

Харківський національний університет радіоелектроніки

Передрій Олена Олегівна

УДК 004.932:007.52

**НОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЕКТИВНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ЗОБРАЖЕНЬ
МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ ВПЛИВУ ПЕРСПЕКТИВИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Путятін Євген Петрович,
Харківський національний університет
радіоелектроніки,
завідувач кафедри інформатики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Красовський Григорій Якович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»,
професор кафедри виробництва радіоелектронних
систем літальних апаратів;

доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Ситнік Олег Вікторович,
Інститут радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова,
старший науковий співробітник відділу
радіофізичної інтроскопії

Захист відбудеться « 8 » листопада 2011 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий « 7 » жовтня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Безкоровайний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема створення математичних моделей для аналізу та обробки зображень у системах комп'ютерного зору є актуальною у зв'язку із впровадженням систем відеоспостереження, ідентифікації та автоматичної обробки візуальної інформації. Аналіз цифрових зображень використовується в робототехніці (конвеєрні системи, аналіз якості продукції), при обробці космічних знімків, у медицині, при пошуку відеоданих в Інтернет, в системах ідентифікації та супроводі об'єктів. Значний внесок у розвиток математичних методів обробки зображень внесли С.Г. Антощук, О.М. Ахметшин, Р.А. Воробель, В.В. Грицик, В.П. Кожем'яко, В.П. Машталір, Є.П. Путятін, Б.П. Русин, І.Б. Сіроджа, Ю.П. Шабанов–Кушнаренко, М.І. Шлезінгер, R.O. Duda, D.A. Forsyth, R.C. Gonzales, W.K. Pratt, L.G. Shapiro, T. Suk, J. Flusser, R.I. Hartley, C. Hann, а також інші вчені.

Зорова система сприйняття людини найбільш близька до проективної математичної моделі подання перетворень зображення. Системи комп'ютерного зору в більшості прикладних завдань орієнтовані на порівняння зображень, що найчастіше стає нелегким через нерівнозначні умови, у яких перебувають відео-об'єкти при формуванні цих зображень. Одним із методів приведення зображення до еталонного вигляду є нормалізація. Автоматична нормалізація значно зменшує трудомісткість вирішення задачі розпізнавання оператором або комп'ютерною системою. Однак існуючі методи нормалізації проективних перетворень усе ще характеризуються досить значною обчислювальною складністю. Однією із причин цього є обмеженість традиційних підходів: застосовується трудомісткий кореляційний аналіз, пов'язаний із перебором значень параметрів, або складний аналіз просторових співвідношень у вигляді геометрично зв'язаних систем характерних точок.

Розробка нових методів нормалізації проективних перетворень залишається актуальним напрямком досліджень задля спрощення аналізу та скорочення обчислювальних витрат.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ) у рамках державних бюджетних тем № ДР0107U003029 «Дослідження та розробка методів і моделей інтерпретації даних у системах комп'ютерного зору», № ДР0110U002636 «Моделі і методи грануляції та інтерпретації багатовимірних даних». У рамках цих тем автором як виконавцем запропоновані й досліджені методи та моделі нормалізації проективних перетворень на основі компенсації впливу перспективи.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та аналіз моделей і методів компенсації впливу перспективних викривлень при нормалізації проективних перетворень зображень у системах комп'ютерного зору. Для досягнення цієї мети в рамках дисертаційних досліджень сформульовані такі завдання:

- виконати аналіз відомих методів нормалізації проєктивних і перспективних перетворень як їхніх складових;
- синтезувати критерій для ідентифікації і оцінки напрямку перетворень перспективи;
- розробити метод нормалізації перспективних перетворень на основі критерію визначення напрямку і скороченого кореляційного аналізу в просторі перетворень;
- розробити метод послідовної нормалізації проєктивних перетворень зображень, використовуючи розкладання проєктивної групи на композицію афінних і перспективних перетворень;
- узагальнити модель нормалізації слідкуючого типу на основі функціоналів яскравості зображення для групи двопараметричних перспективних викривлень;
- дослідити можливості методів нормалізації проєктивних перетворень із використанням афінних інваріантних ознак або описів;
- реалізувати комп'ютерні моделі запропонованих методів нормалізації для оцінки якості роботи, дослідження впливу параметрів і виявлення особливостей практичної реалізації.

Об'єкт дослідження – процеси сприйняття, перетворення та інтерпретації зображень у системах комп'ютерного зору.

Предмет дослідження – математичні моделі і методи нормалізації проєктивних та перспективних перетворень зображень.

Методи дослідження: аналітичні методи нормалізації і обробки зображень для узагальнення критерію присутності проєктивних перетворень, елементи функціонального аналізу і теорії груп для синтезу критерію визначення напрямку перспективи, статистичний аналіз, імітаційне моделювання, спираючись на які, проведено систематизацію даних для практичних та теоретичних висновків.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вирішенні задачі нормалізації зображень під дією проєктивних перетворень шляхом компенсації викривлень перспективи для скорочення обчислювальних витрат при впровадженні у прикладних системах. Внаслідок теоретичних і експериментальних досліджень отримані такі результати:

- уперше запропоновано критерій оцінки напрямку однопараметричних перспективних перетворень на базі проєкцій зображення, аналіз значень якого дає можливість визначити напрямок перетворень і знак параметра нормалізації;
- уперше запропоновано метод компенсації впливу перспективи на основі застосування критерію оцінки напрямку перетворень перспективи та кореляційного аналізу, що значно зменшує час нормалізації;
- одержав подальший розвиток кореляційний метод нормалізації слідкуючого типу на основі обчислення функціоналів, що враховують перерозподіл яскравості зображення внаслідок дії проєктивних перетворень, що, на відміну від існуючого методу, дає можливість виконувати нормалізацію перспективи вздовж довільної прямої;
- одержала подальший розвиток модель послідовної нормалізації для

проективної групи перетворень, що заснована на застосуванні інваріантного до афінної групи відображення структурного або інтегрального типу та нормалізаторі для перспективи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці методів і математичних моделей нормалізації перспективи для компенсації проєктивних перетворень зображень при вирішенні прикладних завдань комп'ютерного зору. Створено ряд комп'ютерних моделей, що дають можливість досліджувати запропоновані методи, проводити їхнє тестування й удосконалення.

Результати досліджень знайшли застосування при розробці програмного продукту, що використовується в системі відеоспостереження для виділення номерних знаків автомобілів (ТОВ «Еліта промсервіс», м. Харків, акт від 31.03.2010). Відмінною рисою розробки є можливість функціонування в умовах проєктивних перетворень.

На базі запропонованого методу нормалізації побудовано комп'ютерну модель для обробки мікроскопічних зображень для проведення автоматичного аналізу і вимірювання розміру об'єктів субстанції лікарського препарату для оцінки їх кількісного вмісту в суміші (акт від 05.07.2010, ТОВ «Фарма Старт», м. Київ).

Наукові результати дисертаційних досліджень впроваджено в ДП «СЕПРОЦЕМ» (м. Харків) для вирішення проблеми оцінки напрямку перетворень для поліпшення якості сегментації зображень при вирішенні прикладного завдання визначення масової частки гранульованих шлаків у зразках цементу (акт від 30.09.2010).

Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи знайшли застосування у навчальному процесі при проведенні і методичному забезпеченні лабораторних занять та курсового проєктування з дисципліни «Комп'ютерний зір», яка викладається у Харківському національному університеті радіоелектроніки (акт від 13.09.2010).

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертаційної роботи, які виносяться на захист, основні результати теоретичних і експериментальних досліджень отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: у [1] – розроблено метод нормалізації проєктивних перетворень на основі складного відношення та кореляції, наведено результати експериментальних досліджень для зображень номерних знаків; у [2] – запропоновано процедуру порівняння зображень у вигляді множини фрагментів в умовах геометричних перетворень на основі інваріантних структурних описів, проведено експериментальний аналіз завадостійкості; у [3] – запропоновано кореляційний метод нормалізації слідкуючого типу для перспективи на основі обчислення функціоналів, що враховують перерозподіл яскравості зображення внаслідок дії проєктивних перетворень, наведено експериментальні дослідження; у [4] – запропоновано метод оцінки параметрів мікроскопічних зображень в умовах викривлень; у [11] – запропоновано використання системи проєкцій при розпізнаванні проєктивно перетворених зображень; у [12] – запропоновано критерій для оцінки напрямку

однопараметричних перспективних перетворень на базі проєкцій зображення, а також інваріантні ознаки для розпізнавання; у [13] – запропоновано критерій визначення виду групи перетворення зображення; у [15] – проведено дослідження статистичних особливостей при застосуванні критерію ідентифікації перспективних перекучувань.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи обговорено на конференціях: на 10-му, 11-му, 12-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті» (Харків, 2006, 2007, 2008), 9-й, 10-й Всеукраїнських (IV–V Міжнародних) студентських наукових конференціях з прикладної математики та інформатики СНКПМІ (Львів, 2006, 2007), Міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» ISDMCI-2008 (Євпаторія, 2008), 14-й Міжнародній конференції по обробці знань KDS'08 (Варна, Болгарія, 2008), III Міжнародному Радіоелектронному Форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку» МРФ-2008 (Харків, 2008).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, у тому числі у 5 статтях у виданнях, які входять до переліків, що затверджені ВАК України, і в 10 публікаціях у матеріалах і тезах доповідей міжнародних наукових конференцій, з них 1 за кордоном.

Структура дисертації. Дисертація викладена на 142 сторінках, складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, 48 рисунків (10 стор.), 7 таблиць (3 стор.), 2 додатків (8 стор.) та списку використаних джерел зі 121 найменування (13 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, розкрито наукову та практичну цінність отриманих результатів, наведено відомості щодо публікацій, апробації роботи та особистого внеску здобувача.

У **першому розділі** виконано аналіз стану проблеми нормалізації зображень під дією проєктивних перетворень. Розглянуто основні математичні моделі геометричних викривлень лінійного та нелінійного типу; показано, що саме присутність нелінійних перспективних викривлень значним чином ускладнює вирішення задачі нормалізації, що полягає у знаходженні параметрів викривлень та компенсації їх впливу.

Проаналізовано існуючі методи для нормалізації проєктивних викривлень. Показано, що більшість із них не можуть бути впроваджені в реальних умовах внаслідок суттєвої складності обчислень. Разом із тим відомо, що група дії проєктивних викривлень може бути розкладена на афінну та перспективну групи. У свою чергу, двопараметричні перетворення перспективи можуть бути представлені у вигляді двох послідовних однопараметричних перетворень.

Проєктивну модель викривлень можна описати у вигляді

$$\Pi = A \cdot P(h),$$

$$\text{де } A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – матриця параметрів афінної групи;}$$

$$P(h) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ h \sin \phi & h \cos \phi & 1 \end{pmatrix} \text{ – матриця перспективних перетворень; } \phi \text{ – кут нахилу}$$

лінії перспективних викривлень; $h = \operatorname{tg} \omega$; ω – кут між площиною перетворення та віссю спостереження; $\alpha = h \sin \phi$, $\beta = h \cos \phi$ – параметри перспективних викривлень.

Внаслідок проведеного аналізу зроблено висновок щодо актуальності досліджень, пов'язаних із синтезом нормалізаторів проєктивної групи зображень, та сформульовано основні завдання дисертаційного дослідження.

Основні результати розділу опубліковані в [3, 5, 14].

Другий розділ присвячено нормалізації перспективних викривлень із застосуванням запропонованого критерію визначення напрямку перетворення перспективи та кореляційного підходу. Відомо, що сумісну дію афінних та перспективних викривлень, які складають проєктивну групу, можна розділити для послідовної обробки. Двопараметричні перспективні перетворення також розкладаються у послідовність однопараметричних. Нормалізація однопараметричних перетворень перспективи дає змогу усунути фактор нелінійного впливу проєктивної групи при умові відсутності інших нелінійних викривлень.

Розглянемо математичну модель дії однопараметричних перспективних перетворень, які спотворюють зображення вздовж однієї з осей координат:

$$\begin{cases} x' = \frac{x}{\alpha x + 1}, \\ y' = \frac{y}{\alpha x + 1}; \end{cases} \quad \begin{cases} x' = \frac{x}{\beta y + 1}, \\ y' = \frac{y}{\beta y + 1}, \end{cases} \quad (1)$$

де x , y – координати вихідного зображення; x' , y' – координати викривленого зображення.

У дисертаційній роботі запропоновано таку модель для обчислення ознак:

$$o_1 = \frac{S_x}{S_x + S_y}, \quad o_2 = \frac{S_y}{S_x + S_y}, \quad (2)$$

де $S_x = \sum_{(x,y) \in I_B} x$; $S_y = \sum_{(x,y) \in I_B} y$; $(x, y) \in I_B$; I_B – множина координат носія

об'єкта в полі зору (точки, що належать об'єкту). Дослідження впливу перспективи на величини (2) дали змогу запропонувати критерій для оцінки напрямку однопараметричних перспективних викривлень на основі функціоналів

$$ot_1 = o_1^{et} - o_1, \quad ot_2 = o_2^{et} - o_2, \quad (3)$$

де індекс «et» відповідає застосуванню виразів (2) до еталонного зображення (відсутність індексу означає викривлене зображення).

Множину допустимих значень параметрів перспективи α, β можна сформулювати у вигляді ситуацій:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha > 0, \\ \beta = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha < 0, \\ \beta = 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0, \\ \beta > 0; \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 0, \\ \beta < 0. \end{array} \right.$$

Експериментально визначено, що аналіз значень (3) дає можливість скоротити множину можливих варіантів удвічі, залишивши дві ситуації, де один з параметрів дорівнює 0, а інший має протилежний знак (наприклад, комбінації $\alpha > 0, \beta = 0$ та $\alpha = 0, \beta < 0$). Визначення конкретної ситуації може бути виконано на базі аналізу проєкцій зображення та визначення тієї з них, викривлення якої менше. Формальним критерієм визначення ступеня викривлення проєкцій можуть бути ознаки центрів тяжіння

$$x_0 = \frac{\sum pR(p, 0)}{\sum R(p, 0)}, \quad y_{\pi/2} = \frac{\sum pR(p, \pi/2)}{\sum R(p, \pi/2)}, \quad (4)$$

де x_0 – функціональна ознака перетворення перспективи вздовж горизонтальної осі; $y_{\pi/2}$ – функціональна ознака перетворення перспективи вздовж вертикальної осі; $R(p, \theta) = \iint B(x, y)\delta(p - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy$ – перетворення Радона; p – відстань від центру координат до лінії паралельного проєктування; θ – кут інтегрування; δ – дельта-функція.

Виконання умови

$$\tau > 0, \quad (5)$$

де $\tau = \frac{|x_0^{et} - x_0|}{|x_0^{et}|} - \frac{|y_{\pi/2}^{et} - y_{\pi/2}|}{|y_{\pi/2}^{et}|}$, дає змогу стверджувати про горизонтальний

напрямок перспективних викривлень, інакше напрямок вважається вертикальним ($\tau < 0$). При $\tau \approx 0$ вважається, що викривлення перспективи взагалі відсутні.

Вирази (2)–(5) описують критерій для оцінки напрямку однопараметричних викривлень перспективи, яка дає можливість визначити знак параметра нормалізації та напрямок викривлень.

Розроблений критерій покладено в основу методу компенсації впливу перспективи при проєктивних викривленнях із застосуванням кореляційного аналізу, який може бути викладено такими етапами.

1. Обчислення та аналіз знаків значень (3) при фіксованому розташуванні точки відліку (0,0).

2. Знаходження напрямку викривлень за допомогою критерію (5).

3. Визначення параметру перспективного викривлення вздовж знайденого напрямку шляхом одновимірного кореляційного аналізу для скороченого вдвічі простору значень параметру.

Перевагою методу є суттєве скорочення часу нормалізації у порівнянні із традиційним способом, застосування якого необхідно було б виконувати для усіх можливих додатних та від'ємних значень обох параметрів α, β перспективи.

Спираючись на властивості розглянутих критеріїв, можна запропонувати модифікацію методу компенсації перспективи для ситуації відсутності апріорної інформації про еталон. Етапи модифікованого методу запишемо таким чином:

1. Обчислення значень $ot_1 = 0.5 - o_1$, $ot_2 = 0.5 - o_2$ для вхідного зображення на базі (2).

2. Скорочення простору можливих станів удвічі на основі аналізу знаків (3).

3. Знаходження напрямку викривлень за допомогою критерію (5). При цьому центри тяжіння проєкцій еталону встановлюються в деякі константні значення для забезпечення процедури порівняння.

4. Кореляційний перебір значень параметра перспективи вздовж знайденого напрямку. Критерієм зупинки у разі відсутності еталону може бути виконання умови $|o_1 - o_2| < \varepsilon$ для викривленого зображення.

Розділ містить окремі аспекти обґрунтування процесу використання запропонованих критеріїв та методів, а також результати практичних досліджень з оцінки впливу перетворень (1) на ознаки (2). Наведено приклади застосування методів на тестових наборах зображень.

Основні результати розділу опубліковані в [3–5, 11–13].

У третьому розділі запропоновано модифікацію кореляційного методу нормалізації слідкуючого типу для перспективи на основі функціоналів, що враховують перерозподіл яскравості зображення внаслідок дії двопараметричних проєктивних перетворень, а також одержала подальший розвиток модель послідовної нормалізації для проєктивної групи перетворень, що заснована на застосуванні інваріантного до афінної групи відображення структурного або інтегрального типу та нормалізаторі для перспективи.

Розглянемо характер зміни функції яскравості зображення при перетворенні перспективи. Кожна точка зображення при перспективному перетворенні змінюється таким чином:

$$x' = \frac{x}{\alpha x + \beta y + 1}; \quad y' = \frac{y}{\alpha x + \beta y + 1}. \quad (6)$$

Нехай $dP = \begin{vmatrix} \frac{\partial x'}{\partial x} & \frac{\partial x'}{\partial y} \\ \frac{\partial y'}{\partial x} & \frac{\partial y'}{\partial y} \end{vmatrix}$. Визначник $\det(dP)$ дає інформацію відносно того, як

викривлюються координати точки, в свою чергу $|\det(dP)|$ відображає коефіцієнт стиснення точки

$$\det(dP) = \frac{1}{(\alpha x + \beta y + 1)^3}. \quad (7)$$

Тоді, якщо вхідне зображення B та еталонне B_0 відрізняються перетворенням перспективи, інтегрування у полі зору для $B(x, y)$ дає

$$\iint_D B(x, y) dx dy = \iint_D \frac{B_0(x, y) dx dy}{|(\alpha x + \beta y + 1)^3|}. \quad (8)$$

Якщо $\det(dP) = 1$, можна вважати, що перетворення перспективи відсутні, а зображення викривлене лише дією афінних перетворень.

Розглянемо для обох зображень відношення E_B/S , де функціонал $E_B = \iint_D B(x, y) dx dy$ відображає енергію зображення $B(x, y)$, а $S = \iint_D \gamma(B(x, y)) dx dy$ – площу $B(x, y)$, де $\gamma(B(x, y)) = 1$, якщо (x, y) є точкою об'єкта, і $\gamma(B(x, y)) = 0$ інакше. Фактично функція γ формує множину координат I_B для (2). Аналогічним чином визначимо функціонали для еталона $B_0(x, y)$: $E_{B_0} = \iint_D B_0(x, y) dx dy$, $S_0 = \iint_D \gamma(B_0(x, y)) dx dy$.

Функціонал для визначення наявності перетворення перспективи на проективно викривленому зображенні запишемо у вигляді

$$\Phi_1 = S E_{B_0} - S_0 E_B \quad (9)$$

за умов $E_{B_0} \neq 0$, $E_B \neq 0$, які автоматично досягаються для напівтонових зображень та потребують модифікації для бінарних.

Згідно (8) також можна сформулювати функціонал, який показує наявність викривлень перспективи,

$$\Phi_2 = E_B - \iint_D \frac{B_0(x, y) dx dy}{|(\alpha x + \beta y + 1)^3|}. \quad (10)$$

Об'єднуючи (9) та (10), запишемо спільний критерій відсутності на зображенні викривлень перспективи

$$\Phi_1 \Phi_2 < \varepsilon. \quad (11)$$

Критерій (11) дає змогу синтезувати такий кореляційний метод нормалізації

слідкуючого типу:

1. Обираємо первинні значення для α , β .

2. Обчислюємо значення (11). Для спрощення процедури нормалізації та її пришвидшення можна використовувати одне із значень (9) або (10).

3. Якщо рівність (11) не виконана, змінюємо значення параметрів (одного чи обох) α , β на кроки $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ та переходимо до п.2, інакше α , β вважаємо шуканими параметрами нормалізації.

4. Виконуємо послідовну нормалізацію перспективних та афінних викривлень зображення.

Запропоновано також підхід до побудови нормалізаторів проективної групи із застосуванням розкладання в афінно-перспективну комбінації та застосуванні афінних інваріантних ознак. Еталонне зображення $B_0(x, y)$ можна записати у вигляді набору інваріантних ознак $\chi = [\chi_1, \dots, \chi_v]$, де v – кількість обчислених інваріантів, $\chi_k \in \mathbb{R}^1$, $k = \overline{1, v}$. Перевагою ознак χ_k є стійкість до дії завад флуктуаційного типу. Використовуючи χ_k , можна незалежно від викривлень афінного типу звести задачу до нормалізації перспективи. Загалом запропонований підхід описується у вигляді таких етапів:

1. Обчислюємо інваріантні ознаки χ^{et} для еталона та інваріантні ознаки χ для вхідного зображення.

2. Перевіряємо відповідність (еквівалентність) χ та χ^{et} , наприклад, шляхом оцінки їх відхилення із застосуванням метрики ρ для числових векторів. Збереження афінної інваріантності, котра перевіряється у вигляді виконання умови $\rho(\chi, \chi^{et}) \leq \varepsilon$ (ε – поріг еквівалентності), підтверджує, що зображення було викривлене тільки афінною групою. Протилежна ситуація (тобто невиконання умови $\rho(\chi, \chi^{et}) \leq \varepsilon$) є сигналом присутності перспективних викривлень, які необхідно нормалізувати.

3. Виконуємо нормалізацію перспективних викривлень шляхом застосування розробленого кореляційного методу нормалізації слідкуючого типу для перспективи із параметрами α, β та кроками $\Delta\alpha, \Delta\beta$, досягаючи близькості до нуля відповідного оцінюючого функціоналу. Будуємо інваріантні до афінних перетворень ознаки для зміненого зображення та перевіряємо умову згідно із п.2. Якщо умова виконана, нормалізацію перспективи завершено.

Розглянемо приклад роботи запропонованого методу (рис. 1). Еталонне зображення (рис. 1 а) викривлене параметрами масштабування $\lambda = 1.5$, $\mu = 1$ та повороту $\theta = 34^\circ$ (рис. 1 б). Далі додано перспективні викривлення вздовж горизонтальної осі із параметрами $\alpha = 0.03$, $\beta = 0$ (рис. 1 в). Допустиме відхилення від еталону встановлене як 20% абсолютного значення еталонних інваріантів від вхідних згідно із манхеттенською метрикою. Рис. 1 г демонструє результат нормалізації перспективи.

Розглянемо просторові інваріанти афінної групи як коефіцієнти ξ, η представлення координат у афінному базисі:

$$\begin{cases} x_4 = \xi(x_3 - x_1) + \eta(x_2 - x_1) + x_1; \\ y_4 = \xi(y_3 - y_1) + \eta(y_2 - y_1) + y_1, \end{cases} \quad (12)$$

де $(x_i, y_i)_{i=1}^4$ – чотири точки зображення (точки базису (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3)) повинні бути неколінеарними).

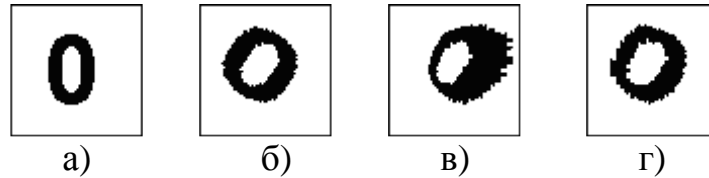


Рис. 1. Нормалізація перспективи: а – еталонне зображення; б – зображення, викривлене афінними перетвореннями; в – зображення викривлене проєктивними перетвореннями; г – зображення після нормалізації перетворень перспективи

Використовуючи інваріантні ознаки характерних точок зображення у вигляді множини Ω векторів $\omega = (\xi, \eta)$, $\omega \in \Omega$ на базі виразу (12) можна побудувати набори інваріантних ознак шляхом аналізу підмножин точок структурного опису. Як приклад можуть бути використані функціонали, що відображають інтегральні властивості опису як вектора $\omega_\Sigma = (\sum \xi, \sum \eta)$, компонентами якого є суми інваріантів. Іншими способами є обчислення, наприклад, максимального або мінімального значення функції, що задана на множині $\{\xi, \eta\}$. Метод нормалізації на основі структурних описів $\{\xi, \eta\}$ опишемо таким чином:

1. Обчислюємо інваріантні ознаки еталона $\{\omega^{et}\}$ та вхідного зображення $\{\omega\}$.

2. Перевіряємо еквівалентність множин $\{\omega\}$ і $\{\omega^{et}\}$, наприклад, шляхом пошуку відповідних значень та підрахунку їх кількості. Збереження афінної інваріантності, яке перевіряється у вигляді виконання умови $\rho(\{\omega\}, \{\omega^{et}\}) \leq \epsilon$, підтверджує, що зображення викривлене виключно афінною групою. Зворотна ситуація дає можливість стверджувати про наявність викривлень перспективи та необхідність їх нормалізації.

3. Виконуємо нормалізацію перспективних викривлень шляхом застосування розробленого кореляційного методу слідкуючого типу для перспективи із параметрами α, β . Будуємо інваріантні до афінних перетворень ознаки для зміненого зображення та перевіряємо умову згідно із п.2. Якщо умову виконано, нормалізацію перспективи завершено.

Рис. 2 демонструє приклад нормалізації за чотирма характерними ознаками у вигляді кутів об'єкта на зображенні. Знайдені значення параметрів склали $\alpha = -0.0255$, $\beta = 0.01107$, нормалізоване зображення наведено на рис. 2 в, апріорно задані параметри: $\alpha = -0.02$, $\beta = 0.01$.

Основні результати розділу опубліковані в [2, 3, 8, 10, 11, 13–15].

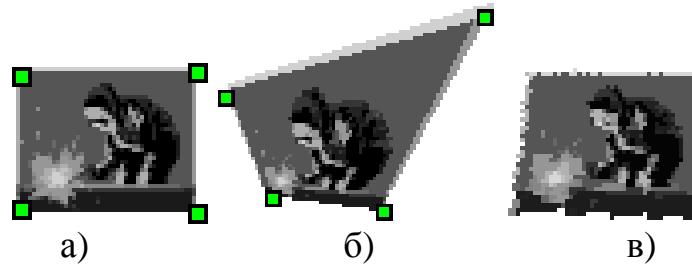


Рис. 2. Приклад нормалізації за чотирма інваріантними точками: а – еталон; б – викривлене зображення; в – нормалізоване зображення

Четвертий розділ присвячено дослідженням якісних характеристик розроблених методів нормалізації перспективних та проєктивних викривлень. Показано, що запропоновані методи мають перевагу у швидкодії порівняно із традиційними. Наведено результати впровадження розроблених методів та моделей при розв'язанні конкретних прикладних задач, що пов'язані із оцінкою місця розташування автомобільного номеру, аналізом мікроскопічних відео-об'єктів, а також при розв'язанні задачі визначення масової долі гранульованого шлаку в цементі для визначення якості будівельного матеріалу. Особливість аналізу мікробіологічних та гранульованих зображень полягає в тому, що геометричні перетворення відео-об'єктів потребують використання моделі перспективних викривлень. Виконано комп'ютерне моделювання методів визначення напрямку перспективних викривлень зображень вздовж довільної прямої із застосуванням аналізу змін центрів тяжіння та одновимірних моментних ознак на основі проєкцій.

Дослідження ефективності запропонованих методів було виконано на тестових зображеннях (рис. 3).

У табл. 1 наведено числові дані експериментів щодо частоти вірного оцінювання напрямку із використанням (5). Як бачимо, зростання кількості еталонів впливає на ефективність критерію.

Таблиця 1

Частота вірного оцінювання напрямку із використанням (5)

База еталонів	Розмір еталону	Кількість еталонів	Кількість експериментів	Частота
Геральдичні символи	64x64	18	7200	0,846
Цифри	64x64	10	4000	0,9575
Ієрогліфи	56x56	30	12000	0,7501
Дорожні знаки	150x150	37	14800	0,937

Виконано експериментальну оцінку швидкодії запропонованих методів на прикладі зображень дорожніх знаків. Вирази для оцінки числа операцій отримано внаслідок агрегації етапів для кожного із методів. Комп'ютерну реалізацію проведено із використанням двопроцесорного комп'ютера із тактовою частотою 2,66 GHz на ядро та обсягом оперативної пам'яті 2 GB.

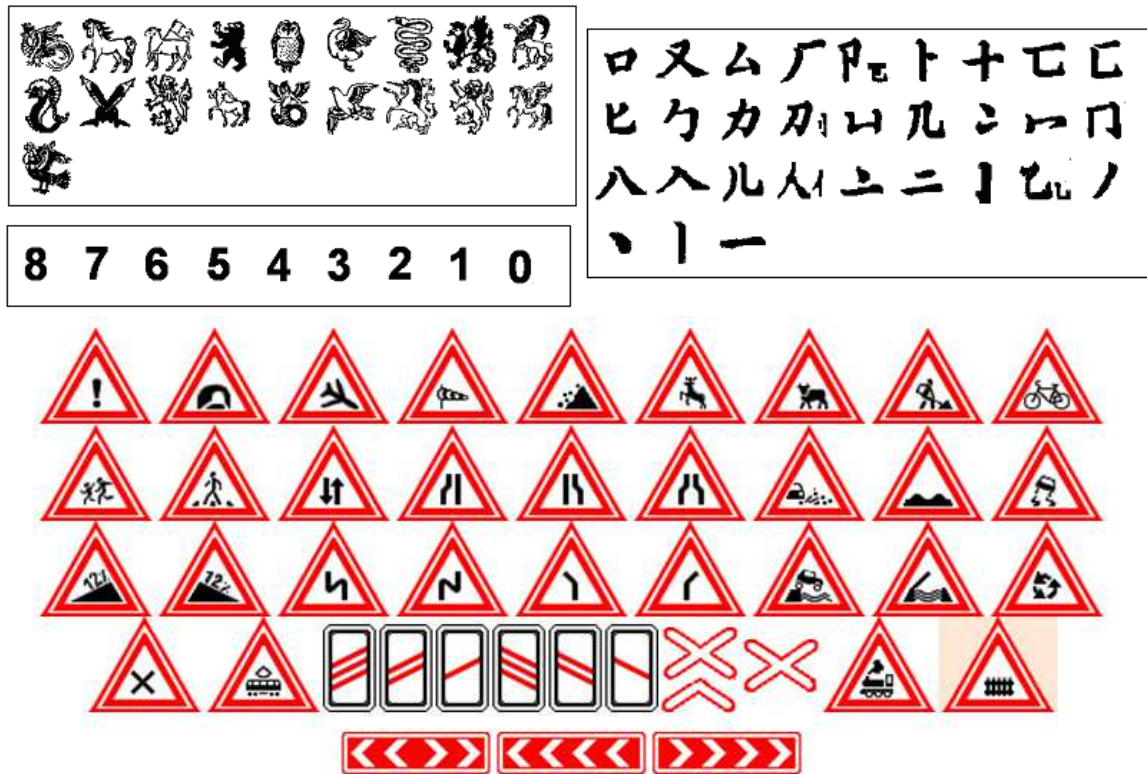


Рис. 3. Тестові набори зображень

Як бачимо з табл. 2, внаслідок практичної реалізації запропонованих методів очікуване зменшення обсягу обчислень підтверджено (близько 2 разів для кожного із параметрів викривлень перспективи, де N – розмір сторони зображення, $N=150$ пікселів).

Таблиця 2

Порівняння швидкодії методів

Метод	Класична двовимірна кореляція	Нормалізація із оцінкою напрямку та спрощеною кореляцією	Нормалізація із оцінкою напрямку та спрощеною кореляцією без участі еталону
Оцінка числа операцій	$301N^2$	$160N^2 + 4N$	$155N^2 + 2N$
Час, сек.	11,757 сек.	5,810 сек.	4,655 сек.

Проведено порівняльні дослідження запропонованих методів компенсації впливу перспективи при проєктивних перетвореннях на основі спільного застосування критерію (5) та кореляційного аналізу із використанням еталону та без нього, результати зведено у гістограмі на рис. 4. Дослідження проводилося для зображень цифр розміром 64×64 пікселів із допустимим рівнем похибки 30–70 пікселів між еталонем та вхідним зображенням. Іншою умовою було виконання рівності ознак (2) з похибкою, що дорівнювала 0.01 (для методу без використання еталону). Перевагою цього методу є його незалежність від

еталонного зображення. Як бачимо із рис. 4, запропоновані методи дають значення параметрів, що є наближеними до заданих.

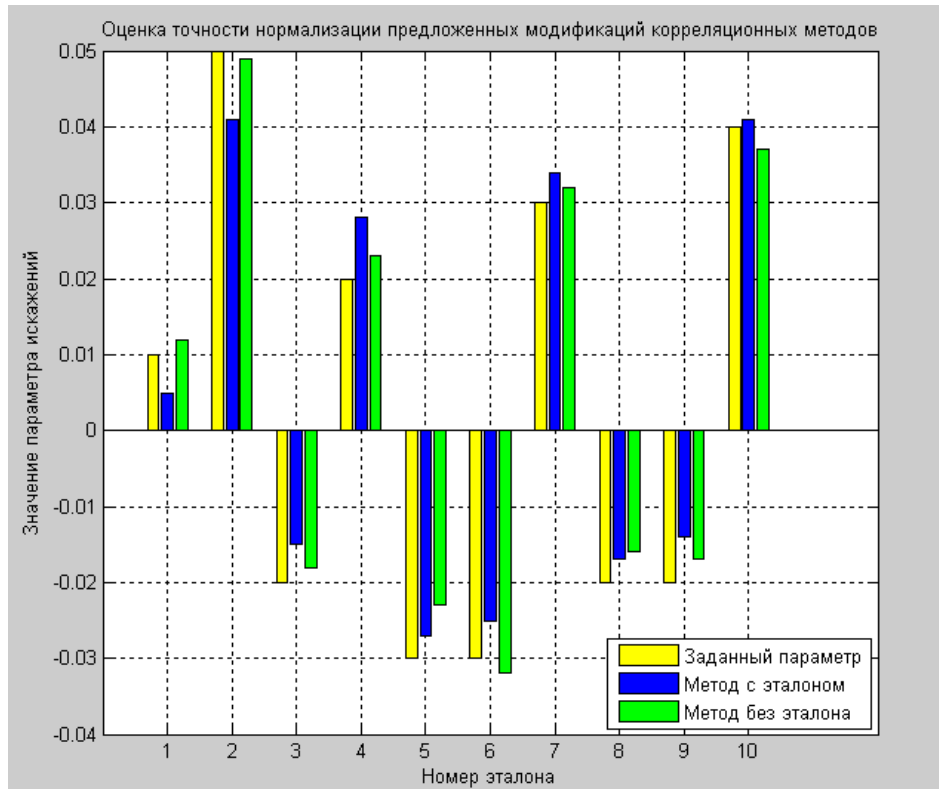


Рис. 4. Оцінка точності запропонованих методів

На рис. 5 наведено приклад нормалізації зображення автомобільного номеру, який показує ефективність застосування запропонованого методу нормалізації на основі попереднього визначення напрямку викривлень.

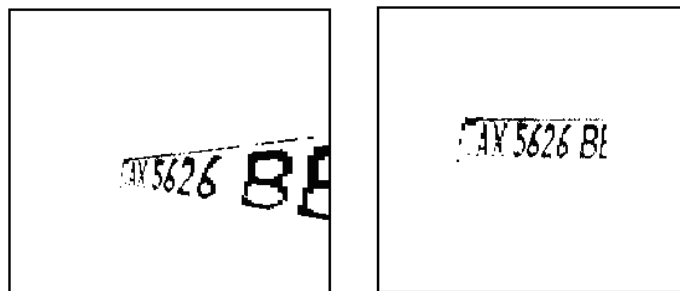


Рис. 5. Приклад нормалізації зображення автомобільного номеру

У розділі наведено також результати дослідження точності роботи кореляційного методу нормалізації слідуючого типу для перспективи на основі функціоналів (9)–(10), що враховують перерозподіл яскравості зображення. Максимальна відносна похибка при визначенні параметрів у експерименті склала близько 10%, що можна вважати задовільним в умовах дії нелінійних викривлень.

Наведено особливості впровадження розроблених методів. Запропонований метод нормалізації дає можливість виконувати автоматичну обробку зображення автомобільного номеру із компенсацією викривлень, що дає змогу виконувати

подальше розпізнавання. Програмний продукт, основу якого складає реалізація розробленого методу, впроваджено в системі реєстрації транспортних засобів. Основним результатом практичного застосування є те, що реалізація процедури компенсації викривлень ліквідує залежність результату розпізнавання від місця розташування камери.

Основні результати розділу опубліковані в [1, 4, 6, 7, 9, 13].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача нормалізації зображень при наявності проєктивних викривлень на основі попередньої компенсації перетворень перспективи із підвищенням рівня швидкодії. За результатами досліджень можна зробити такі основні висновки:

1. Внаслідок аналізу сучасного стану задачі встановлено, що основні труднощі нормалізації проєктивних перетворень пов'язані з присутністю перспективи, яка вносить фактор нелінійності у викривлення. Принципово важливим моментом при теоретичному аналізі проєктивних викривлень є розкладання проєктивної групи, що дає можливість побудувати нормалізатор шляхом послідовної нормалізації підгруп перспективних та афінних перетворень.

2. Уперше запропоновано критерій для оцінки напрямку однопараметричних перспективних перетворень на базі проєкцій зображення, аналіз значень якого дає можливість визначити напрямок перетворень і знак параметру нормалізації.

Аналіз синтезованих ознак дозволяє скоротити діапазон допустимих значень параметрів викривлень, а застосування проєкційного аналізу для визначення напрямку однопараметричних викривлень забезпечує високий рівень швидкодії за рахунок зведення двовимірної задачі обробки до одновимірної.

3. Уперше запропоновано метод компенсації впливу перспективи на основі застосування критерію оцінки напрямку перетворень перспективи та кореляційного аналізу. Перевагою методу є висока швидкодія за рахунок сканування на значно меншій множині значень параметрів. Теоретичні результати підтверджено експериментально, показано можливість пришвидшення процедури нормалізації до 4 разів. Метод може бути застосований для нормалізації перетворень за участі еталонного зображення та за його відсутності.

4. Набув подальшого розвитку кореляційний метод нормалізації слідкуючого типу для перспективи на основі функціоналів, що враховують перерозподіл яскравості зображення внаслідок дії проєктивних перетворень та забезпечують контроль присутності перспективних викривлень, що дає можливість звести проєктивне викривлення зображення до групи афінних викривлень, для котрої можуть бути застосовані традиційні підходи.

5. Одержала подальший розвиток модель послідовної нормалізації для проєктивної групи перетворень, що заснована на застосуванні інваріантного до афінної групи відображення структурного або інтегрального типу і нормалізаторі

для перспективи. Проведено дослідження методу нормалізації проективно викривлених зображень із застосуванням інваріантних афінних ознак та описів на прикладі структурних афінних інваріантів та інтегральних функціоналів на базі моментів.

6. Експериментальні дослідження запропонованих методів компенсації перспективи при проективних перетвореннях на основі сумісного застосування критерію оцінки напрямку і кореляційного аналізу показало, що точність обчислення параметрів знаходиться у допустимих межах.

Аналіз результатів експериментів для слідкуючого методу на основі запропонованого критерію присутності перспективи показав, що відносна похибка визначення параметра знаходиться у межах 10% , що є задовільним для нелінійних перетворень.

7. Реалізація запропонованих у дисертаційній роботі моделей та методів дає можливість вирішення ряду прикладних задач: автоматичної обробки зображення номерного знаку автомобіля із подальшим розпізнаванням, автоматичного аналізу мікрочасток для контролю якості лікарських препаратів, визначення масової долі гранульованого шлаку в цементі для оцінки його якості.

Результати дисертаційної роботи знайшли застосування у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки при проведенні занять з дисциплін «Комп'ютерний зір», «Математичне та програмне забезпечення систем обробки складних сигналів», «Алгоритми та програмне забезпечення синтезу зображень», «Методи та системи розпізнавання образів».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Любченко В.А. Нахождение и нормализация объектов на изображениях, искаженных проективными преобразованиями на примере номерного знака / В.А. Любченко, Е.О. Передрий // Бионика интеллекта. – 2007. – № 1 (66). – С. 153–156.

2. Гороховатский В.А. Корреляционные методы распознавания изображений путем голосования систем фрагментов / В.А. Гороховатский, Е.О. Передрий // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2009. – № 1 (20). – С. 74–81.

3. Любченко В.А. Нормализация перспективных преобразований проективно искаженных изображений / В.А. Любченко, Е.В. Яковлева, Е.О. Передрий // Вестник национального технического университета «ХПИ». Системный анализ, управление и информационные технологии. – 2008. – № 26. – С. 174–184.

4. Гороховатский А.В. Автоматический анализ и оценка параметров объектов микроскопических изображений / А.В. Гороховатский, Е.О. Передрий // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – № 3 (25). – С. 100–102.

5. Передрий Е.О. Методы нормализации перспективных искажений изображений на основе корреляции / Е.О. Передрий // Системи управління,

навігації та зв'язку. – 2010. – № 1 (13). – С. 117–120.

6. Передрий Е.О. Нахождение однородных областей, вписанных в заданную фигуру / Е.О. Передрий // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 10-й междунар. молодеж. форум, 10–12 апреля 2006 г.: сб. матер. – Харьков, 2006. – С. 467.

7. Передрий О.О. Система знаходження номерних знаків у задачах ідентифікації транспортних засобів / О.О. Передрий // Студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики (СНКПМІ–2006): IX Всеукр. (IV Міжнар.) конф., 5–6 квітня 2006 р.: тези доп. – Львів, 2006. – С. 81–82.

8. Любченко В.А. Идентификация группы преобразований для систем компьютерного зрения / В.А. Любченко, Е.О. Передрий // Современные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: II междунар. науч. конф., 2–5 октября 2007 г.: сб. матер. – Харьков, 2007. – С. 343–344.

9. Передрий Е.О. Методы обнаружения объектов заданной формы в поле зрения / Е.О. Передрий // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 11-й междунар. молодеж. форум, 10–12 апреля 2007 г.: сб. матер. – Харьков, 2007. – Ч. 2. – С. 175.

10. Передрий О.О. Аналіз методів виділення областей для виявлення об'єктів на зображеннях під дією перетворень проєктивної групи / О.О. Передрий // Студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики (СНКПМІ–2007): X Всеукр. (V Міжнар.) конф., 25–27 квітня 2007 р.: тези доп. – Львів, 2007. – С. 133–134.

11. Projective methods of image recognition / Y. Putyatin, V. Gorohovatsky, A. Gorohovatsky, E. Peredriy // Knowledge-Dialogue-Solution (KDS'2008): XIVth International Conference, June 23 – July 03, 2008, Varna (Bulgaria) – Sofia, 2008. – Intelligent technologies and Application. – No. 5. – P. 37–43.

12. Гороховатский А.В. Инвариантные проекционные признаки изображений для некоторых типов перспективных искажений / А.В. Гороховатский, Е.О. Передрий // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'08): міжнар. наук. конф., 19–23 травня 2008 р., Євпаторія: зб. наук. праць. – Херсон, 2008. – Т. 3, Ч. 1. – С. 103–107.

13. Передрий Е.О. Исследование смещения центра тяжести при проективных преобразованиях / Е.О. Передрий // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 12-й междунар. молодежный форум, 1–3 апреля 2008 г.: сб. матер. – Харьков, 2008. – Ч. 2. – С. 209.

14. Передрий Е.О. Нормализация перспективных преобразований с использованием инвариантных моментных признаков / Е.О. Передрий // Сучасні засоби та технології розроблення інформаційних систем: міжнар. наук.-практ. конф., 20–21 листопада 2008 р.: зб. наук. статей. – Харків, 2008. – № 15. – С. 112–113.

15. Пуятин Е.П. Исследование инвариантных особенностей перспективных преобразований для задач компьютерного зрения / Е.П. Пуятин, В.А. Любченко, Е.О. Передрий // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ–2008): III междунар. конф., 22–24 октября 2008 г.: сб. науч. трудов. – Харьков, 2008. – Т. 5. – С. 169–171.

АНОТАЦІЯ

Передрій О.О. Нормалізація проєктивних перетворень зображень методом компенсації впливу перспективи. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2011.

Дисертацію присвячено розробці методів і моделей нормалізації проєктивних перетворень зображень на основі попередньої компенсації впливу викривлень перспективи.

Запропоновано модель критерію для оцінки напрямку однопараметричних перспективних викривлень із застосуванням проєкцій зображення. Критерій дає можливість визначити напрямок перспективних викривлень та знак нормалізуючого параметра і є основою для побудови метода компенсації впливу перспективи на основі критерію та скороченої кореляційної процедури.

Набув подальшого розвитку слідкуючий метод нормалізації перспективних викривлень на основі функціоналів, що враховують перерозподіл яскравості зображення внаслідок дії проєктивних перетворень. Досліджено можливість нормалізації проєктивно викривлених зображень за допомогою інваріантного до афінної групи відображення, яке може бути структурного або інтегрального типу.

Створено і впроваджено практичні системи нормалізації проєктивних та перспективних викривлень, які дали можливість вирішити задачу автоматичної обробки та виділення зображення номерного знаку автомобіля; задачу автоматичного аналізу мікрочасток із метою контролю якості лікарських препаратів; задачу визначення масової долі гранульованого шлаку в цементі із метою визначення його якості. Теоретичні аспекти дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес.

Ключові слова: нормалізація, перетворення перспективи, проєктивне перетворення, визначення та компенсація параметрів, група геометричних перетворень, функціональні ознаки.

АННОТАЦИЯ

Передрий Е.О. Нормализация проєктивных преобразований изображений методом компенсации влияния перспективы. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена разработке методов и моделей нормализации проєктивных преобразований изображений с помощью компенсации влияния искажений перспективы. Возможность реализации подобного подхода к нормализации основана на разложении преобразований проєктивной группы на аффинную и перспективу, в свою очередь, двухпараметрическую перспективу

можно представить как последовательную совокупность однопараметрических.

В первом разделе выполнен анализ состояния проблемы нормализации изображений под влиянием проективных искажений. Рассмотрены основные математические модели геометрических искажений линейного и нелинейного типов, показано, что именно присутствие нелинейных искажений перспективы значительно усложняет решение задачи нормализации, которая состоит в нахождении параметров искажений и их компенсации.

Второй раздел посвящен нормализации перспективных искажений с использованием предложенного критерия определения направления преобразования перспективы и корреляционного подхода. Известно, что совместное воздействие аффинных и перспективных преобразований, которые составляют проективную группу, может быть разделено с целью выполнения последовательной нормализации. Двухпараметрические искажения перспективы, в свою очередь, также могут быть разложены на последовательность соответствующих однопараметрических. Нормализация однопараметрических искажений перспективы дает таким образом возможность устранить фактор нелинейного воздействия проективной группы при отсутствии других нелинейных искажений.

В результате диссертационных исследований предложен критерий для оценки направления однопараметрических преобразований перспективы с применением проекций изображения. Критерий дает возможность определить направление перспективных искажений и знак параметра нормализации, что является основой для соответствующего метода компенсации влияния перспективы на основе критерия и сокращенной корреляционной процедуры, который значительно снижает время нормализации в сравнении с классическим корреляционным подходом. Предложен также метод компенсации влияния перспективы на основе критерия и сокращенной корреляции без участия эталонного изображения.

В третьем разделе предложена модификация корреляционного следящего метода нормализации перспективных искажений на основе функционалов, которые учитывают перераспределение яркости вследствие действий двухпараметрических преобразований перспективы. Это позволяет выполнить нормализацию двухпараметрического перспективного преобразования вдоль произвольной прямой. Исследована возможность нормализации проективно искаженных изображений с помощью инвариантного к аффинной группе отображения структурного или интегрального типа. Получила дальнейшее развитие модель последовательной нормализации для проективной группы преобразований, которая основана на инвариантном аффинном отображении структурного или интегрального типа и нормализаторе для перспективы.

В четвертом разделе приведены исследования свойств предложенных методов и моделей. Показано, что предложенный критерий оценки направления однопараметрических преобразований перспективы выполняется для изображений различного размера и класса. Теоретически и экспериментально подтверждено, что предложенные в работе методы имеют преимущество по

быстродействию в сравнении с традиционными. В данном разделе также приведены результаты внедрения разработанных методов. Системы нормализации проективных и перспективных искажений дали возможность решить задачу автоматической обработки и выделения номерного знака автомобиля; задачу автоматического анализа микрочастиц с целью контроля качества лекарственных препаратов; задачу определения массовой доли гранулированного шлака в цементе с целью определения его качества.

Выполнено компьютерное моделирование методов определения направления перспективных искажений вдоль произвольной прямой с применением анализа изменений центров тяжести и одномерных моментных инвариантов на основе проекций.

Теоретические аспекты диссертационной работы также внедрены в учебный процесс Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Ключевые слова: нормализация, преобразования перспективы, проективное преобразование, определение и компенсация параметров, группа геометрических преобразований, функциональные признаки.

ABSTRACT

Peredrii O.O. Normalization of projective image transformations using method of perspective influence compensation. – Manuscript.

The thesis for the candidate degree in technical sciences on the specialty 01.05.02 – Mathematical modeling and computing methods.– Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2011.

The thesis is devoted to development of methods and models of image normalization under projective transforms using perspective distortion compensation method.

Model of criterion for the direction of one-parametric perspective distortion based on the image projections analysis is introduced and studied. Criterion allows to detect perspective transforms direction and the sign of normalization parameter and is the base of corresponding method of perspective transform normalization using short correlation procedure.

Tracking method of perspective transforms normalization based on functionals, that take into account the redistribution of brightness function because of projective transforms is proposed. Opportunity for normalization of projective distorted images using affine invariant mapping, that can have structural or integral structure is considered.

Suggested methods and models experimental modeling shows their effectiveness in the conditions of non-linear transforms. Practical systems of projective/perspective transforms normalization are developed and introduces for automatic license plate image processing and for micro-biological images processing and analysis. Theoretical results of dissertation researches are used in the learning process.

Keywords: normalization, perspective transform, projective distortion, parameters detecting and compensation, group of geometrical transforms, functional features.

Підп. до друку 05.10.11. Формат 60x84 1/16 Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,2. Облік. вид. арк. 1,0. Тираж 100 прим.

Україна, 61166 Харків, просп. Леніна, 14, ХНУРЕ.

Віддруковано в друкарні ТОВ «Цифра принт»
на цифровому лазерному комплексі Xerox DocuTech 6135.
Адреса: м. Харків, вул. Культури, 22–Б.