УДК 681.325

Т.М. Локтікова, ст. викл.
Житомирський інженерно-технологічний інститут
Є.А. Остринський, інженер
СНВП "Промекс" м. Житомир

СТРУКТУРНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ ІНВАРІАНТНИХ ОЗНАК ПРИ РОЗПІЗНАВАННІ ЗОБРАЖЕНЬ

Вибір простору ознак, в якому здійснюється розпізнавання, багато в чому визначає ефективність цієї процедури. В залежності від застосування в тій або іншій системі, ознаки повинні задовольняти низці вимог. Зокрема, на практиці часто виникає задача розпізнавання довільно розташованих об'єктів. Запропоновано вдосконалений метод розпізнавання образів, що є інваріантним до зсуву та повороту об'єкта і базується на розрахунку характеристик взаємного положення дотичних до контуру об'єкта в кожній його точці та дотичних до допоміжних фігур. Проведено моделювання даного методу на ПЕОМ.

Серед існуючих підходів до розпізнавання об'єктів можна виділити такі [1]: методи, засновані на визначенні міри подібності за збігом значень яскравості точок потокового та еталонного зображень; кореляційні методи, засновані на обчисленні взаємної кореляційної функції; методи, які використовують обчислення відстані Левенштейна, що виконується із застосуванням методу динамічного програмування; метод крос-кореляції; методи, які використовують для розпізнавання інтегральної характеристики зображення; методи, які базуються на використанні нейронних мереж. Проте перераховані методи або дозволяють одержати прийнятні часові характеристики тільки при значному розпаралелюванні обчислювального процесу, або мають обмежену розподільчу можливість і слабку завадозахищеність.

З огляду на критерії щодо методу розпізнавання образів (розпізнавання повинно виконуватись за контурним представленням зображення; максимальна простота; мінімальний час розпізнавання) найбільшої уваги заслуговують структурні методи розпізнавання за контурним представленням зображень, що передбачають дослідження будови і взаємного розташування частин контуру, оскільки в алгоритмах реалізації цих методів присутні лише операції додавання, множення та порівняння, що легко реалізуються апаратно та не потребують багато часу на виконання.

Знаходження інваріантних ознак

Будемо розглядати зображення об'єкта як бінарну функцію $f(x, y)$ яскравості точок з координатами x та y. У загальному вигляді функція яскравості описується як $f(x, y, \Delta x, \Delta y, k, \alpha)$. Зміну положення об'єкта на зображенні будемо розглядати як дію групи $g(\Delta x, \Delta y, k, \alpha)$ у просторі XY.

Задача полягає в побудові інваріантів до дії групи g, що залежать тільки від характеру функції $f(x, y)$.

Інваріантності до зсувів Δx, Δy можна досягти шляхом переносу початку координат у точку центра ваги зображення (x_0, y_0). Координати центра ваги визначаються за такими формулами:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N};$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N} y_i}{N};$$

$$x'_i = x_i - x_0;$$

$$y'_i = y_i - y_0,$$

де N – загальна кількість точок контуру.

Отримане в результаті цих перетворень зображення $f(x'_i, y'_i)$ не залежить від параметрів Δx, Δy.

Для отримання ознак образу, що розпізнається, інваріантних до повороту та масштабування, скористаємося теорією груп Лі [2, 3]. Будемо розглядати однопараметричні групи Лі, що означені на площині декартових координат XY [4]:

$$x' = \mu(x, y, \varepsilon);$$
$$y' = \nu(x, y, \varepsilon),$$

де ε – параметр, що визначає, який елемент групи підлягає перетворенню.

Наприклад, якщо ε_0 є нейтральним елементом щодо параметрів групи, то:

$$x' = \mu(x, y, \varepsilon_0) = x;$$
$$y' = \nu(x, y, \varepsilon_0) = y.$$

Нехай вектор $\bar{g} = [g_x, g_y]^T$ є вектором групи Лі, що вказує напрямок, в якому точка (x, y) змінює своє положення в результаті перетворення.

Тоді

$$g_x(x, y) = \frac{\partial \mu}{\partial \varepsilon}\Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0};$$

$$g_y(x, y) = \frac{\partial \nu}{\partial \varepsilon}\Big|_{\varepsilon=\varepsilon_0}.$$

Оператор

$$L_G = g_x \frac{\partial}{\partial x} + g_y \frac{\partial}{\partial y}$$

називається генератором групи G.

Функція $f(x, y)$ є константою щодо дії генератора групи G, якщо

$$L_G f = g_x \frac{\partial f}{\partial x} + g_y \frac{\partial f}{\partial y} = 0, \qquad (1)$$

або у векторній формі

$$\nabla f \cdot \bar{g}(x, y) = 0.$$

Нехай контур C задано неявною функцією параметра t, тоді:

$$\forall t \quad f(x(t), y(t)) = K.$$

Оскільки функція є незмінною на контурі, отримаємо:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial f}{\partial y}\frac{dy}{dt} = 0. \qquad (2)$$

Зіставляючи (1) та (2), маємо:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{g_y}{g_x}.$$

Тобто, функція контуру зображення $f(x, y)$ інваріантна до перетворення Лі, що генероване L_G, якщо дотична до контуру у кожній його точці співнапрямлена з вектором групи $\bar{g}$.

Введемо локальний показник інваріантності $l_G(x, y)$ щодо дії групи G в точці (x, y), що належить контуру C [4]:

$$l_G = \left(\bar{\theta}(x, y) \cdot \bar{g}(x, y)\right),$$

де $\bar{\theta}(x, y)$, $\bar{g}(x, y)$ – відповідно вектор, паралельний до дотичної до контуру в точці (x, y), та вектор групи, що є нормалізованими; вони визначаються таким чином:

$$\bar{g}(x, y) = \frac{g_x(x, y)\bar{i} + g_y(x, y)\bar{j}}{\sqrt{g_x^2(x, y) + g_y^2(x, y)}};$$

$$\bar{\theta}(x, y) = \frac{dx\bar{i} + dy\bar{j}}{\sqrt{(dx)^2 + (dy)^2}},$$

де $\bar{i}$, $\bar{j}$ – орти площини XY.

Тепер знайдемо функцію, що характеризує інваріантність всього контуру C щодо дії генератора групи G. Такою функцією є функція густини I_G розподілу на проміжку [-1, 1] значень l_G, визначених в кожній точці контуру C. Функція I_G є інваріантною щодо повороту та зміни масштабу контуру, що буде показано пізніше.

Нехай C є функцією параметра t, $t\in[t_0, T]$. Тоді довжина контуру $s(t)$ вздовж дуги контуру C визначається так:

$$s(t)=\int_{t_0}^{T}\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\Big|_{\tau}\right)+\left(\frac{dy}{dt}\Big|_{\tau}\right)}d\tau .$$

Загальна довжина S контуру C має вигляд:

$$S = s(T)=\oint_C ds .$$

Функція C є функцією параметра s, де $s = s(t)$. Тоді локальний критерій інваріантності l_G теж можна визначити через s. Розглянемо випадок, коли l_G є монотонною функцією параметра s (рис. 1).

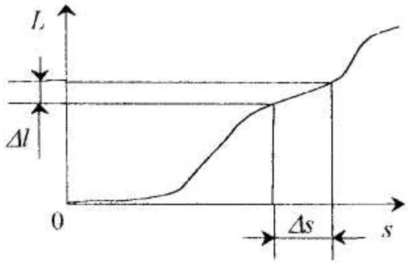


Рис. 1

Функція критерію інваріантності $I(l_G)$ визначається так:

$$I(l_G)=\lim_{\Delta l_G\to 0}\left|\frac{\Delta s}{S\Delta l_G}\right|=\frac{1}{S}\left|\frac{ds}{dl_G}\right| .$$

В загальному випадку, розбиваючи функцію l_G на монотонні інтервали, отримаємо

$$I(l_G')=\frac{1}{S}\sum_{s\in[0,S]\,|\,l_G(s)=l_G'}\left|\frac{ds}{dl_G}\right| . \quad (3)$$

Покажемо, що функція критерію інваріантності не змінюється при повороті та масштабуванні контуру.

Нехай контур повернуто на кут α та промасштабовано з коефіцієнтом k. Тоді координати точки (x, y) контуру зміняться таким чином:

$$x' = k(x\cos\alpha - y\sin\alpha);$$
$$y' = k(x\sin\alpha + y\cos\alpha).$$

Знайдемо довжину дуги перетвореного контуру:

$$\frac{dx'}{dt}=k\cos\alpha\frac{dx}{dt}-k\sin\alpha\frac{dy}{dt};$$
$$\frac{dy'}{dt}=k\sin\alpha\frac{dx}{dt}+k\cos\alpha\frac{dy}{dt};$$
$$\sqrt{\left(\frac{dx'}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy'}{dt}\right)^2}=k\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2+\left(\frac{dy}{dt}\right)^2} .$$

Отже, $s'(t) = k\, s(t)$, тоді загальна довжина контуру $S' = kS$. Підставляючи отриманий вираз в (3), одержимо:

$$I'(l_G')=\frac{1}{S'}\sum_{l_G(s)=l_G'}\left|\frac{ds'}{dl_G}\right|=\frac{1}{kS}\sum_{l_G(s)=l_G'}k\left|\frac{ds}{dl_G}\right|=\frac{1}{S}\sum_{l_G(s)=l_G'}\left|\frac{ds}{dl_G}\right|=I(l_G') .$$

З теорії груп Лі відомо, що генератор групи повороту та масштабування визначається таким чином:

$$L_G = -y\frac{\partial}{\partial x} + x\frac{\partial}{\partial y}.$$

Тобто, вектором групи є вектор $\overline{g}(-y, x)$.

Графічна інтерпретація методу розпізнавання

На рис. 2 для довільного контуру в точці (x_i, y_i) побудовані вектори – паралельний до дотичної до контуру та вектор групи – відповідно $\overline{\theta}$ та $\overline{g}$.

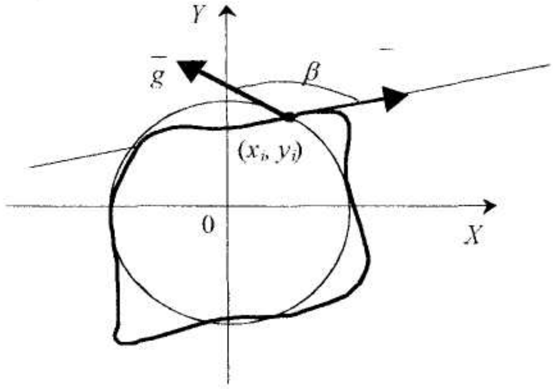


Рис. 2

Вектором групи в точці (x_i, y_i) є вектор з координатами $(-y_i, x_i)$, тобто він є паралельним до дотичної, що проведена до кола з центром в точці (0, 0), що проходить через точку (x_i, y_i) Очевидно, що при повороті та масштабуванні кут між вектором, паралельним до дотичної в точці (x_i, y_i), та вектором групи в цій точці є величиною незмінною, а отже, є ознакою, що характеризує кожну окрему точку контуру та є інваріантною до групи перетворень – поворот та масштабування.

Локальний критерій інваріантності в точці (x_i, y_i) є скалярним добутком нормалізованих векторів $\overline{\theta}$ та $\overline{g}$, що дорівнює косинусу кута між ними.

Функція критерію інваріантності характеризує розподіл значень локального критерію інваріантності на проміжку [-1, 1], підрахованих для всього контуру, і є інваріантною до повороту та зміни масштабу зображення, що було показано вище.

Недоліки методу та їх усунення

При виконанні зйомки зображення у відеокамері відбудеться етап дискретизації, в результаті якого контур зображення дещо спотворюється. Тобто дотична до контуру в деякій його точці може змінити свій напрямок відносно дотичної до кола, проведеного через центр координат та цю точку. Зрозуміло, що не збереже своїх значень і функція інваріантності.

У попередніх роботах [4] пропонувалось розраховувати дотичну до контуру за двома сусідніми точками. Але при повороті та зміні масштабу взаємне розташування будь-яких двох точок контуру після дискретизації зображення може суттєво змінюватись і напрямок дотичної буде визначено неправильно.

Для усунення вказаного недоліку необхідно звернути увагу на властивості контуру предметів, задача розпізнавання яких ставиться. Здебільшого, це предмети створені людиною, а отже, їх контур, зазвичай, складається з ділянок прямих та кривих ліній.

При повороті та зміні масштабу прямої лінії її дискретизована форма має певні властивості, які дозволяють виділити пряму на контурі зображення. Якщо знайти початок та кінець прямої лінії на контурі, то можна визначити її напрямок, а отже, більш правильно визначити напрямок дотичної до контуру.

Ознаками ділянки прямої лінії, що дозволяють виявити її на контурі, є [5, 6]:

– сегменти ділянки прямої лінії паралельні один до одного;

– відстань між двома сусідніми сегментами ділянки прямої лінії у напрямку, перпендикулярному напрямку сегментів, не може становити більше однієї точки;

– сегменти ділянки прямої лінії не можуть відрізнятися один від одного за довжиною більше ніж на одну точку.

При повороті та зміні масштабу кривої лінії її дискретизована форма теж має певні властивості, які дозволяють виділити її на контурі зображення. Якщо деяка частина контуру буде містити ділянку кривої лінії, то доцільно проводити її апроксимацію і розрахунок дотичних виконувати за апроксимуючою кривою, що підвищує точність визначення напрямку дотичної.

Ознаками ділянки кривої, що дозволяють виявити її на контурі, є [7]:

– сегменти ділянки кривої відрізняються один від одного за довжиною на одну або на декілька точок;

– сегменти ділянки кривої є паралельними один до одного.

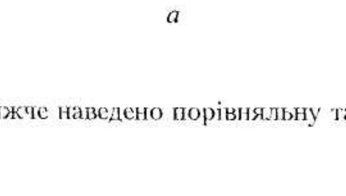
Як додатковий спосіб усунення впливу похибок розрахунку локальних критеріїв інваріантності необхідно виконати розбиття області визначення функції критерію інваріантності [-1, 1] на декілька проміжків і вести обчислення її значень на проміжку таким чином: якщо значення локального критерію інваріантності потрапляє в межі проміжку, то значення функції критерію інваріантності на цьому проміжку збільшується на величину $1/N$, де N – загальна кількість точок контуру. Таким чином, якщо після розрахунків значення локального критерію інваріантності у деякій точці не буде суттєво відрізнятися від його значення у відповідній точці еталона, то воно залишиться в межах одного і того ж проміжку. Результати моделювання показують, що найбільш ефективним є розбиття області визначення функції критерію інваріантності [-1, 1] на шість проміжків.

Моделювання методу розпізнавання зображень

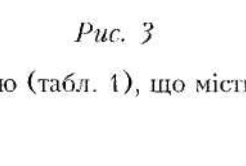
Моделювання виконано на мові Object Pascal з використанням інтегрованого середовища програмування Borland Delphi Client/Server для операційних систем Windows 95 / 98 / Windows NT 4.0.

Тестовий набір контурів моделі складався з таких груп:

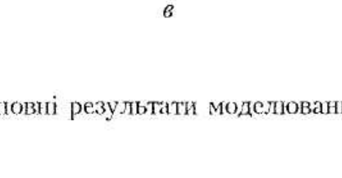
1. Контури першої деталі механізму:
   - еталонний (рис. 3, *а*) (кут повороту $\alpha = 0°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - перший тестовий контур (кут повороту $\alpha = 17°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - другий тестовий контур (кут повороту $\alpha = 34°$, коефіцієнт масштабування $k = 2$);
   - третій тестовий контур (кут повороту $\alpha = 73°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - четвертий тестовий контур (кут повороту $\alpha = 0°$, коефіцієнт масштабування $k = 2{,}8$).
2. Контури другої деталі механізму:
   - еталонний (рис. 3, *б*) (кут повороту $\alpha = 0°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - перший тестовий контур (кут повороту $\alpha = 17°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - другий тестовий контур (кут повороту $\alpha = 34°$, коефіцієнт масштабування $k = 2$);
   - третій тестовий контур (кут повороту $\alpha = 73°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - четвертий тестовий контур (кут повороту $\alpha = 0°$, коефіцієнт масштабування $k = 2{,}8$).
3. Контури одиниці військової техніки (танка):
   - еталонний (рис. 3, *в*) (кут повороту $\alpha = 0°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - перший тестовий контур (кут повороту $\alpha = 28°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$);
   - другий тестовий контур (кут повороту $\alpha = 43°$, коефіцієнт масштабування $k = 1{,}7$);
   - третій тестовий контур (кут повороту $\alpha = 62°$, коефіцієнт масштабування $k = 1$).



а



б



в

Рис. 3

Нижче наведено порівняльну таблицю (табл. 1), що містить основні результати моделювання.

Таблиця 1

Метод розпізнавання	Тип контуру	Максимальне значення середньоквадратичної похибки, %	Мінімальне значення середньоквадратичної похибки, %	Максимальне значення абсолютної похибки, %	Мінімальне значення абсолютної похибки, %
Без виділення ділянок прямих ліній та ділянок кривих	Деталь № 1	25,3	5,9	13,8	3,7
	Деталь № 2	26,3	5,2	16,5	4,0
	Одиниця військової техніки	15,2	12,2	12,8	11,1
З виділенням ділянок прямих ліній та ділянок кривих	Деталь № 1	5,3	1,3	3,0	0,9
	Деталь № 2	5,4	3,6	4,2	2,2
	Одиниця військової техніки	5,9	2,6	3,9	2,0

Таким чином, були показані переваги запропонованого методу: підвищення точності визначення інваріантних ознак контуру зображення, а отже і якості розпізнавання. Наявність в методі розпізнавання з виділенням ділянок прямих ліній та ділянок кривих лише операцій додавання, множення, зсуву та порівняння, що легко реалізуються, дозволяє здійснювати процедуру розпізнавання образів за малий проміжок часу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Абламейко С.В., Лагуновский Д.М.* Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Белоруси, 1999. – 300 с.
2. *Hoffman W.C.* The Lie transformation group approach to visual neuropsychology // In E.Leewenberg and H.Buffart, editors. Formal theories of visual perception. – Wiley: NewYork, 1978. – P. 27–66.
3. *David McG. Squire, Terry M. Caelli.* Invariance Signatures: Characterizing contours by their departures from invariance // Computing Science Center, University of Geneva, 1997. – № 4.
4. *David McG. Squire, Terry M. Caelli.* Shift, rotation and scale invariant signatures for two-dimensional contours, in a neural networks architectures// In Stephen W. Ellacott, John C. Mason, Iain J. Anderson, editors. Models Algoritms and Applications, Statistics and OR. – Boston, 1995. – № 6.– P. 344–348.
5. *Абраш М.* Таинства программирования графики. – К.: ЕвроСиб, 1996. – 384 с.
6. *Фокс Ф., Пратт М.* Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве. – М.: Мир, 1982.
7. *Шишкин Е.В., Плис А.И.* Кривые поверхности на экране компьютера. Руководство для пользователей. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 1996. – 240 с.
8. *Анисимов В.В., Курганов В.Д., Злобин В.К.* Распознавание и цифровая обработка изображений. – М.: Высш. шк., 1983. – 450 с.

ЛОКТІКОВА Тамара Миколаївна – старший викладач кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського інженерно-технологічного інституту.
Наукові інтереси:
– цифрова обробка зображень та розпізнавання образів.

ОСТРИПСЬКИЙ Євген Анатолійович – інженер СНВП "Промекс".
Наукові інтереси:
– цифрова обробка зображень та розпізнавання образів;
– системи телеуправління.

Подано 8.02.2001