

УДК 681.322.05 : 007.52

Е. П. Путятин, В. А. Гороховатский, С. В. Ищенко

(Харьков)

**АЛГОРИТМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ
НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ХО**

Предложен метод и алгоритмы выделения объектов и оценки их параметров на изображениях с использованием структурных признаков. В отличие от классических алгоритмов интегральное описание не строится. Обеспечивается помехозащищенность от локальных помех и более высокое быстродействие, чем у корреляционного метода.

Введение. В системах технического зрения часто решается задача выделения объекта из фона и определения параметров преобразований, которым подвергается объект во время движения. Один из часто используемых подходов к решению данной задачи состоит в преобразовании изображения в набор локальных признаков (ЛП), характеризующих небольшие участки изображения [1]. В рамках данного подхода удается достичь большей устойчивости к локальным помехам (частичные искажения объекта, ложные ЛП вблизи объекта) по сравнению, например, с корреляционными алгоритмами, хотя устойчивость к белому шуму и не повышается [2]. Использование ЛП позволяет также сжать информацию, учесть структурные свойства объекта, распараллелить обработку [3].

Аналогичные цели преследуют и структурно-синтаксические алгоритмы. Вместе с тем они используют сложные синтаксические правила, что не всегда приемлемо с точки зрения реализации в системах обработки изображений.

Другой класс структурных алгоритмов, построенных на базе ЛП, — алгоритмы, основанные на преобразовании Хо (ПХ) [4]. Классическое ПХ использовалось для выделения на изображении отрезков прямых, окружностей и других простых форм, а затем было обобщено на объекты произвольной формы. Одним из примеров классического применения ПХ является распознавание иероглифов [4], когда контур аппроксимируется отрезками прямых, дающими локальные максимумы в массиве-накопителе. Эти локальные максимумы используются в качестве интегрального описания, которое сопоставляется с эталонным путем корреляции.

Аппроксимация контура отрезками прямых позволяет повысить быстродействие алгоритма в случае, когда объект подвергается смещениям и поворотам, так как прямая в нормальной форме задается двумя параметрами, одним из которых является угол поворота. Вместе с тем использование интегрального описания ухудшает функционирование в условиях влияния локальных помех.

Классическое применение ПХ предусматривает обработку контурных точек. Это позволяет привлечь данные о направлении градиента, которые применяются, например, в R -таблицах обобщенного ПХ и повышают эффективность алгоритма. Во многих случаях контурной информации достаточно для выделения объектов. Вместе с тем в некоторых ситуациях (для малоразмерных объектов) более эффективным представляется использование ЛП, отличных от контурных точек. В этом случае приходится отказываться от использования градиентной информации.

Целью работы является создание алгоритмов с использованием ПХ, позволяющих выделить объекты и вычислить параметры преобразований объектов на множестве ЛП. Алгоритмы предназначены для быстрой локализации малоразмерных объектов и обеспечивают устойчивость к воздействию локальных помех. Выделение точек объекта и оценка параметров осуществляются одновременно.

Описание алгоритмов. Пусть объект представляется множеством ЛП, заданных в виде

$$M = \{m_i\}, \quad m_i = (x_{\alpha i}, y_{\alpha i}), \quad i = \overline{1, n_o},$$

где $x_{\alpha i}, y_{\alpha i}$ — координаты i -го ЛП; n_o — количество ЛП объекта.

Рассмотрим вариант алгоритма, когда допустимыми преобразованиями являются смещения. Смещение объекта на вектор (a, b) ведет к соответствующему изменению координат всех ЛП. Представим множество ЛП объекта с учетом смещений в аналитическом виде:

$$\begin{cases} x = x_1 + a; \\ y = y_1 + b; \\ \dots \dots \dots \\ x = x_{n_r} + a; \\ y = y_{n_r} + b, \end{cases} \quad (1)$$

где $x_1 + x_{n_r}, y_1 + y_{n_r}$ — координаты ЛП эталона; x, y — координаты ЛП объекта; n_r — число ЛП эталона; a, b — параметры смещения. Используя (1), для сопоставления объекта и эталона применим ПХ. Для этого каждый ЛП объекта $(x_{\alpha i}, y_{\alpha i})$ отображается во множество точек (a, b) пространства параметров, которое получается при подстановке $x_{\alpha i}, y_{\alpha i}$ вместо x, y в (1) и решении (1) относительно a, b .

Множество точек, получаемое при обработке всех ЛП объекта, можно записать в виде

$$\begin{cases} a_{ij} = x_{\alpha i} - x_j; \\ b_{ij} = y_{\alpha i} - y_j, \end{cases} \quad i = \overline{1, n_o}, \quad j = \overline{1, n_r}. \quad (2)$$

Для работы алгоритма, реализующего выражения (2), выделяется двумерный массив памяти, являющийся дискретизованным пространством параметров и используемый как накопитель. При вычислениях согласно (2) имеем $n_o n_r$ решений. Каждому решению соответствует ячейка накопителя, которая получает приращение. В результирующем массиве координаты максимального элемента соответствуют параметрам смещения, а величина максимума равна количеству ЛП эталона, сместившихся согласованно. Решение о наличии или отсутствии объекта принимается по значению максимума путем сравнения с порогом. Порог зависит от величины n_r и уровня искажений ЛП.

Рассмотрим теперь вариант алгоритма в условиях преобразований смещений и поворотов на плоскости. Для построения алгоритма необходимо аналогично (1) получить систему уравнений, задающую связь между ЛП эталона и объекта. Вследствие конгруэнтности эталона и объекта при смещениях и поворотах можно задать такую композицию последовательных поворота вокруг начала координат на угол θ и смещения (a, b) (или композицию смещения и поворота), что эталон перейдет в объект (или объект перейдет в эталон). С учетом этого связь между ЛП эталона и объекта можно задать с помощью четырех различных систем. Первые две системы определяют связь между эталоном и объектом, когда выполняется композиция поворота и смещения, третья и четвертая — смещения и поворота. В соответствии с первой и третьей системами эталон переходит в объект, а в соответствии со второй и четвертой — объект переходит в эталон. С точки зрения реализации алгоритма на ЭВМ более удобной является система

$$\begin{cases} x = a + x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta; \\ y = b + x_1 \sin \theta + y_1 \cos \theta. \end{cases}$$

щений; θ — угол поворота.

Для вычисления ПХ каждый ЛП объекта (x_{oi}, y_{oi}) отображается во множество точек (θ, a, b) пространства параметров, которое получается при подстановке x_{oi}, y_{oi} вместо x, y в (3) и решении (3) относительно θ, a, b . Поскольку система (3) является совокупностью n , подсистем из двух уравнений с тремя неизвестными θ, a, b , каждому ЛП объекта будет соответствовать бесконечное множество решений, представляющих собой n , кривых в пространстве параметров. Для нахождения конечного множества решений пространство параметров дискретизируется.

На основании изложенного сформулируем следующий алгоритм нахождения θ, a, b .

1. Пусть шаги дискретизации по параметрам равны $\Delta\theta, \Delta a, \Delta b$. Для работы алгоритма выделяется трехмерный массив памяти, который представляет собой дискретизованное пространство параметров и используется как накопитель. Размерность массива по θ равна $k = S/\Delta\theta + 1$, где S равно величине диапазона возможных значений углов поворота. Вычисляем и сохраняем в таблице $2k$ значений $\sin(i\Delta\theta), \cos(i\Delta\theta), i = 0, k - 1$. В целях упрощения записи считаем, что угол изменяется от 0 до S° .

2. Для каждого ЛП объекта (x_{oi}, y_{oi}) решаем (3), используя табличные значения $\sin(i\Delta\theta), \cos(i\Delta\theta), i = 0, k - 1$. Каждому ЛП объекта будет соответствовать kn , решений.

3. В полученных решениях округляем a, b с учетом $\Delta a, \Delta b$ и определяем ячейки накопителя, которые получают приращение.

4. После обработки всех ЛП объекта ищем максимум в накопителе. Координаты максимума определяют параметры θ, a, b , а значение максимума — количество ЛП эталона, которые согласованно переходят в ЛП объекта при преобразовании (θ, a, b) .

Сравним системы (1) и (3). Для каждого ЛП объекта решением системы (1) являются n , точек с целыми координатами в пространстве параметров, каждой точке соответствует ячейка накопителя. Решением системы (3) являются n , кривых в пространстве параметров. Каждая кривая обладает тем свойством, что для произвольного значения θ найдется единственная точка (θ, a, b) , лежащая на кривой. Это делает удобным использование θ в качестве свободной переменной, принимающей значения $i\Delta\theta, i = 0, k - 1$. Решение системы (3) сводится фактически к решению k систем вида (1). Отличие заключается в том, что наличие комбинаций вида

$$z = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

делает решения системы (3) нецелыми и увеличивает вычислительную сложность алгоритма.

Оценка быстродействия. Сравним быстродействие описанных алгоритмов и корреляционного алгоритма, предполагающего сканирование изображения эталоном, заданным списком точек. Пусть l_x, l_y — размеры эталона, $l_{x_0} \times l_{y_0}$ — размеры объекта, n_r и n_o обозначают количество ЛП эталона и объекта. Тогда времена работы T_1 (корреляционного алгоритма) и T_2 (предложенного) для смещений равны:

$$\begin{aligned} T_1 &= L(n_r(3t_1 + 2t_2 + t_3) + t_3); \\ T_2 &= n_o(n_r(3t_1 + 2t_2) + 2t_1) + L(t_1 + t_3), \end{aligned} \quad (5)$$

где t_1 — время обращения к памяти изображений; t_2 — время сложения; t_3 — время сравнения; $L = (l_{x_r} + l_{x_o} - 1)(l_{y_r} + l_{y_o} - 1)$. Формулы (5) получены посредством анализа реализации алгоритмов на языке высокого уровня, причем T_1 и T_2 не включают дополнительное время на организацию циклов программы. Для разных типов ЭВМ соотношение между t_1 , t_2 , t_3 изменяется, примем $t_1 = t_2 = t_3 = t$. Покажем, что $T_1 > T_2$ если $n > 3$. Действительно $> l_{x_o} l_{y_o} \geq n_o$, получаем, что $T_1 > T_2$ при $n_r \geq 3$.

Пусть $l_{x_r} = l_{y_r} = l_{x_o} = l_{y_o} = 8$, $n_r = n_o = 20$, тогда $T_1/T_2 \approx 11$. Платой за увеличение быстродействия является необходимость использования дополнительной памяти. Конкретно для предложенного примера требуемый объем памяти составит 225 ячеек.

Более сложный для анализа случай, когда разрешены смещения и повороты. Будем считать, что оба алгоритма используют табличные величины $\sin(i\Delta\theta)$, $\cos(i\Delta\theta)$, $i = 0, k - 1$. Тогда

$$\begin{aligned} T'_1 &= kL(n_r(3t_1 + 2t_4 + t_3) + t_3); \\ T'_2 &= kn_o(n_r(3t_1 + 2t_2) + 2t_4) + kL(t_1 + t_3). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь t_4 — время вычисления комбинаций (4). Примем $t_1 = t_2 = t_3 = t$. Аналогично предыдущему случаю

$$T'_1 - T'_2 = kt(n_r(2s + 4) - 1) \left[L - n_o \frac{5n_r + 2s}{n_r(2s + 4) - 1} \right],$$

где $s = t_4/t$. Заметим, что при $k = s = 1$ разность $T'_1 - T'_2 = T_1 - T_2 > 0$ при $n_r \geq 3$. При увеличении s коэффициент при n_o в квадратных скобках уменьшается, разность $T'_1 - T'_2$ увеличивается, поэтому $T'_1 > T'_2$ при $n_r \geq 3$.

Для тех же значений параметров, что и в предыдущем примере, и $s = 10$ величина $T'_1/T'_2 \approx 38$. Увеличение выигрыша в быстродействии по сравнению с предыдущим примером объясняется тем, что появление параметра поворота θ приводит не только к умножению времени работы на k , но и к одновременному увеличению затрат как на определение одного коэффициента корреляции, так и на заполнение одной ячейки накопителя. При этом наиболее сложная операция вычисления комбинации (4) вошла в выражение для T'_1 с коэффициентом $2kLn_r$, а в выражение для T'_2 — с коэффициентом $2kn_o$.

Выбор параметров алгоритмов. Параметрами алгоритмов являются количество ЛП эталона n_r и объекта n_o , порог на значение максимума в накопителе, шаги дискретизации $\Delta\theta$, Δa , Δb , стратегия приращения. Наиболее важный параметр — порог для принятия решения о наличии объекта. Порог выбирается на основе анализа двух ситуаций. Объект считаем обнаруженным, если выполняются условия

$$m \geq m_1; \quad m \geq m_2,$$

где m — величина максимума; m_1, m_2 — пороговые величины. Величина m_1 отражает минимально возможное количество ЛП в представлении объекта в целях его различения с другими объектами и шумом. Величина m_2 отражает уровень максимально допустимого искажения объекта, равный предельному количеству неискаженных ЛП, по которым принимается решение. Если априорно задана вероятность p_1 исчезновения отдельных ЛП объекта, то вероятность того, что не менее u ЛП останутся в представлении объекта, равна

$$R_{n_r}^u = \sum_{i=u}^{n_r} C_{n_r}^i (1 - p_1)^i p_1^{n_r - i}. \quad (7)$$

С вероятностью $R_{n_r}^u$ можно связать величину m_2 . Если задать уровень вероятности $R_{n_r}^u$ и известна величина p_1 , то, решая (7) относительно u , найдем значение m_2 . При заданных $R_{n_r}^u$ и p_1 условия правильного обнаружения объекта определяются как $m \geq m_1$; $m \geq m_2$. Значения m_1 и m_2 определяются априорными данными. В случае отсутствия априорной информации величины m_1 и m_2 необходимо определять в процессе обработки изображений.

Шаги дискретизации по параметрам влияют как на работоспособность алгоритма, так и на быстродействие и объем требуемой памяти под массив-накопитель. Слишком большие величины $\Delta\theta$, Δa , Δb могут привести к неправильному или неточному выделению объектов, слишком маленькие — к длительной работе алгоритма. Для сокращения перебора можно рекомендовать схему работы алгоритма в несколько этапов, причем на каждом последующем этапе точность определения параметров преобразований возрастает за счет уменьшения шагов дискретизации и возможного диапазона параметров.

Одно из средств борьбы с ошибками ПХ — выбор стратегии приращения при формировании накопителя [4]. Причинами ошибок ПХ являются дискретное представление изображений и пространства параметров, неточное выделение ЛП объекта. Стратегиями приращения являются: инкрементация ячейки накопителя, координаты которой были получены при решении систем (1) или (3); приращение нескольких соседних ячеек накопителя с одинаковыми или разными весами, учитывающими модель ошибок и т. д. Вместо инкрементации нескольких ячеек накопителя можно после обработки всех ЛП объекта осуществить сглаживание накопителя посредством фильтрации. Заметим, что использование сложной стратегии приращения увеличивает вычислительные затраты.

Эксперименты. Для проверки работоспособности и оценки устойчивости описанных алгоритмов к воздействию помех было проведено моделирование их работы на ЭВМ. Испытания проводились с эталонами различной формы с $n_r = 20$. Параметры искажений ЛП объекта задавались вероятностями p_1 исчезновения и p_2 появления ложных ЛП в поле зрения 32×32 , принимавшими значения $0 + 0,7$. Работа алгоритмов считалась успешной, если оценка параметров выполнялась с точностью до их шага дискретизации.

Моделирование работы первого алгоритма показало, что вероятность P правильного выделения объектов свыше 0,98 достигается при $p_2 \leq 0,4$. Более чувствительным этот алгоритм оказывается к помехам исчезновения. Так, $P \geq 0,95$ при $p_1 \leq 0,3$. Форма объектов практически не влияет на эффективность алгоритмов.

Для моделирования второго алгоритма использовался диапазон углов поворота от -30 до 30° с шагом квантования 5° ($k = 13$). Угол поворота эталона был равен одному из возможных 13 дискретных значений. При $p_2 \leq 0,2$ вероятность P была практически такой же, как и у первого алгоритма. С повышением уровня p_2 ухудшалась точность определения угла, что приводило к более быстрому уменьшению P , чем у алгоритма для смещений. Аналогично ведет себя алгоритм и по отношению к помехе исчезновения ЛП, задаваемой величиной p_1 . Величина $P \geq 0,95$ при $p_1 \leq 0,2$. Для серии экспериментов, когда значение параметра θ находилось между дискретными значениями углов, вероятность P принимала значения выше 0,95 лишь при $p_1 \leq 0,1$ и $p_2 \leq 0,1$. Это объясняется сжатием допустимого диапазона ошибки определения θ до величины $\Delta\theta/2$ и внесением дополнительных ошибок дискретизации. Таким образом, определение угла поворота с высокой точностью достижимо лишь при невысоком уровне помех.

Испытывались также различные стратегии приращения: инкрементация одной, пяти и девяти ячеек накопителя. Инкрементация дополнительных эле-

ментов накопителя не оказала существенного влияния на вероятность P , так как она приводит к «размыванию» максимума и увеличению ошибки определения параметров преобразований. В целом инкрементация дополнительных ячеек поднимает уровень P для первого алгоритма выше, чем для второго.

Пример применения алгоритмов. При слежении за движущимся объектом в течение некоторого времени (последовательность видеок кадров) необходимо принимать решение после анализа n -го кадра. При этом объект от кадра к кадру может смещаться, частично изменять форму, а также вовсе исчезать. Тогда решение за n кадров может быть построено путем обобщения частичных решений по каждой паре кадров. Частичное решение о наличии объекта согласно описанному подходу принимается, если максимум в накопителе при анализе текущей пары кадров превышает заданный порог и полученные величины смещений объекта находятся в допустимых пределах. Если такое решение принято, то в сумматор S_1 наличия объекта добавляется вес α_i для i -го кадра: $S_1 = S_1 + \alpha_i$. В противном случае вес α_i добавляется в сумматор S_0 отсутствия объекта: $S_0 = S_0 + \alpha_i$. Итоговое решение о наличии объекта принимается, если $S_1 > S_0$.

В зависимости от варианта технической реализации этого алгоритма возможен анализ каждой пары кадров, только рядом стоящих кадров и т. д.

Данный алгоритм, кроме устойчивости к исчезновению ЛП и появлению ложных ЛП вблизи объекта на каждом кадре, обеспечивает также надежное функционирование при исчезновении объекта в отдельных кадрах. Моделирование показало, что вариант алгоритма с анализом только рядом стоящих кадров при вероятности исчезновения, равной 0,1, и количестве кадров $n = 10$ обеспечивает правильное обнаружение с вероятностью 0,98. При $n = 20$ обеспечивается безошибочное обнаружение. Вероятность правильного обнаружения увеличивается с ростом n .

Для оценки координат объекта в алгоритме слежения может быть применено прогнозирование на базе координат, полученных для текущей пары кадров.

Заключение. Предложенный подход и алгоритмы для его реализации предназначены для обнаружения, распознавания и оценки координат объектов на изображениях в условиях сильных помеховых воздействий: фона, ложных объектов, частичного или полного исчезновения объекта. Использование преобразования Хо на множестве локальных признаков позволяет осуществить структурный анализ без построения классического интегрального описания объектов. Алгоритмы обладают более высоким быстродействием, чем корреляционные, и могут быть адаптированы к имеющейся априорной информации об объекте и искажениях. Проведенные эксперименты подтверждают работоспособность и эффективность алгоритмов, а также перспективность использования данного подхода в задачах анализа изображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путьгин Е. П., Аверин С. И. Обработка изображений в робототехнике.—М.: Машиностроение, 1990.
2. Гороховатский В. А., Кацалап С. Ф., Путьгин Е. П. Анализ изображений в условиях локальных искажений // Автометрия.—1986.—№ 6.
3. Гороховатский В. А., Ерьсько Ю. Н., Путьгин Е. П., Стрельченко В. И. Локализация объектов на изображениях визуальных сцен // Автометрия.—1990.—№ 6.
4. Лабунец В. Г., Чернина С. Д. Теория и применение преобразования Хо // Зарубеж. радиоэлектрон.—1987.—№ 10.

Поступила в редакцию 28 октября 1992 г.