

Алгоритмы сопоставления опорных точек изображения для систем видеодетекции

Системы технического зрения широко внедряются во многих сферах человеческой деятельности, автоматизируют множество процессов и операций, которые до этого управлялись и контролировались только человеком, увеличивая тем самым его безопасность. Системы компьютерного зрения нашли свое широкое применение в робототехнике, системах идентификации и контроля, медицине, промышленности, системах охраны и безопасности и др.

Как известно, такие задачи компьютерного зрения, как стабилизация видео, генерация панорам на основе множества снимков, трехмерная реконструкция архитектурных сооружений и местности, решаются путем нахождения соответствий между некоторыми пикселями ряда цифровых изображений, некоторой реальной сцены [1]. Такие пиксели являются опорными точками, находя которые в ряде изображений, можно судить о смещении кадров относительно друг друга. Однако, этот подход возможно адаптировать и к известной задаче обнаружения и сопровождения движущихся объектов в видеоизображении. Любой движущийся объект содержит опорные точки, определяя смещения которых относительно других изображений при неподвижной либо равномерно движущейся камере, можно решать задачу обнаружения и сопровождения объектов в видеопоследовательности. Определим основные положения методики нахождения соответствий между пикселями изображений и адаптируем ее для решения рассмотренной задачи.

Понятие особенности изображения. Естественно полагать, что каждый пиксель изображения является проекцией некоторой точки реальной сцены на плоскость изображения. Однако, задачу нахождения соответствия для произвольного пикселя в двух изображениях решить практически невозможно, так как каждый отдельный пиксель обладает единственной характеристикой – яркостью, и не располагает никакой дополнительной информацией, отличающей его от остальных пикселей изображения. Для преодоления этой проблемы вводится принцип обнаружения и отслеживания так называемых «особенностей изображения» (или опорных точек) [1].

Под особенностью изображения понимают некоторые изолированные точки (точечные особенности), линии (линейные особенности), либо области изображения, характеризующиеся своими локальными окрестностями. Существует несколько подходов к определению понятия особенности, в частном случае, в соответствии с [2], их можно охарактеризовать как разрывы яркости или однородности в изображениях. В целом, особенность определяется как область изображения, обладающая более существенными признаками, чем яркость, и, исходя из них, ей может быть найдено однозначное соответствие в последовательности изображений. Если некоторая точка или область изображения определена как особенная, она может являться отправной точкой для последующих алгоритмов и методов обработки изображений.

К особым точкам принято относить изолированные точки, края, линии, углы в изображениях. Для нахождения их используются специальные алгоритмы – детекторы особенностей. Широко известны и предельно хорошо

проанализированы в [2–3] детекторы особенностей, основанные на дифференциальных методах и методах, основанных на нахождении локальных экстремумов яркости в изображениях (обход скользящей маски, вычисление градиента, лапласиана).

В решении задачи сопоставления и отслеживания особенностей, вследствие геометрической простоты, чаще используются детекторы точечных особенностей. В соответствии с [4], точечной особенностью x' называется такая точка изображения, чья окрестность отличается от окрестностей близлежащих точек по выбранной мере, то есть $\forall x: |x' - x| < r \rightarrow \rho(\Omega_x, \Omega_{x'}) > \varepsilon$, Ω_x , где окрестность точки x называется окном поиска или маской, а $\rho(\Omega_x, \Omega_{x'})$ – функцией близости окрестностей по некоторой выбранной мере. Последовательность положений точечной особенности $\{x_i\}_{i=1}^n$ называется следом точечной особенности, где i – номер кадра видеопоследовательности, n и k – номера кадров видеопоследовательности, между которыми точечная особенность была определена.

В процессе построения следа возможно появление ошибок, вследствие чего вводится понятие корректного следа – совокупности проекций некоторой отдельной точки сцены на последовательность изображений.

Обнаружение точечных особенностей изображения. К точечным особенностям относят изолированные точки, которые являются светлее либо темнее окружающих, углы, представляющие собой пересечение двух краев, окружности. Под углами, как точечными особенностями, подразумевается целый ряд особенностей изображения – окончания краев, линий, точки окружностей в местах максимальной кривизны, непосредственно сами углы и др. Большинство детекторов углов обнаруживают все перечисленные особенности, а не только углы в частности. Для нахождения углов широко используются корреляционные методы. Принцип их основывается на последовательном обходе изображения некоторым окном поиска и нахождении в изображении таких точек, отклонение окна на незначительное расстояние в которых приводило бы к значительному снижению корреляции сравниваемых изображений окон.

На этом принципе основывается и наиболее известный детектор углов и граней – детектор Харриса [5], базирующийся на вычислении функции автокорреляции окна поиска $I(x, y)$ в точке (x, y) размера w и сравнении его изображения с окном, смещенным на незначительную величину $(\Delta x, \Delta y)$ в различных направлениях от угла по формуле:

$$s(x, y) = \sum_{x, y=1}^w [I(x, y) - I(x + \Delta x, y + \Delta y)]^2. \quad (1)$$

Величину интенсивности смещенного окна можно разложить в ряд Тейлора до членов первого порядка.

$$\begin{aligned} I(x + \Delta x, y + \Delta y) &= I(x, y) + I_x(x, y) \Delta x + I_y(x, y) \Delta y \\ I(x + \Delta x, y + \Delta y) &= I(x, y) + \begin{bmatrix} I_x(x, y) & I_y(x, y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставляя величину (2) в выражение (1) получаем:

$$\begin{aligned}
c(x, y) &= \sum_{x,y=1}^w [I(x, y) - I(x + \Delta x, y + \Delta y)]^2 = \\
&= \sum_{x,y=1}^w \left[I_x(x, y) I_y(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right]^2 = \\
&= \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum_{x,y=1}^w I_x^2(x, y) & \sum_{x,y=1}^w I_x(x, y) I_y(x, y) \\ \sum_{x,y=1}^w I_x(x, y) I_y(x, y) & \sum_{x,y=1}^w I_y^2(x, y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \\
&= \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} C(x, y) \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, в точке (x, y) , где величина $C(x, y)$ из (3) принимает наибольшее значение, будет наблюдаться угол или грань. Для упрощения вычислительных расчетов матрицу $C(x, y)$ не рассчитывают, а анализируют ее собственные значения. Если λ_1 и λ_2 – собственные значения матрицы $C(x, y)$, то в случае, когда:

- λ_1 и λ_2 – малы, функция $c(x, y)$ будет претерпевать малые изменения, изображения коррелируют и наблюдается однородная область;
- одно из собственных значений мало, а другое велико, происходит корреляция в одном из направлений x или y , и наблюдается грань;
- λ_1 и λ_2 – велики, то наблюдается угол.

Для определения меры сходства окна поиска с углом Харрисом предложено применять порог к следующей величине:

$$R = \det C - k \|C\|_F^2, \tag{4}$$

где $k = 0,04 - 0,06$.

В результате, детектор Харриса позволяет определять точечные особенности – углы, однородные области, края и линии, а также инвариантен относительно вращения точечных особенностей и, частично, аффинных преобразований.

Отслеживание точечных особенностей изображения. Для отслеживания точечной особенности достаточно найти ей однозначное соответствие в последовательности изображений. Соответствием называется согласованная пара пикселей x_1 и x_2 из изображений I_1 и I_2 , которые отражают одну и ту же точечную особенность x' . При определении соответствий между особенностями могут возникать ложные соответствия, в этом случае вводится понятие корректного соответствия. Соответствие называется корректным, если существует точка трехмерной сцены X , проекциями которой являются точки x_1 и x_2 из изображений I_1 и I_2 .

Согласно [6] задачу поиска соответствий между пикселями двух изображений можно решать двумя путями: сопоставлением либо отслеживанием точечных особенностей. При сопоставлении точечных особенностей в двух изображениях I_1 и I_2 определяют, соответственно, два множества точечных особенностей $\{x_i, i=1..n_1\}$ и $\{x_j, j=1..n_2\}$. При этом необходимо найти соответствие между точечными особенностями двух множеств на основании меры сходства их окрестностей.

Меру сходства определяют корреляционными методами, а также на основании законов математической статистики или теории информации [7–8]. Одним из наиболее распространенных способов вычисления степени подобия функций является вычисление коэффициента корреляции:

$$C = \frac{\sum_{i,j} I_{x_1}(j) I_{x_2}(j)}{\sqrt{\sum_{i,j} I_{x_1}^2(j)} \sqrt{\sum_{i,j} I_{x_2}^2(j)}}. \quad (5)$$

В случае сходства окрестностей I_{x_1} и I_{x_2} коэффициент C будет максимальным.

Также для определения меры сходства вычисляют функцию автокорреляции по известной формуле:

$$C = \sum_{i,j} I_{x_1}(j) I_{x_2}(j). \quad (6)$$

Во втором подходе, при отслеживании точечных особенностей, для каждой точечной особенности x_1 из изображения I_1 находится вектор $\mathbf{h}$, определяющий смещение особенности x_1 в изображении I_2 в точку x_2 . В соответствии с этим подходом, поиск точечных особенностей происходит только в первом рассматриваемом кадре видеопоследовательности, а в остальных находятся векторы их смещения.

В известной работе [9] Б. Лукаса и Т. Канаде, как и в (1), находится минимум функции автокорреляции двух окон, смещенных относительно друг друга в двух изображениях на вектор $\mathbf{h}$.

$$c(\mathbf{h}, y) = \sum_x I_2(\mathbf{h} + \mathbf{h}_x) I_1(\mathbf{h}_x).$$

Для нахождения экстремума функции находится производная по $\mathbf{h}$.

$$\frac{\partial c(\mathbf{h}, y)}{\partial \mathbf{h}} = \sum_x \frac{\partial}{\partial \mathbf{h}} [I_2(\mathbf{h} + \mathbf{h}_x) I_1(\mathbf{h}_x)] = 0,$$

откуда

$$\mathbf{h} = \frac{\sum_x I_2'(\mathbf{h}_x) I_1(\mathbf{h}_x)}{\sum_x I_2'^2(\mathbf{h}_x)}.$$

Поиск вектора смещения $\mathbf{h}$ осуществляется с помощью следующей итерационной формулы:

$$h_{k+1} = h_k + \frac{\sum_x w(\mathbf{h}_x) I_2'(\mathbf{h}_x + h_k) I_1(\mathbf{h}_x)}{\sum_x w(\mathbf{h}_x) I_2'^2(\mathbf{h}_x + h_k)}, \quad (7)$$

где

$$w(\mathbf{h}_x) = \frac{1}{I_2'(\mathbf{h}_x) I_1'(\mathbf{h}_x)}.$$

В работе [10] аналогичные вычисления производятся для вектора смещения $\mathbf{h}$ с учетом аффинных преобразований, в этом случае $\mathbf{h}$ вычисляется

следующим образом:

$$\mathbf{h} = D\mathbf{x} + \mathbf{d},$$

где D – матрица преобразования, $\mathbf{d}$ – линейное смещение.

$$D = \begin{bmatrix} d_x^2 & d_{xy} \\ d_{xy} & d_y^2 \end{bmatrix}.$$

Тогда для двух изображений I_1 и I_2 будет выполняться соотношение:

$$I_2(A\mathbf{x} + \mathbf{d}) = I_1(\mathbf{x}),$$

где $A=1+D$.

Алгоритмы обнаружения и сопровождения движущихся объектов в видеоизображении способом сопоставления и отслеживания точечных особенностей. В соответствии с общей моделью системы сопровождения движущихся объектов [11], под сопровождением понимают получение изображения движущегося в пределах сцены объекта. Область изображения, в которой находится движущийся объект, в нашем случае определяется множеством точечных особенностей изображения, принадлежащих выбранному объекту. Таким образом, задача сопровождения движущихся объектов замыкается на задачу поиска соответствий множества точечных особенностей в ряде изображений.

На основании сформулированных методов обнаружения и отслеживания точечных особенностей построим алгоритм отслеживания движущихся объектов способом сопоставления точечных особенностей. Алгоритм включает следующие этапы:

1. Поиск точечных особенностей $x_i^n, j=1..k$ в кадре I_n и $x_i^{n+1}, j=1..l$ в кадре I_{n+1} в соответствии с (4).
2. Для каждой особенности $x_i^n, j=1..k$ в кадре I_n определяется подмножество особенностей $x_i^{n+1}, j=1..k$ из кадра I_{n+1} , для которых $|x_i^n - x_i^{n+1}| < M$.
3. Для каждой особенности $x_i^n, j=1..k$ из I_n определяется соответствие из $x_i^{n+1}, j=1..k$ в кадре I_{n+1} на основании меры сходства (5), (6).
4. Сегментация движения на основании величины смещения v_i в кадре I_n и I_{n+1} каждой пары согласованных особенностей.
5. Выделение объекта по набору точечных особенностей.
6. Повторение пунктов 1–5 для последующих пар видеок кадров.

На эффективность данного алгоритма во многом влияет выбор эффективного метода определения меры сходства окрестностей точечных особенностей [7–8]. Величина M определяет возможную область смещения точечной особенности (область поиска) и таким образом накладывает ограничение на скорость перемещения объектов между двумя соседними кадрами видеопоследовательности.

В свою очередь, общий алгоритм отслеживания движущихся объектов путем отслеживания его точечных особенностей содержит следующие этапы:

1. Поиск точечных особенностей $x_i^n, j=1..k$ в кадре I_n .
2. Для каждой точки из $x_i^n, j=1..k$ в кадре I_n вычисляется соответствующая точка из $x_i^{n+1}, j=1..l$ в кадре I_{n+1} , смещенная на $\mathbf{h}$ из (7).
3. Определяется множество точек $x_i^n, j=1..k$ из кадра I_{n+1} , для которых $h < M$.

4. Сегментация движения на основании величины смещения $\mathbf{h}$ в кадре I_n и I_{n+1} каждой пары согласованных особенностей.
5. Выделение объекта по набору точечных особенностей.
6. Повторение пунктов 2–4 для последующих пар видеокадров.
7. Отбрасывание ложных следов.

В соответствии с алгоритмом, поиск точечных особенностей происходит только в первом рассматриваемом кадре видеопоследовательности, а в остальных ищутся только векторы их смещения. С одной стороны, это ускоряет алгоритм построения следа, так как исключается поиск особенностей в каждом кадре. С другой стороны, такой принцип создает возможность построения ложного следа, так как ошибочно найденное смещение точечной особенности влечет к дальнейшему построению некорректного следа. Это приводит к необходимости периодической проверки корректности построенного следа точечной особенности.

Сегментация движения происходит путем выделения множества пикселей изображения x_i^{n+1} с одинаковым значением и направлением величины v_i или $\mathbf{h}_i$, которая выражает скорость перемещения i -той точечной особенности. Каждый обнаруженный движущийся объект однозначно характеризуется набором своих точечных особенностей и может быть идентифицирован и выделен в любом кадре видеоизображения.

Заключение. Таким образом, в нашем исследовании разработаны алгоритмы обнаружения и отслеживания движущихся объектов методами сопоставления и отслеживания точечных особенностей изображений. Также приведены способы нахождения точечных особенностей и методы нахождения соответствий между опорными точками в видеопоследовательности. Разработанные алгоритмы являются достаточно ресурсоемкими, и при программной реализации алгоритмов рекомендуется уделять внимание методам их оптимизации либо использовать аппаратно-программную реализацию (например, с помощью цифровых сигнальных процессоров). В качестве преимуществ приведенных алгоритмов следует указать отсутствие в процессе отслеживания этапа выделения в бинарных изображениях движущихся объектов, которые выполняются обычно достаточно сложными рекурсивными методами морфологической обработки. Построенные алгоритмы позволяют определять динамические характеристики объекта (скорость, координаты и т.д.). В отличие от пространственных методов сегментации движений они менее зависимы от помеховой (фоновой) обстановки в кадре. Приведенные алгоритмы могут использоваться при разработке программных комплексов для систем видеодетекции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Краснобаев, Е.А.** Метод оптического потока в задачах сегментации движущихся объектов в видеоизображениях / Е.А. Краснобаев, А.Ю. Халанский // X(55) Региональная науч.-практ. конф. преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов, Витебск, 28 апреля 2008 г. / ВГУ им. П.М. Машерова. – Витебск, 2008. – С. 43.
2. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 812 p.
3. **Acharya, T.** Image processing. Principles and applications / A. Acharya, A. Ray. – New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2005. – 131 p.
4. **Лисицин, Е.** Отслеживание точечных особенностей в видеопоследовательностях с изменениями резкости / Е. Лисицин, А. Конушин, В. Вежневцев // International Confe-

- rence Graphicon 2004; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – М., 2004. – С. 47–74.
5. **Harris, S.** A combined corner and edge detector, / S. Harris, M. Stephens // 4th Alvey vision conference, Manchester, UK, 1988. – P. 147–151.
 6. **Конущин, А.С.** Алгоритмы построения трехмерных компьютерных моделей реальных объектов для систем виртуальной реальности: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11 / А.С. Конущин. – М., 2005. – 45 л.
 7. **Smith, P.** Effective corner matching / P. Smith, D. Sinclair, R. Cipolla, K. Wood // 9th British machine vision conference, Southampton, UK, Sep. 1998. – Vol. 2. – P. 545–556.
 8. **Rubner, Y.** The earth mover's distance as a metric for image retrieval. / Y. Rubner, C. Tomasi, L.J. Guibas // Journal of computer vision. – 2000. – Vol. 40, № 2. – P. 99–121.
 9. **Lucas, B.D.** An iterative image registration technique with an application to stereo vision / B.D. Lucas, T. Kanade // 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI '81). – Vancouver, BC, Canada, 1981. – P. 674–679.
 10. **Shi, J.** Good features to track / J. Shi, C. Tomasi // IEEE. Conference on computer vision and pattern recognition. – Seattle, WA, June, 1994. – P. 593–600.
 11. **Краснобаев, Е.А.** Моделирование оптических систем автоматического сопровождения и целеуказания / Е.А. Краснобаев // 4-я Междунар. науч. конф. по военнотехническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 20–21 мая 2009 г. – Минск: БелИСА, 2009. – С. 102.

S U M M A R Y

In the article algorithms of moving objects detection and tracking by methods of comparison and tracking of feature points in image sequence are developed. Also the ways of findings of feature points and the methods of findings of conformity between feature points in video sequence are investigated.

Поступила в редакцию 5.05.2009