

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УСТАНОВЛЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ В СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Гришин В.А.

Введение

Оценка точности установления соответствия необходима для построения модели ошибок измерений системы технического зрения. Такие модели используются для комплексирования измерительных систем различной природы.

Задача оценивания точности установления соответствия является достаточно сложной и производится, как правило, при использовании ряда упрощающих предположений. Чаще всего в качестве модели изображения используются нормальные случайные поля [1-5]. Такое допущение является достаточно спорным в связи с тем, что статистика изображений очень вариабельна и даже в пределах одного кадра может сильно меняться по его площади. Особенно это относится к опорным точкам, которые используются в системах технического зрения для определения параметров относительного движения. Такие точки выбираются при наличии заметных перепадов яркости, конфигурация которых обеспечивает точную их локализацию на разных изображениях. Возможности практического использования таких оценок для реальных изображений очень ограничены, особенно в режиме реального времени.

Другим подходом является использование матрицы Гессе (матрицы вторых производных) яркости изображения для аппроксимации корреляционной матрицы ошибок установления соответствия [6-8]. Однако корректное вычисление матрицы Гессе должно выполняться поточечно для каждой точки окрестности, для которой устанавливается соответствие. Такие расчеты требуют заметных вычислительных ресурсов. В рассматриваемом случае также неявно предполагается, что возмущения, действующие на процесс установления соответствия, изотропны (т.е. не зависят от направления) и некоррелированы по обеим координатам. Сама же оценка определяется с точностью до постоянного множителя, как это явно указано в [6].

Здесь необходимо сделать два замечания. Во-первых, ниоткуда не следует, что возмущения, действующие на процесс установления соответствия, являются изотропными. Например, возмущения, обусловленные искажениями перспективы при полете летательного аппарата, на борту которого установлена камера, будут заведомо не изотропными. Во-вторых, представляется более целесообразным оценивать точность привязки исходя не из матрицы Гессе изображения, а исходя из анализа критериальной функции соответствия изображений. Действительно, точность локализации

Точностные параметры систем технического зрения, используемых для определения параметров движения летательных аппаратов относительно визуруемой поверхности, в значительной степени определяются точностью установления соответствия изображений одних и тех же опорных точек на последовательности кадров. В статье предлагается оценивать ошибки установления соответствия методом эллипсоидов по результатам локального анализа критериальной функции соответствия (близости) изображений в окрестности экстремума. Метод пригоден для реализации в реальном времени на борту летательного аппарата.

экстремума все-таки определяется локальной структурой использованной критериальной функцией соответствия, а не производными яркости изображения.

Представляется, что анализ локальной структуры критериальной функции в окрестности экстремума будет более точен и даст дополнительную информацию о характере возмущений, порождающих ошибки процесса установления соответствия. Примеру такого анализа и посвящена данная статья.

Вывод оценки точности установления соответствия

Рассмотрим задачу оценивания точности установления соответствия точек на стереопарах либо на последовательности изображений с учетом характеристик реального изображения. Необходимую информацию можно извлекать из локальной структуры критериальной функции соответствия окрестностей точки, которая получается при поиске соответствия.

Проблема состоит в том, что невозможно обычным способом получить информацию о законе распределения ошибок установления соответствия. Обычный способ подразумевает, что имеется ряд испытаний, результаты которых используются для определения статистических характеристик (закон распределения, моментов). В данном случае каждое испытание является выборкой из своей генеральной совокупности и нельзя производить оценки по совокупности испытаний, принадлежащих разным генеральным совокупностям, как это сделано, например в [9]. По этой причине в статье используется не закон распределения ошибок, а вероятность попадания ошибки в эллипс рассеивания.

Пусть соответствие ищется в двумерной области. Этот случай характерен для обработки последовательности кадров, снятых одной камерой, либо стереопарам, снятым не калиброванными камерами (когда нельзя использовать эпиполярные ограничения и осуществлять поиск вдоль этих ограничений — т.е. поиск по одномерной области).

В этих случаях, как правило, первоначальный поиск осуществляется по равномерной сетке, часто с шагом, равным шагу пикселей. Рассмотрим случай, когда для получения субпиксельного разрешения используется локальная аппроксимация критериальной функции соответствия полиномом второго порядка по 9 точкам (окрестность 3×3). Поместим начало локальной системы координат в точку, соответствующую максимальному значению критериальной функции. Шаг сетки считаем равным 1 – рис. 1.

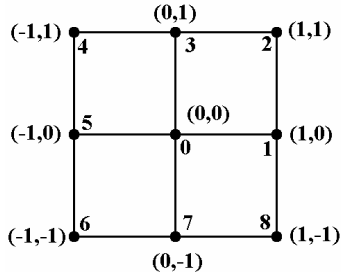


Рис. 1. Локальная система координат по дискретной сетке

Приближим в смысле минимума среднего квадрата ошибок критериальную функцию соответствия квадратичным полиномом. Квадратичный полином имеет вид:

$$f = ax^2 + bx^2 + cxy + dx + ey + g$$

Коэффициенты квадратичного полинома выражают через значения критериальной функции соответствия U_i , $i = 0, 1, 2 \dots 8$ в точках 0, 1, 2 ... 8. Использование для локальной аппроксимации экстремума критериальной функции полинома минимальной степени обусловлено тем, что повышение порядка аппроксимирующего полинома заметно увеличивает вычислительные затраты, но при этом совершенно не обязательно приводит к повышению точности установления соответствия. Анализ причин этого эффекта требует детального анализа статистики критериальной функции. Указанный анализ весьма не тривиален и выходит за рамки данной статьи.

Полученные координаты экстремума x_0 и y_0 позволяют совместить изображения с субпиксельным разрешением. До этого момента никаких дополнительных операций для получения оценок точности установления соответствия не делалось. Теперь предположим, что те причины, которые приводят к появлению ошибок установления соответствия, приводят также и к локальному отклонению отсчетов функции соответствия от квадратичной функции. Оценив эти отклонения, мы получим косвенную оценку указанных возмущений. Для этого перейдем к новой системе координат $(\tilde{x}, \tilde{y})$, начало которой соответствует координатам найденного экстремума (x_0, y_0) .

Запишем уравнения, определяющие положение экстремума при малых возмущениях $\varepsilon(\tilde{x}, \tilde{y})$ по координатам $\tilde{x}$ и $\tilde{y}$:

$$\frac{df}{d\tilde{x}} = 2a\tilde{x} + c\tilde{y} + \varepsilon'_x = 0$$

$$\frac{df}{d\tilde{y}} = c\tilde{x} + 2b\tilde{y} + \varepsilon'_y = 0$$

где ε'_x и ε'_y - производные возмущений $\varepsilon(\tilde{x}, \tilde{y})$ по координатам $\tilde{x}$ и $\tilde{y}$ соответственно. Возмущенное решение определяется из уравнений:

$$2a\tilde{x} + c\tilde{y} = -\varepsilon'_x$$

$$c\tilde{x} + 2b\tilde{y} = -\varepsilon'_y$$

Используя матричную форму записи

$$A = \begin{pmatrix} 2a & c \\ c & 2b \end{pmatrix}, \text{ получим ошибки установления}$$

соответствия при наличии возмущений:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix} = A^{-1} \begin{pmatrix} -\varepsilon'_x \\ -\varepsilon'_y \end{pmatrix}.$$

Корреляционная матрица ошибок определения экстремума, обусловленных возмущениями:

$$M \left\{ \begin{pmatrix} \tilde{x}^2 & \tilde{x}\tilde{y} \\ \tilde{x}\tilde{y} & \tilde{y}^2 \end{pmatrix} \right\} = M \left\{ A^{-1} \begin{pmatrix} -\varepsilon'_x \\ -\varepsilon'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\varepsilon'_x & -\varepsilon'_y \end{pmatrix}^T (A^{-1})^T \right\} =$$

$$A^{-1} M \left\{ \begin{pmatrix} -\varepsilon'_x \\ -\varepsilon'_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\varepsilon'_x & -\varepsilon'_y \end{pmatrix}^T \right\} (A^{-1})^T =$$

$$A^{-1} \begin{pmatrix} M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_x \} & M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_y \} \\ M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_y \} & M \{ \varepsilon'_y \varepsilon'_y \} \end{pmatrix} (A^{-1})^T =$$

$$A^{-1} \begin{pmatrix} M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_x \} & M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_y \} \\ M \{ \varepsilon'_x \varepsilon'_y \} & M \{ \varepsilon'_y \varepsilon'_y \} \end{pmatrix} A^{-1}$$

Здесь $M\{\dots\}$ обозначает математическое ожидание. В процессе преобразований использовано свойство симметрической матрицы: $(A^{-1})^T = A^{-1}$.

При предположении малости ошибки установления соответствия может возникнуть только небольшое смещение положения экстремума. Реально эти ошибки можно оценить лишь косвенно. Представим, что вычислена "идеальная" критериальная функция соответствия. В окрестности экстремума эта функция локально аппроксимируется квадратичным полиномом. Экстремум этого квадратичного полинома соответствует экстремуму критериальной функции соответствия. Реальная критериальная функция соответствия искажена из-за наличия шумов, проективных искажений, и др. Эта реальная функция известна на дискретной сетке и задана своими отсчетами (рис. 2).



Рис. 2. Приближения критериальной функции.

Аппроксимация полиномом второго порядка локальной окрестности экстремума одновременно фильтрует (т.е. подавляет в определенной степени эти искажения). Причем трудно оценить как спектральные характеристики возмущений, так и фильтрующие свойства такой аппроксимации. Однако, эти искажения не могут быть подавлены (отфильтрованы) полностью. Остаточные искажения вызывают ошибки установления соответствия. Можно предположить, что структура возмущений аппроксимирующего полинома относительно "идеальной" критериальной функции приблизительно соответствует структуре возмущений отсчетов критериальной функции относительно аппроксимирующего полинома с некоторым коэффициентом. Данный коэффициент можно

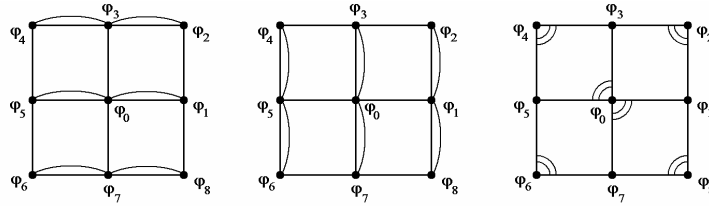


Рис. 3. Шаблоны для вычисления среднего квадратического отклонения и ковариации.

определить экспериментально для изображений разных классов, а затем адаптивно подстраивать с помощью специальной петли регулирования по невязкам процесса определения параметров движения.

Для этого вычислим значения аппроксимирующего полинома во всех 9 точках окрестности: f_i , $i = 0, 1, 2 \dots 8$. Вычтем эти значения из отсчетов функции соответствия U_i , $i = 0, 1, 2 \dots 8$ и вычислим значения ошибок аппроксимации:

$$\varphi_i = U_i - f_i, \quad i = 0, 1, 2 \dots 8$$

Получим оценки среднего квадратического отклонения и ковариации производных ошибок аппроксимации по обеим координатам:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{6}((\varphi_2 - \varphi_3)^2 + (\varphi_3 - \varphi_4)^2 + (\varphi_1 - \varphi_0)^2 +$$

$$+ (\varphi_0 - \varphi_5)^2 + (\varphi_8 - \varphi_7)^2 + (\varphi_7 - \varphi_6)^2)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{6}((\varphi_2 - \varphi_1)^2 + (\varphi_1 - \varphi_8)^2 + (\varphi_3 - \varphi_0)^2 +$$

$$+ (\varphi_0 - \varphi_7)^2 + (\varphi_4 - \varphi_5)^2 + (\varphi_5 - \varphi_6)^2)$$

$$\text{cov}(x, y) = \frac{1}{6}((\varphi_2 - \varphi_3)(\varphi_2 - \varphi_1) +$$

$$+ (\varphi_3 - \varphi_4)(\varphi_4 - \varphi_5) + (\varphi_7 - \varphi_6)(\varphi_5 - \varphi_6) +$$

$$(\varphi_8 - \varphi_7)(\varphi_1 - \varphi_8) + (\varphi_0 - \varphi_5)(\varphi_3 - \varphi_0) + (\varphi_1 - \varphi_0)(\varphi_0 - \varphi_7))$$

Шаблоны для вычисления среднего квадратического отклонения и ковариации приведены на рис. 3. Для оценки средних квадратических отклонений производных ошибок аппроксимации использовалась конечно-разностная аппроксимация производных с шагом, равным одному пикселю. Для используемой окрестности 3×3 такая оценка может быть сделана по 6 парам точек. Для оценки ковариации производных может быть использовано несколько разных, но приблизительно равнозначных аппроксимаций. Выбрана одна из них.

Вычисленная корреляционная матрица

$$\begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(x, y) & \sigma_y^2 \end{pmatrix}$$

характеризует возмущения критериальной функции, определенной на дискретной сетке, относительно аппроксимирующего квадратичного полинома. Можно ожидать, что возмущения самого квадратичного полинома характеризуются матрицей, которую можно аппроксимировать полученной матрицей с некоторым, пока неизвестным, коэффициентом.

Алгоритм установления соответствия ищет положение экстремума критериальной функции соответствия (в точке, где производные по обеим координатам равны нулю), а возмущения вызывают смещение этой точки. Определим разброс ошибок установления соответствия методом эллипсоидов [10]. Так как ошибки установления

соответствия определены на плоскости, то эллипсоиды переходят в эллипсы.

Для закона распределения

$$f_*(X) = \frac{1}{2\pi(\det R_*)^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}X^T R_*^{-1} X\right\}$$

вероятность попадания случайной точки в эллипс $X^T R_*^{-1} X \leq s^2$ равна:

$$P(s) = 1 - \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right).$$

Пусть возмущения квадратичного полинома характеризуются матрицей:

$$\begin{pmatrix} r_1 & r_2 \\ r_2 & r_3 \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(x, y) & \sigma_y^2 \end{pmatrix}.$$

Здесь k - коэффициент, зависящий от закона распределения, заданной величины вероятности $P(s)$ и других факторов. Тогда обратная матрица R_*^{-1} имеет вид:

$$R_*^{-1} = \frac{1}{r_1 r_3 - r_2^2} \begin{pmatrix} r_3 & -r_2 \\ -r_2 & r_1 \end{pmatrix}$$

В процессе функционирования алгоритмов технического зрения, в частности, при использовании последовательности стереоскопических или монокулярных изображений для решения задач оценки относительных линейных и угловых перемещений имеется возможность уточнения этого коэффициента по величинам невязок направлений на точки визируемой поверхности на последовательности кадров.

Экспериментальная часть

Для проверки полученных соотношений была использована методика, изложенная в [11, 12]. А именно, по заданной траектории движения, профилю визируемой поверхности и условиям съемки были подготовлены наборы матриц линейных преобразований, аппроксимирующих наибольшие локальные проективные искажения для указанных условий. Камера двигалась параллельно поверхности, угол разворота камеры по отношению к вектору скорости был выбран равным 47.5° , 67.5° и 87.5° . Соответственно, величина проективных искажений была наибольшей для угла 47.5° и минимальна для угла 87.5° (оптическая ось камеры почти ортогональна визируемой поверхности). Затем были выбраны три изображения с существенно различающимися корреляционными свойствами. На изображениях размером 640×480 пикселей выбиралось 9945 окрестностей размером 9×9 пикселей. Эти окрестности подвергались искажениям из полученного набора, и запускался процесс установления соответствия по окрестности 17×17 пикселей. После поиска смещения, соответствующего наи-

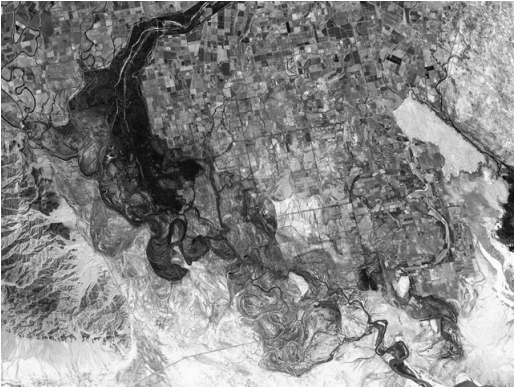
большему значению функции соответствия, производилась квадратичная аппроксимация функции соответствия и оценка положения экстремума с субпиксельным разрешением. Если ошибка превышала 0.5 пикселя, то такие точки исключались из дальнейшего анализа как имеющие аномальные ошибки установления соответствия.

Точки, для которых матрица вторых производных A не была положительно определенной или параметр s^2 принимал значения, меньше или равные нулю, отбрасывались как потенциально ненадежные. Далее оценивались параметры эллипсоида разброса, и определялся коэффициент k . Так как закон распределения ошибок установления соответствия аппроксимируется гауссовым законом с не очень высокой точностью, то значения этого коэффициента определялись для следующего набора вероятностей попадания ошибки установления соответствия в эллипсоид рассеяния: 0.9, 0.95, 0.975, 0.99.

Как следует из таблицы 1, величина коэффициента k

меняется в зависимости от характера изображения в 1.5-2.5 раза. Причем следует отметить, что для изображений с малым радиусом корреляции (самое верхнее изображение) эллипсоид разброса оценивается точнее (т.к. коэффициент k меньше). Для изображений с большим радиусом корреляции возрастает ошибка оценивания возмущений относительно аппроксимирующего полинома (см. рис. 2). Величина коэффициента k в зависимости от ракурса визирования поверхности меняется в 3-6 раз. При увеличении проективных искажений (увеличении угла разворота камеры относительно нормали к поверхности) величина коэффициента k возрастает. Это также обусловлено возрастанием ошибок оценивания возмущений относительно аппроксимирующего полинома. Как уже отмечалось, величину этого коэффициента целесообразно адаптивно подстраивать исходя из величины невязок направлений визирования особенностей на последовательности кадров с помощью специальной петли регулирования.

Таблица 1.

Вероятность	Угол разворота оси камеры относительно вектора скорости			Изображение
	47.5°	67.5°	87.5°	
0.9	5.6	3.1	1.1	
0.95	8.0	4.2	1.6	
0.975	12.1	5.8	2.3	
0.99	19.9	9.5	3.5	
0.9	10.7	6.8	2.8	
0.95	14.9	9.4	3.8	
0.975	19.9	12.6	5.2	
0.99	30.9	19.1	8.8	
0.9	6.9	4.9	2.3	
0.95	9.8	7.0	3.5	
0.975	14.3	9.8	5.0	
0.99	24.7	15.8	8.5	

Заключение

Полученный алгоритм оценки точности установления соответствия имеет незначительную вычислительную сложность и может быть реализован на борту летательного аппарата в реальном времени. Алгоритм позволяет исключать из анализа точки, матрица вторых производных критериальной функции которых не является положительно определенной, а также точки, для которых нарушается условие $s^2 > 0$, как потенциально ненадежные. Кроме того, он позволяет оперативно исключать из анализа точки, для которых величина невязки значительно выйдет из эллипса рассеивания, как аномальные измерения. Это позволяет существенно снизить вычислительные затраты, необходимые при переборном исключении точек, что характерно для семейства алгоритмов RANSAC.

Оценки точности установления соответствия используются для построения модели ошибок системы технического зрения, что необходимо для комплексирования системы технического зрения с другими приборами управления полетом.

Алгоритм пригоден для широкого круга функций соответствия, которые в окрестности экстремума могут быть аппроксимированы полиномом второй степени.

Литература

1. Антипин В. В., Буймов А. Г. Статистический анализ ошибок совмещения изображений по методу наименьших квадратов в условиях окрашенного шума // Автометрия. – 1985. – №3. – С. 27-31.
2. Буймов А. Г. Анализ влияния корреляционных свойств неоднородного яркостного шума на ковариационную матрицу ошибок совмещения изображений // Автометрия. – 1985. – №4. – С. 9-15.
3. Егоров И. В., Юхно П. М. Влияние однородного коррелированного яркостного шума на ошибки совмещения изображений // Автометрия. – 1988. – №1. – С. 105-107.
4. Тарасенко В. П., Тимофеев А. В. Доверительное оценивание точности совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах // Автометрия. – 1990. – №4. – С. 106-111.
5. Степанов О. А. Предельно достижимая точность совмещения гауссовых изображений // Автометрия. – 1990. – №5. – С. 16-23.
6. Sun Z., Ramesh V., Tekalp A. M. Error characterization of the factorization method // Computer Vision and Image Understanding. – 2001. – Vol. 82. Issue 2. – P. 110-137 (русский).
7. Chowdhury A. R., Chellappa R. Stochastic approximation and rate-distortion analysis for robust structure and motion estimation // International Journal of Computer Vision. – 2003. – Vol. 55. – №1. – P. 27-53.
8. Chowdhury A.R., Chellappa R. Statistical Error Propagation in 3D Modeling from Monocular Video // Proc. IEEE 2003 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Workshop on Statistical Analysis in Computer Vision. – 2003.
<http://www.cse.lehigh.edu/~rjm2/SACV/papers/chowdhury-chellappa.pdf>.
9. Sibley G., Matthies L., Sukhatme G. Bias Reduction and Filter Convergence for Long Range Stereo // Proceedings of the 12th International Symposium of Robotics Research. – 2005.
10. Огарков М. А. Методы статистического оценивания параметров случайных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1990, – 208 с.
11. Гришин В. А. Оценка локальных трансформаций последовательности изображений, используемых для 3D реконструкции // Сб. научн. тр. Нелинейные явления в открытых системах. Вып. 14. – М.: Гос. ИФТП, 2003. – С.80-91.
12. Гришин В. А. Оценка статистических характеристик изображений местности с точки зрения их пригодности для 3D реконструкции // Сб. научн. тр. Искусственный интеллект в технических системах. Вып. 24. – М.: Гос. ИФТП, 2004. – С. 63-74.

Уважаемые коллеги!

Вы можете подписаться на наш журнал в любом отделении связи. Подписной индекс издания по каталогу ОАО «Роспечать» - 82185.

Для тех, кто не успел оформить подписку на первое полугодие 2009 года через ОАО «Роспечать», сохраняется возможность подписки и приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу: 107031, г. Москва, Рождественка, 6/9\20, стр. 1, Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, или оформить Заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: www.dsra.ru.

Справки по телефонам: (495) 621-71-08, 621-06-10.

Факс: (495) 621-16-39.

E-mail: nto.popov@mtu-net.ru

tor@rgta.ryazan.ru