УДК 681.32

В.О. Хорошко,
доктор технічних наук, професор
Ю.Є. Хохлачова,
кандидат технічних наук

АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ У СКЛАДНИХ УМОВАХ

У статті представлений алгоритм розпізнавання об'єктів у складних умовах, що успішно використовується для вирішення завдань розвідки за допомогою безпілотних літальних апаратів, квадрокоптерів, оптимального вибору алгоритмів та оптимізації процесу прийняття рішень по об'єктах, що розвідуються. Алгоритми розпізнавання, засновані на обчисленні оцінок, дозволяють вирішувати задачі розпізнавання всіх основних типів: віднесення об'єкта до одного з заданих класів, автоматична класифікація, вибір системи ознак для опису об'єктів розпізнавання і оцінка їх інформативності.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати, розпізнавання об'єктів, алгоритми розпізнавання об'єктів.*

В статье представлен алгоритм распознавания объектов в сложных условиях, который успешно используется для решения задач разведки с помощью беспилотных летательных аппаратов, квадрокоптеров, оптимального выбора алгоритмов и оптимизации процесса принятия решений по объектам разведки. Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок, позволяют решать задачи распознавания всех основных типов: отнесение объекта к одному из заданных классов, автоматическая классификация, выбор системы признаков для описания объектов распознавания и оценка их информативности.

Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты, распознавание объектов, алгоритмы распознавания объектов.*

In this paper the algorithm for recognizing objects in difficult conditions, successfully used to solve the problems by using unmanned reconnaissance aircraft, quadrupters, optimal choice of algorithms and process optimization of the decisions on the explored objects is represented. Algorithms of recognition based on calculating estimates can solve the problems of the recognition of all major types of object classification given to one of the classes, automatic classification, choice of attributes to describe the object recognition and evaluation of their information content.

Keywords: *drones, object recognition, object recognition algorithms.*

Вступ

Одним із найбільш істотних показників системи розпізнавання є ймовірність правильного і однозначного вирішення її завдання розпізнавання невідомих об'єктів. За інших рівних умов, зокрема в умовах оптимальної обробки апостеріорної інформації, чим вище величина цього показника, тим більший обсяг інформації використовується при розпізнаванні цього об'єкта. Більше того, при певних обмеженнях, що накладаються на ознаки, коли ν – число ознак, що використовуються при розпізнаванні, зростає, збільшується ймовірність однозначного вирішення задачі розпізнавання.

Особливо це важливо при застосуванні безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА), які останнім часом широко використовуються в бойових умовах [1]. Масове застосування безпілотників сформувало цілий ряд питань, на які необхідно знайти відповіді:

– Як працювати в умовах активної протидії і застосування маскування супротивником?

– Як обробляти отримані зображення?

При чому, найбільш складним, на наш погляд, є розробка методів відновлення відеоінформації в складних умовах застосування БПЛА. Це пов'язано з тим, що відеоінформація, яка швидко надходить, повинна оброблятися в реальному масштабі часу. При обробці і розпізнаванні об'єктів за допомогою логічного підходу важливим завданням є виділення ознак. Однією з умов, яка накладається при цьому, є простота ознак для опису об'єктів.

Логічні алгоритми розпізнавання в ряді випадків не дозволяють отримати однозначне рішення про належність об'єкта, який розпізнається, до певного класу. У [2] запропонований клас алгоритмів, що називається алгоритмами розпізнавання, заснованими на обчисленні оцінок (АВО), який дає можливість отримати однозначне рішення про належність об'єктів до певного класу [2; 3].

Основна частина. Нехай безліч об'єктів $\{w\}$ підрозділені на класи Ω_i, $i=1,...,m$, і для опису об'єктів використовуються ознаки x_j, $j=1,...,N$. Усі об'єкти описуються одним і тим же набором ознак. Кожна з ознак може приймати значення з різних множин, наприклад з наступних: *{0,1}*, *0* – ознака не виражена, 1 – ознака виражена; *{0,1, x}*, *x* – інформація про ознаки відсутня; *{0,1,...d}* – ступінь виразності ознаки має різні градації; *[a,b]* – ознака приймає значення з числового відрізка; $f_i(x_1,...,x_N)$ – умовна площина розподілу значень ознак. Апріорна інформація може надаватися у вигляді таблиці навчання $T_{N,m}$. Алгоритм розпізнавання порівнює опис об'єкта, що розпізнається (рядок ω') з $T_{N,m}$ і приймає рішення про те, до якого класу віднести об'єкт. Класифікація заснована на обчисленні ступеня схожості (оцінки) рядка, що розпізнається, на рядки, приналежність яких до класів відома. Ця процедура включає в себе 2 етапи: спочатку підраховується оцінка для кожної сторони з $T_{N,m}$, а потім отримані оцінки використовуються для отримання сумарних оцінок за кожним з класів Ω_i.

Досвід вирішення завдань розпізнавання свідчить про те, що часто основна інформація міститься не в окремих ознаках, а в їх різних поєднаннях. Оскільки не завжди відомо, які саме поєднання інформативні, то в алгоритмах типу АВО ступінь схожості об'єктів обчислюється не послідовним зіставленням окремих ознак, а зіставленням усіх можливих (або певних) поєднань ознак, що входять в опис об'єктів.

Розглянемо повний набір ознак *<1,...,N>* і виділимо систему підмножини ознак (систему опорних множин алгоритма) $S_1,...,S_l$. В АВО при наявності обмежень на систему опорних множин зазвичай розглядаються або всі підмножини ознак фіксованої довжини *k, k=2,...,N-1*, або взагалі всі підмножини

множини ознак. Видалимо довільний піднабір ознак із рядків $\omega_1, \omega_2, ..., \omega_{r_m}$, ω' і позначимо отримані рядки через $S\widetilde{\omega_1}, S\widetilde{\omega_2}, ..., S\widetilde{\omega_{r_m}}$, $S\widetilde{\omega_{r_i}}$. Правило близькості, що дозволяє оцінити схожість рядків $S\omega'$ і $S\widetilde{\omega_{r_i}}$, полягає в наступному. Нехай "усічені" рядки містять q перших ознак, тобто $S\widetilde{\omega_{r_i}} = (\alpha_1, ..., \alpha_q)$ і $S\omega' = (\beta_1, ..., \beta_q)$, і задані пороги $\varepsilon_i, ..., \varepsilon_q$, δ. Рядки $\underline{S\widetilde{\omega_{r_1}}}$ і $S\omega'$ вважаються схожими, якщо виконується не менше ніж δ нерівностей вигляду $\left|\alpha_j - \beta_j\right| \le \varepsilon_j$, $j = 1, ..., q$. Величини $\varepsilon_i, ..., \varepsilon_q$, δ входять як параметри в модель класу алгоритмів типу АВО.

Розглянемо процедуру обчислення оцінок за підмножиною S_1. Для інших підмножин вона повністю аналогічна. У таблиці $T_{N,m}$ виділяються стовпці, що відповідають ознакам, які входять в S_1; інші стовпці викреслюються. Перевіряється близькість рядка $S_1\omega'$ рядкам $S_1\omega_1, ..., S_1\omega_r$, які належать класу Ω. Число рядків цього класу, близьких за обраним критерієм до рядка $S_1\omega'$, що класифікується, позначається через $\Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_1)$; остання величина − це оцінка рядка ω' для класу Ω_1 за опорною множиною S_1. Аналогічним чином обчислюються оцінки для інших класів: $\Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_2), ..., \Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_m)$. Застосування подібної процедури до всіх інших опорних множин алгоритму дозволяє отримати систему оцінок $\Gamma_S(\omega', \Omega_1), ..., \Gamma_{S_2}(\omega', \Omega_m), ..., \Gamma_{S_l}(\omega', \Omega_1), ..., \Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_m)$. Величини

$$\left.\begin{array}{c}
\Gamma(\omega', \Omega_1) = \Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_1) + \Gamma_{S_2}(\omega', \Omega_1) + ... + \\
+\Gamma_{S_l}(\omega', \Omega_1) = \sum\limits_{S_A} \Gamma(\omega', \Omega_1); \\
... \\
\Gamma(\omega', \Omega_m) = \Gamma_{S_1}(\omega', \Omega_m) + \Gamma_{S_2}(\omega', \Omega_m) + ... + \\
+\Gamma_{S_l}(\omega', \Omega_m) = \sum\limits_{S_A} \Gamma(\omega', \Omega_m)
\end{array}\right\} \quad (1)$$

є оцінками рядка для відповідних класів по системі опорних множин алгоритму S_A. На підставі аналізу цих величин приймається рішення або про віднесення об'єкта до одного з класів Ω_i, i=1,...,m, або про відмову від його розпізнавання. Вирішальне правило може приймати різні форми, зокрема сторона, що розпізнається, може бути віднесена до класу, якому відповідає максимальна оцінка, або ця оцінка буде перевищувати оцінки всіх інших класів не менш ніж на певну порогову величину η_1, або величина відношення відповідної оцінки до суми оцінок для всіх інших класів буде не менше величини порога η_2 і т. д. Параметри вигляду η_1 і η_2 також включаються до моделі АВО.

Визначення класу АВО зводиться до формалізації наступних етапів, відповідних послідовності реалізації процедури розпізнавання:

1) виділення системи опорних множин алгоритму, за якими проводиться аналіз розпізнаваних об’єктів;

2) вводиться поняття близькості на множині частин опису об’єктів;

3) задаються правила:

а) які дозволяють за обчислювальною оцінкою ступеня подібності еталонного об’єкта та об’єкта, що розпізнається, обчислити величину, яка називається оцінкою для пар об’єктів;

б) формування величин оцінок для кожного з еталонних класів за фіксованою опорною множиною на основі оцінок для пар об’єктів;

в) формування сумарної оцінки для кожного з еталонних класів за всіма опорним підмножинами;

г) прийняття рішення, яке на основі оцінок для класів забезпечує віднесення об’єкта, що розпізнається, до одного з класів або відмовляє йому в класифікації.

Фіксація способу системи опорних множин, типу функції близькості, правил обчислення оцінок і вирішального правила визначає вибір підкласу алгоритмів типу АВО, а завдання значень відповідних параметрів − конкретний алгоритм типу АВО. Модель класу параметрична, тобто має місце взаємно однозначна відповідність між конкретними алгоритмами і наборами числових параметрів. У такому випадку завдання конкретного алгоритму, що належить до класу, який розглядається, дозволяє зіставити йому значення функціоналу якості (наприклад, число помилок і відмов від розпізнавання на таблиці навчання) і, отже, визначити останній на точках параметричного простору алгоритму.

Якщо будувати обчислювальну процедуру з цього опису алгоритму, то при великій потужності системи опорних множин потрібно дуже багато машинних операцій.

Особливість і найважливіше гідність класу АВО в тому, що для обчислення оцінок, що визначають приналежність об’єкта, який розпізнається, існують прості аналітичні формули, що замінюють складні переборні процедури (які виникають при обчисленні оцінок близькості за системою опорних множин) Оскільки ефективність (в обчислювальному сенсі) обчислення функціоналу якості в АВО повністю визначається ефективністю процедури обчислення оцінок, то принципово можлива побудова оптимального алгоритму. У випадках, коли може бути знайдений абсолютно екстремальний алгоритм, є гарантія, що при заданому вихідному матеріалі $T_{N,m}$ в цьому класі алгоритмів не існує кращого алгоритму розпізнавання.

Зупинимося на аналітичних формулах, що забезпечують ефективне обчислення оцінок $\Gamma_i(\omega')$ при різних способах завдання системи опорних множин АВО.

1. Ефективні формули, що моделюють роботу АВО, при наявності обмежень на систему опорних множин:

а) S_A збігається з системою всіх підмножин потужності k безлічі {1,..., N}:

$$\Gamma_i(\omega') = \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \sum_{\omega_r \in \Omega_i} \sum_{j=0}^{\delta} C^{k-\delta}_{p(\omega_r, \omega`)} C^{\delta}_{N-p(\omega_r, \omega`)}, i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

де $\mathrm{p}(\omega_r, \omega`)$ – число виконаних нерівностей виду $\left|\alpha_j - \beta_j\right| \le \varepsilon_j$;

б) S_A збігається з системою всіх непустих підмножин множини {1,...,N}:

$$\Gamma_i(\omega') = \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \sum_{\omega_r \epsilon \Omega_i} \left(2^{p(\omega_r, \omega`)} - 1\right),\ i = 1,\ \ldots,\ m. \tag{3}$$

2. Ефективні формули, що моделюють роботу АВО при відсутності обмежень на систему опорних множин [2; 4].

Практика розпізнавання показує, що в деяких випадках апріорі відомі піднабори ознак, які слід ураховувати при зіставленні об’єкта, що розпізнається, з об’єктами навчальної таблиці. Ці підмножини ознак не завжди збігаються з частими випадками (2) і (3); вони можуть мати різну довжину, виключати заборонені комбінації і т.п. У [4] аналітичні формули отримані для випадку довільних опорних множин.

Розширення сфери застосування АВО засноване на введенні характеристичної булевої функції системи опорних множин алгоритма f_{S_A} і встановленні взаємно однозначної відповідності між підмножинами безлічі ознак і булевими векторами довжини N (вершинами N-мірного одиничного куба) [3; 5].

У [3] показано, що в тих випадках, коли безліч одиниць f_{S_A} утворює в одиничному N-мірному кубі інтервал або суму непересічних інтервалів, також існують аналітичні формули для обчислення оцінок. Нагадаємо, що підмножина вершин одиничного N-мірного куба називається інтервалом, якщо вона відповідає деякій елементарній кон’юнкції. Очевидно, що всі грані, ребра і вершини одиничного N-мірного куба є інтервалами.

Система опорних множин організована таким чином (відповідний інтервал представлений ребром): до неї включені всі ознаки, що входять до ДНФ характеристичної функції без заперечення (x_2 і x_3), не включені ознаки, що входять до ДНФ з запереченням (x_4), а за іншими ознаками (x_1) відбувається повна варіація, тобто розглядаються підмножини, які включають, так і не включають ці ознаки $(x_1, x_2, x_3,$ і $x_2, x_4)$.

Ефективна аналітична формула для обчислення оцінок у тих випадках, коли характеристичній функції системи опорних множин відповідає інтервал, який має вигляд:

$$\Gamma_i(\omega') = \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \sum_{\omega_r \epsilon \Omega_i} \left(2^{p(\omega_r', \omega`)}\right). \tag{4}$$

У (4) враховується внесок тільки тих рядків таблиці навчання “ефективних”), постійна частина яких (у нашому випадку $< x_2, x_3 >$) близька до постійної частини ω‘; $p^*(\omega_r', \omega')$ – число виконаних нерівностей виду $\left|\alpha_j - \beta_j\right| \le \varepsilon_j$ на варьйованій частині (в нашому випадку $<x_1>$).

Таким чином, за умови $\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_6 = 0$ і враховуючи, що ефективні в Ω_1 рядки ω_2 і ω_3, в Ω_2 – рядки ω_1 і ω_6, $p^*(\omega_2', \omega') = 0$, маємо:

$$\Gamma_1(\omega`) = \left(\frac{1}{3}\right)\left(2^{\circ} + 2^1\right) = 1; \Gamma_2(\omega`) = \left(\frac{1}{3}\right)\left(2^{\circ} + 2^1\right) = 1.$$

Отриманий результат означає, що при зазначеному виборі системи опорних множин рядок ω‘не класифікується.

Таблиця 1

Класи	Об'єкти	Значення ознак			
		x_1	x_2	…	x_N
Ω_1	ω_1 ω_2 … ω_{r_1}	$\alpha_{1,1}$ $\alpha_{2,1}$ … $\alpha_{r_{1},1}$	$\alpha_{1,2}$ $\alpha_{2,2}$ … $\alpha_{r_1,2}$	…	$\alpha_{1,N}$ $\alpha_{2,N}$ … $\alpha_{r_1,N}$
…	…	…	…	…	…
Ω_m	$\omega_{r_{m-1}+1}$ $\omega_{r_{m-1}+2}$ … ω_{r_m}	$\alpha_{r_{m-1}+1,1}$ $\alpha_{r_{m-1}+2,1}$ … $\omega_{rm,1}$	$\alpha_{r_{m-1}+1,2}$ $\alpha_{r_{m-1}+2,2}$ … $\omega_{rm,2}$		$\alpha_{r_{m-1}+1,N}$ $\alpha_{r_{m-1}+2,N}$ … $\omega_{rm,N}$
	ω`	β_1	β_2	…	β_N

Якщо характеристичній функції відповідає сума непересічних інтервалів (представляється ортогональної ДНФ), як, наприклад, у разі $S_A = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$,

$S_1 = \langle x_2, x_3 \rangle$, $S_2 = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$, $S_3 = \langle x_1, x_3, x_4 \rangle$ $S_4 = \langle x_1, x_3 \rangle$, $S_5 = \langle x_1, x_2, x_4 \rangle$,

$f_{S_A} = x_2, x_3, \overline{x_4} \vee x_1, \overline{x_2}, x_3 \vee x_1, \overline{x_3}, x_4$, то при обчисленні оцінок (4) застосовується до кожного інтервалу окремо і результати підсумовуються.

У [2; 3] показано, що складність формули обчислення оцінок в АВО при довільному S_A пропорційна складності ДНФ, що представляє характеристичну функцію системи опорних множин алгоритму.

Це означає, що побудова простої формули для обчислення оцінок $\Gamma_1(\omega`)$ пов'язана із завданням мінімізації булевих функцій у класі ДНФ [3; 4], а точніше − із завданням побудови найкоротшої ортогональної ДНФ або ДНФ, в якій кожен інтервал має невелике число перетинів із сусідніми. У загальному випадку задача такого синтезу нерозв'язна і тому слід користуватися наближеними алгоритмами, що забезпечують отримання "досить простих" ортогональних ДНФ або ДНФ з невеликим числом взаємних перетинів інтервалів [5].

Таким чином, якщо для обчислення відстані $\rho_i(\alpha_j, \beta_j)$ існує ефективний алгоритм і число операцій при одному такому обчисленні не перевищує деякої величини Q, то число операцій при обчисленні всіх величин $\Gamma_1(\omega`), i = 1, 2, \ldots, m$ не перевищує $2QNm$.

Число операцій при розпізнаванні одного об'єкта в фіксованому алгоритмі A пропорційне “площі” таблиці $T_{N,m}$ з коефіцієнтом пропорційності, що не перевершує $2Q$ (табл. 1). Зведення задачі побудови екстремальних алгоритмів типу АВО до відшукання екстремумів функції багатьох змінних було обґрунтовано Журавльовим Ю.І. [2]. Для проведення оптимізації можуть бути застосовані методи переборного типу (при невеликому числі параметрів), градієнтного типу або випадкового пошуку.

Висновки

Клас АВО успішно використовується для вирішення завдань розвідки за допомогою безпілотних літальних апаратів, квадрокоптерів, оптимального вибору алгоритмів та оптимізації процесу прийняття рішень по об'єктам, що розвідуються. Алгоритми цього класу дозволяють вирішувати задачі розпізнавання всіх основних типів: віднесення об'єкта до одного з заданих класів, автоматична класифікація, вибір системи ознак для опису об'єктів розпізнавання і оцінка їх інформативності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Василин Н.Я.* Беспилотный летательный аппарат / Н.Я. Василин. – Минск : ОКО “Попурри”, 2003. – 272 с.

2. *Журавлев Ю.И.* Алгоритмы распознавания, основанные на вычислении оценок / Ю.И. Журавлев, В.В. Никифоров // Кибернетика. – 1971. – № 3. – С. 72–79.

3. *Горелик А.Л.* Современное состояние проблемы распознавания / А.Л. Горелик, Н.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин. – М. : Радио и связь, 1985. – 162 с.

4. *Хорошко В.А.* Алгоритмы восстановления изображений, получаемых с беспилотных летательных аппаратов / В.А. Хорошко, Н.А. Дуксенко // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2016. – Том 6. – № 1. – С. 5–11.

5. *Хорошко В.А.* Распознавание видеоинформационных потоков, передаваемых беспилотными летательными аппаратами / В.А. Хорошко, Ю.Е. Хохлачова // Сучасна спеціальна техніка. – 2016. – № 3. – С. 132–143.

Отримано 01.02.2017
Рецензент Рибальський О.В., д.т.н.