECCV, 2010. – Part IV. P.778-792.
- [3] Dalal N., Triggs B. Histograms of Oriented Gradients for Human Detection // Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. – Vol. 1. – P. 886-893.
- [4] Leutenegger S., Chli M., Siegwart R. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints // International Conference on Computer Vision (ICCV'11), 2011. – P. 2548-2555.

- [5] Lowe D. G. Distinctive Image Features from ScaleInvariant Keypoints // International Journal of Computer Vision, 2004. - Vol. 60, № 2. – P. 91- 110.
- [6] Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF // ICCV, 2011. – P. 25642571.
- [7] Scott G., Longuet-Higgins H. An algorithm for associating the features of two images // Proceedings of Royal Society, 1991. – Vol. 244. – P. 21-26.
- [8] Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. – Springer, 2010. – 957 p.
- [9] Tola E., Lepetit V., Fua P. DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010. – Vol. 32, №. 5. – P. 815-830.