

УДК 629.7.017

ББК 39.62

МОДЕЛЬНАЯ ВЕРСИЯ БОРТОВОГО АЛГОРИТМА ОПЕРАТИВНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ

Андриенко А. Я.¹, Чадаев А. И.²

(Учреждение Российской академии наук

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
РАН, Москва)*

В рамках, определяемых модельным представлением бортовых алгоритмов, обсуждается специфика процесса распознавания – на борту беспилотного летательного аппарата – наземных (стационарных и подвижных) объектов.

Ключевые слова: распознавание наземных объектов, алгоритм оперативного распознавания.

1. Введение

Распознавание зрительных объектов остается наиболее трудной задачей в общей проблеме автоматизированной классификации [1]. И до сих пор не существует алгоритма распознавания объектов, сопоставимого по точности, универсальности, а главное, по быстродействию с механизмом формирования зрительных образов в сознании человека, да и любого представителя животного мира, обладающего хоть какими-нибудь зачатками интеллекта.

А между тем, применительно к рассматриваемой в статье задаче оперативного распознавания наземных подвижных (не обязательно движущихся) и стационарных объектов, исполняемого на борту беспилотного летательного аппарата (ЛА), было бы заманчиво воспроизвести эти природные свойства челове-

¹ Анатолий Яковлевич Андриенко, заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор (vladguc@ipu.rssi.ru).

² Александр Иванович Чадаев, старший научный сотрудник, кандидат технических наук (тел. (495) 334-88-71).

ского восприятия зрительных объектов. Однако за миллионы лет эволюционного развития «механизм» этого восприятия настолько совершенно приспособился к нуждам рутинного использования, что принципы действия его до сих пор остаются неразгаданными, несмотря на многочисленные исследования, проводимые на всевозможных уровнях – от клеточно-нейронного до общесистемного (синтаксического и семантического).

Для пояснения специфики представляемого алгоритма распознавания наземных объектов приведём «бытовой» пример реакции неискушённых зрителей на наиболее колоритные картины импрессионистов и пуантилистов, где непривычно изображены обыденные предметы в виде совокупности точек-мазков ограниченного набора (спектрально чистых) цветов. В поведении зрителя, пытающегося по названию картины («Стог сена», «Клумба» и проч.) распознать её объект, доминирует одна из двух стратегий: либо произвольное сканирование взглядом по поверхности картины при мысленном прикладывании (к определённым её фрагментам) детерминированного эталона предмета, либо специфически рассеянный взгляд на картину при мысленном охвате её некоторым размытым эталоном предмета, который «вдруг» свёртывается в экспрессивно красочное изображение объекта. В статье рассматривается алгоритм распознавания объектов преимущественно на основе воспроизведения второй из этих стратегий.

2. Постановка задачи распознавания наземных подвижных объектов

Считается, что на борту беспилотного ЛА имеется набор из S датчиков – оптических и радиолокационных; каждый s -ый датчик ($s = 1, 2, \dots, S$) формирует в дискретные моменты времени полёта $t = 1, 2, \dots$ кадры – изображения информационного поля $\ell_t^{(s)}(x, y)$, $x \in X^{(s)}$, $y \in Y^{(s)}$, где x , y – значения координат поля в бортовой системе координат ЛА. Размеры кадра $X^{(s)} \times Y^{(s)} = X \times Y$ будем считать (для простоты изложения) одинаковыми для всех датчиков.

В поле (x, y) , $x \in X$, $y \in Y$, могут находиться несколько объектов O_z , $z = 1, 2, \dots, Z$, каждый из которых принадлежит какому-либо из известных типов $q = 1, 2, \dots, Q$. Тип q объекта («автомобили», «мосты» и т. д.) характеризуется определённым набором признаков – признаковым вектором Π_q случайной природы, обладающим по крайней мере двумя свойствами:

1) оцениваемостью в том смысле, что каждый из векторов Π_q известным образом по некоторому соотношению $L_q = F_q(\Pi_q, V, x_q, y_q)$ отображается в S -мерный вектор L_q , входящий в состав информационного вектора $\ell_t = (\ell_t^{(1)}, \ell_t^{(2)}, \dots, \ell_t^{(S)})$; здесь $V = (V_I, V_{II})$ – вектор случайных факторов, причём V_I характеризует случайные условия отображения (метеорологические, полётные, освещения и др.), которые могут быть определены и полностью учтены при анализе изображения; V_{II} есть случайные ошибки – помехи в формировании измеряемой информации L_q , которые могут быть учтены лишь частично; x_q, y_q – координаты центра объекта типа q в поле (x, y) ;

2) устойчивостью и различимостью в том смысле, что векторы L_q ни при каких значениях возможных отклонений признаков от их математических ожиданий и ни при каких условиях отображения не совпадают для разных типов q объектов, а главное, отличаются от отображений других технических и природных объектов в информационном векторе ℓ_t .

Таким образом, каждый объект O_z , $z = 1, 2, \dots, Z$, характеризуется своим типом q , реализацией Π_{qz} признакового вектора Π_q и, наконец, координатами x_{zt}, y_{zt} центра объекта в поле (x, y) в дискретный момент времени t , так что его отображение в информационном векторе ℓ_t имеет вид $L_{zt} = F_q(\Pi_{qz}, V, x_{zt}, y_{zt})$. Задача состоит в том, чтобы по текущим векторным информационным данным $\ell_t(x, y)$, априорным данным об условиях V отображения и известным зависимостям $L_{zt} = F_q(\Pi_{qz}, V, x_{zt}, y_{zt})$, $q = 1, 2, \dots, Q$, построить в t -ый момент времени ($t = 1, 2, \dots$)

оценки $\hat{x}_{zt}, \hat{y}_{zt}$ координат x_{zt}, y_{zt} объектов, а также оценки $\hat{\Pi}_{qz}$ признаков векторов объектов $O_z, z = 1, 2, \dots, Z$, – с учётом значений таких же оценок, составленных ранее, в $(t-1)$ -ый момент времени полёта.

3. Принципы решения задачи

Распознавание объектов производится на основе вполне известных принципов, исходящих из декомпозиции исходной задачи на ряд частных задач.

1. Разработка алгоритмов фильтрации телеизображений с сопутствующим удалением из сцены наблюдения заведомо посторонних объектов.

2. Выявление наиболее информационно существенных и характерных признаков Π_q объекта – с учетом практического опыта автоматической классификации объектов, из которого следует, что распознавание происходит тем успешнее, чем меньше размерность вектора Π_q . В процессе построения Π_q естественным образом устанавливается и эталонная зависимость $\ell_q^* = F_q^*(\Pi_q, x_q, y_q)$, приведенная к условиям отображения, принимаемых в качестве номинальных.

3. Формирование составного скалярного критерия

$$(1) \quad J_t = \sum_{z=1}^Z J_{zt}(\ell_t, \ell_{zt}^*, J_{z(t-1)})$$

распознавания, такого, что каждый парциальный критерий J_{zt} имеет смысл, близкий к достоверности обнаружения объекта с признаками Π_{qz} в точке x_{zt}, y_{zt} . Трудности формирования критерия J_t связаны, в основном, с обоснованием свертки в критерий J_{zt} информационных данных, поставляемых различными датчиками: ценность этих данных для распознавания объектов в общем случае весьма неравнозначна.

4. Построение оператора P проективного совмещения кадров ℓ_t и ℓ_{t-1} . Он позволяет, в частности, выполнять прогнозирование $(x_{zt}, y_{zt}) = P[(x_{z(t-1)}, y_{z(t-1)}), u_{t-1}]$ координат объектов в t -ый момент времени с учётом: 1) их значений в $(t-1)$ -ый момент функцио-

нирования этих объектов и 2) управления u_{t-1} ориентацией линий визирования объектов относительно бортовой системы координат ЛА.

4. Алгоритм распознавания объектов

1. Описание алгоритма начнём с рассмотрения случая, когда в информационном поле находится один объект ($z = Z = 1$) известного типа q и необходимо распознать и локализовать его на фоне других объектов, отображенных в $\ell(x, y)$.

В алгоритме истинный объект отождествляется с R -мерным вектором π , составленным из признакового вектора и координат объекта; соответственно, вектор $\hat{\pi}_t = (\hat{\Pi}_{qz}, \hat{x}_{zt}, \hat{y}_{zt})$ интерпретируется как образ объекта, построенный в t -ый дискретный момент времени (индекс z образа объекта в дальнейшем опускается).

Физическая суть действия алгоритма заключается в отображении (по процедуре, вытекающей из F_q^* , см. раздел 3, п.2) на откорректированный (см. раздел 3, п.1) векторный кадр-изображение $\ell(x, y)$ размытого образа $\tilde{\pi}_t$, образуемого «расфокусированием» образа $\hat{\pi}_{t-1}$ посредством замены каждого r -го компонента ($r = 1, 2, \dots, R$) вектора $\hat{\pi}_{Pt} = P\pi_{t-1}$ (см. раздел 3, п.4) на множество $\Omega_t^{(r)}$ значений этого компонента с центром в $\hat{\pi}_{Pt}^{(r)}$; здесь множества $\Omega_t^{(r)}$, $r = 1, 2, \dots, R$, задаются так, что размеры их тем больше, чем меньше достоверность $J_{z(t-1)}$ (см. раздел 3, п.3) распознавания объекта в $(t-1)$ -ый момент – с тем чтобы реальный объект π охватывался образом $\tilde{\pi}_t$.

Действие же алгоритма в t -ый момент времени проявляется в том, чтобы сфокусировать размытый образ $\tilde{\pi}_t$ в детерминированный $\hat{\pi}_t$, такой, что

$$(2) \quad J_t(\hat{\pi}_t) = \sup J_t(\tilde{\pi}_t) > J_{t-1}(\hat{\pi}_{t-1}).$$

Разъясним это положение несколько детальнее.

Размытое множество $\tilde{\pi}_t$ представляется как «рой» $\{\pi_{tw}, w = 1, 2, \dots\}$ потенциальных образов, каждому из которых соответствует значение критерия J_t – см. (1). В результате образуется некоторое критериальное поле $J_t(\tilde{\pi}_t)$, на основе анализа которого алгоритм «сжимает» рой потенциальных образов – из условия (2). И, конечно же, представляется совершенно бесперспективным использование здесь традиционных методов поиска (детерминированного или случайного) глобального экстремума $J_t(\tilde{\pi}_t)$ в силу низкой (для данной задачи) скорости их действия, сводящегося к отысканию и перебору локальных экстремумов. Необходимое быстрое действие может быть достигнуто на основе анализа не локальных, а обобщённых характеристик критериального поля $J_t(\tilde{\pi}_t)$.

Разработанный специально для данной задачи метод быстрого решения (2) предусматривает:

1) формирование конечного роя $\{\pi_{tw}, w = 1, 2, \dots, W\}$ образов объекта из условия ортогонализации этих образов и равномерного покрытия ими многомерной области критериального поля;

2) выявление обобщённых характеристик критериального поля в виде аналога оценок ковариационных моментов $J_t(\tilde{\pi}_t)$ и $\pi_{tw}, w = 1, 2, \dots, W$, а также условных математических ожиданий $J_t(\tilde{\pi}_t)$;

3) вычисление вектора $\hat{\pi}_t$, доставляющего решение (2) на основе аппроксимации поля $J_t(\tilde{\pi}_t)$ сглаживающим R -мерным полиномом второго порядка, параметры которого определяются из условия точного воспроизведения этим полиномом основных характеристик (см. п.2)) исходного критериального поля.

2. В случае, если в информационном поле находятся несколько объектов одного (известного) типа и для каждого из них в $(t - 1)$ -ый момент времени полёта имеются оценки координат и признакового вектора, определение образов $\hat{\pi}_t$ объектов в t -ый момент не вызывает затруднений: для каждого объекта строится размытый образ и решается (2); однако при пересечении размытых образов различных объектов (например, из-за близкого

расстояния между ними) необходимо при анализе одного объекта исключать из кадра ℓ_t изображение оценки признакового вектора другого объекта.

3. Обобщение алгоритма на случай распознавания объектов нескольких типов в принципе не вызывает затруднений – если априори (при введении полётного задания) правильно будут перечислены типы объектов, которые могут находиться в информационном поле.

5. Пример фрагмента алгоритма распознавания

Конкретизация алгоритма распознавания единичного объекта, проведённая в предположении, что размерность вектора параметров этого объекта не превосходит 7, сводится к исполнению следующих операций.

1. Формирование конечного ряда $\{\pi_{tw}, w = 1, 2, \dots, 25\}$ из 25 виртуальных образов объекта по правилу

$$\pi_{tw}^{(n)} = \pi_{t-1}^{(n)} + \Delta\pi_{tw}^{(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, 8,$$

$$\Delta\pi_{tw}^{(n)} = \begin{cases} \alpha_{wn} \omega_{t-1}^{(n)}, & \omega = 1, 2, \dots, 8, \\ \delta_{wn}^{(8)} \omega_{t-1}^{(n)}, & \omega = 9, 10, \dots, 16, \\ -\delta_{wn}^{(16)} \omega_{t-1}^{(n)}, & \omega = 17, 18, \dots, 24, \\ 0, & \omega = 25. \end{cases}$$

Здесь $\pi_{t-1}^{(n)}$, $\pi_{tw}^{(n)}$ – n -ые компоненты векторов π_{t-1} , π_{tw} ; $\omega_{t-1}^{(n)} = \Omega_1^{(n)} / J_{t-1}$, где $\Omega_1^{(n)}$ – предельно возможное отклонение по модулю (от априорного значения) n -ой компоненты признакового вектора π_1 ; $J_{t-1} = J_{t-1}(\tilde{\pi}_{t-1})$; α_{wn} – элемент формируемой по алгоритму [2] ортогональной по столбцам (и строкам) матрицы $\|\alpha_{wn}\|$ Адамара размера 8×8 , составленной из +1 и –1 (последний столбец этой матрицы не используется):

$$(3) \quad \|\alpha_{wn}\| = \begin{vmatrix} + & + & + & + & + & + & + & + \\ + & - & - & - & + & - & + & + \\ + & - & + & + & - & - & - & + \\ + & + & - & - & - & + & - & + \\ - & - & - & + & - & + & + & + \\ - & + & + & - & - & - & + & + \\ - & + & - & + & + & - & - & + \\ - & - & + & - & + & + & - & + \end{vmatrix},$$

единицы в матрице (3) опущены; $\delta_{wn}^{(\Delta)}$ – аналог смещённой функции Дирака, определяемый соотношением

$$\delta_{wn}^{(\Delta)} = \begin{cases} 1 & \text{при } w - n = \Delta, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

2. Вычисление значений $J_{tw} = J_t(\pi_{tw})$, $w = 1, 2, \dots, 25$, критерияльного поля.

3. Вычисление координат оптимального в смысле (2) образа объекта по формуле

$$\hat{\pi}_t^{(n)} = \hat{\pi}_{t-1}^{(n)} + \frac{\sum_{w=1}^8 (J_{tw} \alpha_{wn}) \omega_{t-1}^{(n)} / 8}{2J_{t(25)} - J_{t(n+8)} - J_{t(n+16)}}, \quad n = 1, 2, \dots, 7.$$

Замечание. Обобщение алгоритма типа 1–3 на случай распознавания и локализации разнородных объектов в одном информационном поле в принципе не вызывает затруднений – если априори (при введении полётного задания) правильно перечислены классы объектов, находящихся в информационном поле.

6. Заключение

Практическая реализуемость представленной версии бортового алгоритма распознавания наземных объектов определяется в основном эффективностью проектно-технических решений смежных проблем (повышения контрастности и топологической

отделимости телеизображений наблюдаемых объектов, обеспечения устойчивости действия бортовой аппаратуры к сбоям и пропускам в поступающей информации и т.д.). Но обсуждение этих проблем уже не входит в компетенцию авторов данной публикации.

Литература

1. БОНГАРД М.М. *Проблема узнавания*. – М.: Наука, 1967.
2. ЛЕВЕНШТЕЙН В.И. *Применение матриц Адамара к одной задаче кодирования* // Проблемы кибернетики. – 1961. – Вып. 5 – С. 22–29.

PILOT VERSION OF ON-BOARD ALGORITHM FOR ON-THE-FLY RECOGNITION OF OBJECTS

Anatolii Andrienko, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Laboratory Head, Doctor of Science, professor (Moscow, Prof-soyuznaya st., 65, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru).

Alexander Chadaev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., Senior scientific researcher, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru

Abstract: Particular characteristics of the process of stationary and mobile ground targets recognition from the board of pilotless vehicle are considered in reference to onboard recognition algorithms.

Keywords: recognition of ground targets, algorithm for on-the-fly recognition.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии А. А. Ворониным