ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

УДК 004.087.4

Ю.Ю. Козіна, канд. техн. наук, Одес. нац. політехн. ун-т

ЗАСТОСУВАННЯ ЦІЛОЧИСЕЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ОБРАЗІВ РЕПЕРНИХ ЗНАКІВ

Ю.Ю. Козіна. **Застосування цілочисельної оптимізації для класифікації образів реперних знаків.** З метою скорочення часу навчання при класифікації образів реперних знаків запропоновано застосувати елементи цілочисельної оптимізації. У випадку неспільності системи нерівностей, що описують побудову поділяючої функції при класифікації, задачу пошуку максимальної спільної підсистеми зведено до задачі цілочисельного програмування. Проведені експерименти підтверджують скорочення часу навчання запропонованого класифікатора в порівнянні з існуючими на базі лінійного програмування. Метод апробований при розв'язанні задачі побудови поділяючої функції для класифікації образів реперних знаків на зображеннях друкованих плат.
Ключові слова: цілочисельна оптимізація, реперний знак, класифікатор, друкована плата.

Ю.Ю. Козина. **Применение целочисленной оптимизации для классификации образов реперных знаков.** В целях сокращения времени обучения при классификации образов реперных знаков предложено применить элементы целочисленной оптимизации. В случае несовместности системы неравенств, описывающих построение разделяющей функции при классификации, задача поиска максимальной совместной подсистемы сведена к задаче целочисленного программирования. Проведенные эксперименты подтверждают сокращение времени обучения предложенного классификатора по сравнению с существующими на базе линейного программирования. Метод апробирован при решении задачи построения разделяющей функции для классификации образов реперных знаков на изображениях печатных плат.
Ключевые слова: целочисленная оптимизация, реперный знак, классификатор, печатная плата.

Yu.Yu. Kozina. **Application of integer optimization for patterns of circuit marks classification**. For decreasing the training time during classification of circuit marks patterns it is suggested to apply elements of integer optimization. In case of incompatibility of inequalities sets describing the construction of separating function during classification, the task of seeking the maximal compatible subsystem is reduced to the task of integer programming. The conducted experiments prove training time decrease of the offered classifier in comparison to the known ones, based on linear programming. The method was tested while solving the task of construction of the separating function for classification of circuit marks patterns on the printed-circuit board images.
Keywords: integer optimization, circuit marks, classifier, printed-circuit board.

На сучасному етапі розвитку мікроелектроніки в умовах дрібносерійного багатономенклатурного виробництва виникло завдання, пов'язане з необхідністю зниження витрат часу на переналагодження устаткування при контролі якості нових видів друкованих плат [1, 2]. Суть контролю якості друкованих плат полягає у виділенні їх дефектів і здійснюється за допомогою позиціювання зображень контрольованої плати та еталонної. Позиціювання здійснюється за реперними знаками (РЗ) — об'єктами відомої форми, які наносяться на поверхню друкованої плати. Образ РЗ формується в результаті обробки зображення друкованої плати та визначення ідентифікаційного вектора ознак РЗ. Виявлено, що до 30 % у загальних витратах часу на переналагодження устаткування при контролі якості нових видів друкованих плат займає навчання класифікатора [3]. Це робить актуальним завданням розробки нового методу побудови поділяючої функції, що дозволить скоротити час навчання при класифікації. Однією з задач, що виникають при розробці методів побудови поділяючої функції та оптимізації деяких моделей алгоритмів розпізнавання, є виділення із системи лінійних нерівностей, що описують побудову поділяючої поверхні, оптимальної спільної підсистеми, яка має задані властивості. Наприклад, максимальної за потужністю або такої, що має максимальну кількість цілих блоків, на які розбиті нерівності вихідної системи і т.д. У зв'язку з цим пропонується використати такий підхід при розробці методу побудови поділяючої функції.

Для випадку лінійно роздільних класів загальний вигляд поділяючої функції представляється як

$$k(\mathbf{x}) = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \ldots + w_n x_n + w_{n+1} = \mathbf{wx} + w_{n+1}, \tag{1}$$

де $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \ldots\ldots w_n)$ — вектор параметрів, що настроюються;

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \ldots\ldots x_n)$ — ідентифікаційний вектор ознак РЗ.

Якщо класи лінійно роздільні, то задача побудови поділяючої функції зводиться до відшукання вектора $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \ldots\ldots w_n)$, для якого справедлива така система нерівностей

$$w_1 x_{i1} + .. + w_n x_{in} \geq w_{n+1}, \qquad i = 1, 2, \ldots.m, \tag{2}$$

де w_{n+1} — визначає зсув поділяючої поверхні відносно початку координат у просторі ознак;

m — кількість образів.

Таким чином, вектор параметрів, що настроюються, $\mathbf{w}$ є розв'язанням системи лінійних нерівностей (2).

У випадку неспільності системи нерівностей (2), тобто неможливості безпомилково розділити область поділяючою поверхнею (ПП), задачу її розв'язання зводять до пошуку максимальної спільної підсистеми (МСП).

Для пошуку МСП використовують відомі твердження [4].

Лема 1. Нехай система (2) має ранг r, $r > 0$. Тоді ранг будь-якої нерозширеної спільної підсистеми системи (2) також дорівнює r.

Визначення 1. Підсистему потужності r та рангу r системи (2) називають r-підсистемою.

Нехай система (2) спільна та має ранг r, відмінний від нуля.

Визначення 2. Розв'язок системи (2) називається вузловим, якщо він перетворює в рівності які-небудь r її нерівностей з лінійно-незалежними лівими частинами.

Визначення 3. Підсистема системи (2) називається вузловою підсистемою, якщо її ранг дорівнює кількості нерівностей у ній та всі вузлові розв'язки задовольняють системі (2).

Доведено таку теорему [5].

Теорема 1. Кожна спільна система лінійних нерівностей виду (2) відмінного від нуля рангу r має хоча б одну вузлову підсистему, а значить хоча б один вузловий розв'язок. При цьому кожна вузлова підсистема є r-підсистемою.

Після наведених визначень розглядається неспільна система (2). З леми 1 і теореми 1 виходить:

Лема 2. Нехай система (2) має ранг r, $r > 0$. Тоді кожна нерозширювана спільна підсистема системи (2) має хоча б одну вузлову r-підсистему.

Тому для виділення всіх нерозширюваних спільних підсистем системи (2) перебираються всі її r-підсистеми. Для кожної з таких підсистем розв'язується задача визначення одного вузлового розв'язку. Для цього всі знаки нерівностей у підсистемі заміняються знаками рівностей і знаходиться один розв'язок отриманої системи лінійних рівнянь. Потім знайдений вузловий розв'язок підставляється в усі нерівності системи (2), при цьому виділяються ті нерівності, яким цей розв'язок задовольняє. Виділені нерівності утворять спільну підсистему — розширення розглянутої r-підсистеми. При цьому справедлива така лема.

Лема 3. Нехай B — r-підсистема системи (2) рангу r, $r > 0$. Якщо $r < n$, то B має множину вузлових розв'язків.

При підстановці будь-якого вузлового розв'язку B в нерівності системи (2) одержують ту саму розширену спільну підсистему. Множина всіх r-підсистем системи (2) позначається через Π. З лем 2 і 3 виходить, що якщо перебирати всі елементи множини Π та описаним способом побудувати їх розширення, то виходить множина W спільних підсистем, серед яких будуть всі нерозширювані спільні підсистеми. Серед них можна вибирати оптимальні підсистеми із влас-

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

тивостями, що цікавлять, наприклад, максимальні за потужністю. Якщо вдається перебрати в реальний час всю множину Π, то одержуємо точний розв'язок задачі. Задача пошуку МСП відноситься до класу NP-повних задач [6]. Із зростанням розмірності задачі час її вирішення зростає експоненціально, що приводить до актуальності розробки методу, який дозволяє розв'язувати подібні задачі великої розмірності в реальний час. Розробка такого методу дозволить скоротити час навчання класифікатора, а отже, і час переналагодження устаткування при контролі якості нових видів друкованих плат.

У тому випадку, якщо відмовитись від знаходження точної МСП і обмежитись наближеною, можна скоротити час перебору. Основна ідея полягає в тому, щоб перебирати не всі можливі підсистеми, а тільки частину з них, опираючись на ті або інші евристики. Пропонується такий варіант евристики, що дозволяє скоротити перебір підсистем [7]. Відповідно до неї в кожну нерівність системи (2), ввводяться невід'ємні еластичні змінні e_i. Це дає можливість змінювати положення гіперплощини до тих пір, поки система не стане спільною. Потім розв'язується задача лінійного програмування (ЛП) щодо мінімізації суми еластичних змінних.

Розв'язком даної оптимізаційної задачі є значення еластичних змінних. У випадку спільності системи нерівностей еластичні змінні приймають нульові значення. У зворотному випадку більші значення змінних відповідають "гіршим" нерівностям у тому розумінні, що гіперплощини, які відповідають їм, доводилось змінювати найбільше для досягнення спільності системи. Логічно припустити, що ці нерівності не будуть входити в МСП. Розглянутий варіант можна назвати алгоритмом α.

На основі викладеної ідеї пропонується такий підхід. Нехай значення еластичних змінних, отриманих у результаті розв'язання задачі ЛП, є ваговою характеристикою кожної нерівності системи (2). Область визначення значень шуканих змінних належить до множини дійсних чисел. Однак для виділення МСП можна скоротити множину при пошуку значень еластичних змінних. Пропонується звести задачу мінімізації суми еластичних змінних до задачі цілочисельного лінійного програмування (ЦЛП) у вигляді

$$z(x) = \min \sum_{i=1}^{m} e_i \,, \tag{3}$$

при обмеженнях

$$\sum_{j=1}^{n} w_j x_{ij} + e_i \geq w_{n+1} \quad i = \overline{1,m} \,, \tag{4}$$

$$e_i \geq 0 \quad i = \overline{1,m} \,, \tag{5}$$

$$e_i - \text{ціле} \quad i = \overline{1,m} \,. \tag{6}$$

Для розв'язання задач ЦЛП у постановці (3)...(6), як правило, використовують один з комбінаторних методів гілок та меж [8]. Основу цього методу становлять два моменти: отримання оцінок підмножин та розгалуження, що дозволяють у ряді випадків істотно зменшити обсяг перебору. Для організації процедури отримання оцінок та розгалуження запропоновано використати розроблену модифікацію методу гілок та меж [9]. Дана модифікація дозволила підвищити швидкість отримання оцінок підмножин, що в цілому прискорило отримання оптимального розв'язку. Організація процедури розгалуження дозволила врахувати непогодженості в системі обмежень, відносний розкид коефіцієнтів цільової функції, а також величину умовної одиниці змінних, які є претендентами на чергову конкретизацію.

Дана модифікація методу гілок та меж використана для знаходження МСП на базі введення еластичних змінних. Нехай запропонований підхід буде алгоритмом β. На його основі проведена порівняльна оцінка часу розв'язання задачі пошуку МСП за допомогою введення еластичних змінних і з використанням алгоритмів α і β (рис. 1). Для кожної розмірності згенеровано по 15 задач. Швидкості збіжності, наведені на рисунку 1, є середніми значеннями. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок про можливості скорочення витрат часу t при пошуку МСП із використанням алгоритму β у середньому до 26 %.

На підставі викладеного розроблено метод побудови поділяючої функції. При побудові поділяючої функції використано підхід на основі виділення МСП системи (2). Для реалізації методу виконуються такі кроки:

— у кожну нерівність системи (2) вводяться еластичні змінні e_i;

— розв'язується задача ЦЛП щодо еластичних змінних у постановці (3)...(6) на основі запропонованої модифікації методу гілок та меж;

— виконується пошук МСП на основі отриманих значень еластичних змінних;

— визначаються параметри вектора $\mathbf{w}$.

З метою дослідження оперативності розробленого методу запропоновано побудувати поділяючу функцію для двох класів РЗ A_1 і A_2 в режимі навчання (рис. 2). При цьому використаний набір ознак $a_j(x_1, x_2)$, отриманих у результаті реалізації процедури ідентифікації [10].

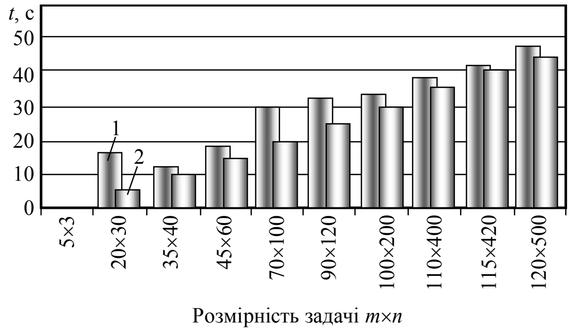

Рис. 1. Оцінка витрат часу при пошуку МСП: 1 — алгоритм α, 2 — алгоритм β

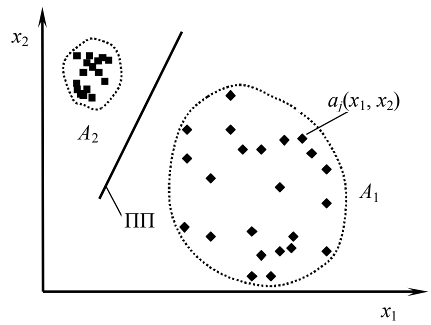

Рис. 2. Розподіл класів A_1 і A_2 у режимі навчання

Експериментально показано, що в результаті застосування розробленого методу скоротився час навчання класифікатора в 1,6 разу в порівнянні з існуючим на базі лінійного програмування. При цьому вірогідність класифікації склала 0,85.

Отже, застосування розробленого методу побудови поділяючої функції дозволило скоротити час навчання класифікатора в 1,6 разу в порівнянні з існуючим на базі лінійного програмування. При цьому отримано досить високий результат класифікації — 0,85. Використання даного класифікатора при переналагодженні устаткування для контролю нових видів друкованих плат дозволило скоротити витрати часу на цю процедуру до 1,4 разу, що в кінцевому підсумку дозволило підвищити продуктивність контролю. Розроблений метод може бути рекомендований для використання в комп'ютерних системах відеоспостереження, виявлення об'єктів заданої форми та інших, у яких необхідно підвищувати оперативність на етапі навчання.

Література

1. Андреянов, С. Миниатюрней, быстрее, качественнее / С. Андреянов // Технологии в электрон. пром-сти. — 2009. — № 3. — С. 42 — 43.
2. Грачев, А.А. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры / А.А. Грачев, А.А. Мельник, Л.И. Панов // Одес. нац. юрид. ак. — Одесса, 2003. — 427 с.
3. Гаршин, В. Автомат установки компонентов Topaz-X(i)||, сочетание производительности и гибкости / В. Гаршин, А. Нисан // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2004. — № 7. — С. 64 — 67.
4. Катериночкина, Н.Н. Методы выделения оптимальной совместной подсистемы системы линейных неравенств / Н.Н. Катериночкина // Мат. методы распознавания образов. — 2003. — Вып. № 11. — С. 122 — 125.

ISSN 2076-2429 (print)
ISSN 2223-3814 (on line)

5. Черников, С.Н. Линейные неравенства / С.Н. Черников.— М.: Наука, 1968. — 488 с.
6. Sankaran, J.K. A note on resolving infeasibility in linear programs by constraint relaxation / J.K Sankaran // Operations Research Letters. — 1993. — № 13. — P. 19 — 20.
7. Chinneck, J.W. An effective polynomial-time heuristic for the minimum-cordinality IIS set-covering problem / J.W. Chinneck // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. — 1996. — № 17. — P. 127 — 144.
8. Корбут, А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. — М.: Наука, 1969. — 368 с.
9. Юхименко, Б.И. Сравнительная характеристика алгоритмов метода ветвей и границ для решения задач целочисленного линейного программирования / Б.И. Юхименко, Ю.Ю. Козина // Тр. Одес. политехн. ун-та. — 2005. — Вып. 2(24). — С. 199 — 204.
10. Крылов, В.Н. Позиционирование изображений фотошаблонов в системах автоматизированного оптического контроля / В.Н. Крылов, Г.Ю. Щербакова, Ю.Ю. Козина // Технология и конструирование в электрон. аппаратуре. — 2007. — № 3 (69) . — С. 61 — 64.

References

1. Andreyanov, S. Miniatyurney, bystreet, kachestvennee [Smaller, Faster, Better] / S. Andreyanov // Technologies in Electronic Industry. — 2009. — # 3. — pp. 42 — 43.
2. Grachev, A.A. Poverkhnostnyy montazh pri konstruirovanii i proizvodstve elektronny apparatury [SMT in the Design and Manufacture of Electronic Equipment] / A.A. Grachev, A.A. Melnik, L.I. Panov; Odes. national law academy. — Odessa, 2003. — 427 p.
3. Garshin, V. Avtomat ustanovki komponentov Topaz-X(i)‖ , sochetanie proizvoditel'nosti i gibkosti [An Automaton for Installing the Components Topaz-X (i)‖, the Combination of Performance and Flexibility] / V. Garshin, A. Nesan // Electronics: Science, Technology, Business.— 2004. — # 7. — pp. 64 — 67.
4. Katerinochkina, N.N. Metody vydeleniya optimal'noy sovmestnoy podsistemy lineynykh neravenstv [Methods for Selection of Optimal Joint Subsystem of Linear Inequalities System] / N.N. Katerinochkina // Math. methods of patterns recognition. — 2003. — Iss. # 11. — pp. 122 — 125.
5. Chernikov, S.N. Lineynye neravenstva [Linear Inequalities] / S.N. Chernikov.— Moscow, 1968. — 488 p.
6. Sankaran, J.K. A Note on Resolving Infeasibility in Linear Programs by Constraint Relaxation / J.K Sankaran // Operations Research Letters. — 1993. — #13. — pp. 19 — 20.
7. Chinneck, J.W. An Effective Polynomial-Time Heuristic for the Minimum-Cardinality IIS Set-Covering Problem / J.W. Chinneck // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. — 1996. — # 17. — pp. 127 — 144.
8. Korbut, A.A. Diskretnoe programmirovanie [Discrete Programming] / A.A. Korbut, Yu.Yu. Finkelshteyn. — Moscow, 1969. — 368 p.
9. Yukhimenko, B.I. Sravnitel'naya kharakteristika algoritmov metoda vetvey I graniz dlya resheniya zadach tselochislennogo lineynogo programmirovaniya [Comparative Characteristic of Algorithms for Branch and Bound Method for Solving Integer Linear Programming Problems] / B.I. Yukhimenko, Yu.Yu. Kozina // Proc. Odes. polytech. univ. — 2005. — Iss. 2 (24). — pp. 199 — 204.
10. Krylov, V.N. Pozitsionirovanie izobrazheniy fotoshablonov v sistemakh avtomatizirovannogo opticheskogo kontrolya [Positioning Photomask Images in the Systems of Automated Optical Control] / V.N. Krylov, G.Yu. Shcherbakova, Yu.Yu. Kozina // Technology and Design in the Electron. Equipment. —2007. — # 3 (69). — pp. 61 — 64.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-ту Макрицький В.А.

Надійшла до редакції 29 листопада 2011 р.