УДК 681.5

А.В. КОЖЕМ'ЯКО, В.П. КОЖЕМ'ЯКО, М.В. УСАНОВА, Н.В. УСАНОВА

ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННА СИСТЕМА ЗНАХОДЖЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЗА ПЕРЕМІЩЕННЯМ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕРЖАВНИХ НОМЕРНИХ ЗНАКІВ

Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел. 0432-598125, E-mail: kvantron@gmail.com

Анотація. У роботі розглянуто оптико-електронну інформаційну систему для пошуку та контролю руху транспортних засобів, а також був описаний алгоритм контролю руху. Система зв'язку та обміну даними з мобільними об'єктами забезпечує встановлення зв'язку для отримання координат про місцезнаходження транспортного засобу з використанням радіомодемної системи обміну даних. Метод дозволяє здійснювати імітаційне моделювання контролю руху транспортних засобів та створення оптико-електронної системи на його основі. Було розглянуто систему розпізнавання державних номерних знаків транспортних засобів. Система використовує нейронні мережі для розпізнавання знаків.

Аннотация. В работе рассмотрена оптико-электронная информационная система для поиска и контроля движения транспортных средств, а также был описан алгоритм контроля движения. Система связи и обмена данными с мобильными объектами обеспечивает установление связи для получения координат о местонахождении транспортного средства с использованием радиомодемной системы обмена данных. Метод позволяет осуществлять имитационное моделирование контроля движения транспортных средств и создание оптико-электронной системы на его основе. Рассмотрена система распознавания государственных номерних знаков транспортних средств. Система использует нейронные сети для распознавания знаков.

Abstract. The opto-electronic information system for the search and control of vehicles movement was examined in these abstracts, and the algorithm of the traffic control was described. Communication system and data exchange with the mobile objects provides the linking with the coordinates of the location of the vehicle using radiomodem's exchange system data.This method allows to implement simulation modeling of the control of vehicle movement and to create opto-electronic system based on it. It was considered the system of recognition of the state registration numbers of the road transport. The system uses neural networks for the recognition of the signals.

ВСТУП

Обробка відеозображень, представлених послідовністю кадрів, на даний час широко використовується в різних сферах людської діяльності. Однією з найбільш складних і актуальних задач обробки відеозображень є проблема виділення і розпізнавання рухомих об'єктів в умовах дії різного роду перешкод і збурень та створення на цій основі систем моніторингу. Головне завдання таких систем - інформувати людину про ситуаці., що склалася на спостережуваному об'єкті і по можливості зробити будь-які заздалегідь передбачені або програмно закладені дії.

При розпізнаванні символів досить широко використовуються штучні нейронні мережі. Сучасні методи рішення поставленого завдання розпізнавання номерних знаків не враховують в достатній мірі проблеми фіксації й розпізнавання зображень і прийняття відповідних рішень.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Пропонується розробка системи, яка дозволить за рахунок введення нових пристроїв обробки зображень, нових елементів, таких як система відео спостереження, GPS-приймачів та світлофорних об'єктів, зменшити простій автомобілів на світлофорах та покращити ситуацію в середовищі «транспортний засіб – дорога – навколишній трафік», а саме зменшення заторів та забезпечення вільного та коректного руху транспорту.

© А.В. КОЖЕМ'ЯКО, В.П. КОЖЕМ'ЯКО, М.В. УСАНОВА, Н.В. УСАНОВА, 2011

Умовно аналіз відеозображень в таких системах можна розділити на такі етапи:
- виявлення рухомих об'єктів;
- класифікація рухомих об'єктів;
- відстеження траєкторії руху об'єктів, що цікавлять;
- розпізнавання типів і дій виявлених об'єктів.

Виявлення рухомих об'єктів, що полягає у виділенні переднього плану, є основним для подальшого аналізу. Від того, наскільки акуратно і коректно вирішена ця задача, залежать всі наступні етапи, а також необхідні обчислювальні ресурси. Саме тому величезна кількість робіт присвячена методам детектування рухомих об'єктів [2].

Центральний пункт управління відслідковує векторну карту міста з нанесеними об'єктами управління і умовними позначеннями режимів роботи контролера. Далі, візуально відображає в масштабі реального часу стани світлофорних об'єктів, які контролюються, ліній і апаратури зв'язку. Можливий як детальний контроль стану всієї системи в цілому, так і текучого стану окремих об'єктів. Крім того, контролюються такі параметри, як правильність алгоритму переключення, "зависання" контролерів, відповідність часу фаз руху, виконання команд і т.п. Перелік ситуацій, при яких будуть видаватись такі попередження, може коректуватись шляхом зміни опцій програми. Центральний пункт управління також забезпечує такі функції:

- диспетчерське управління як одним контролером, так і групою;
- автоматичний перехід в режим координованого управління;
- голосове повідомлення про стан апаратури на об'єктах;
- ведення журналу стану об'єктів і їх несправностей;
- ведення журналу дій диспетчера;
- синхронізація часу всієї системи при допомозі GPS-приймача чи довільного іншого приладу [1].

Щодо основних блоків програмного комплексу, то тут можна виділити такі:

1. Попередня обробка зображення.

Зазвичай сигнали, що надходять від відеокамери, мають невисоку якість. Камери, як правило, працюють на вулиці, часто в несприятливих погодних умовах, що знижують якість зображення. Для поліпшення якості зображення, як правило, проводять попередню обробку. Серед найбільш часто вживаних методів такої обробки використовують різні види фільтрації і згладжування зображення. Крім того, при використанні короткофокусних камер повинна проводитися комп'ютерна компенсація сферичної та інших аберацій.

2. Виявлення рухомих об'єктів.

3. Класифікація об'єктів.

На відеозображенні можуть бути присутніми різні рухомі об'єкти: автомобілі, автобуси, мотоцикли, люди, групи людей, тварини і т.п. Кінцевою метою відеоспостереження є виявлення нештатних ситуацій, тому вкрай важливо правильно класифікувати виявлені об'єкти. Методи классіфікаціі об'єктів можна розділити на дві великі групи: геометричні та динамічні методи. До геометричним методів відносяться різні варіанти методів сегментування зображень та контурні методи. В основі цих методів лежить ідея виділення ознак, що характеризують геометричну форму об'єкту, з наступною класифікацією об'єктів на основі цих ознак. Динамічні методи використовують періодичність рухових процесів, присутніх у більшості об'єктів.

4. Трекінг (супровід) об'єктів.

Метою трекінгу є встановлення відповідності між об'єктами або їх частинами в послідовності кадрів, а також визначення їх траєкторій та швидкості руху. Особливу складність цієї задачі надають зміни ракурсів об'єктів під час руху, а також їх часткове або повне перекриття, коли один об'єкт повністю загороджує інший.

5. Визначення координат об'єктів.

При здійсненні відеоспостереження для виявлення різних позаштатних ситуацій необхідно знати координати виявлених об'єктів, а також вміти співвідносити їх з координатами на місцевості. Ця задача часто називається завданням геолокаціі, тобто уявлення об'єктів на реальній тривимірної сцені. Відзначимо, що для рухомої камери із змінним збільшенням необхідно застосовувати процедуру калібрування камери.

6. Прийняття рішення про подачу сигналу тривоги.

Для більшості систем моніторингу цей модуль є останнім при здійсненні спостереження. Він характеризує реакцію всієї системи на виявлення заздалегідь обумовлених позаштатних ситуацій, таких

як порушення правил дорожнього руху, аварії і т.п. Цей модуль нерозривним чином пов'язаний з системою визначення координат об'єктів, хоча може бути реалізований автономно.

Останніми десятиріччями у світі розроблено велику кількість різноманітних геоінформаційних систем. Запропоновано різні класифікації, кожна з яких певною мірою ранжирує існуюче різноманіття в певну кількість однорідних класів з використанням однієї або декількох ознак.

Звичайно геоінформаційні системи класифікують за такими ознаками [4]:

-за призначенням — залежно від цільового використання;

-за проблемно-тематичною орієнтацією — залежно від сфери застосування;

-за територіальним охопленням — залежно від розміру території і масштабного ряду цифрових картографічних даних, що складають базу даних ГІС.

Дослідницькі ГІС створюються для забезпечення розв'язання будь-якої наукової проблеми або сукупності наукових проблем із застосуванням методів просторово-часового аналізу й моделювання. ***Навчальні ГІС*** розробляються для забезпечення навчального процесу, як правило, у вищих навчальних закладах. **За територіальним охопленням** найбільш логічним є поділ геоінформаційних систем на:
-глобальні;
-загальнонаціональні;
-регіональні;
- локальні.

Глобальні геоінформаційні системи охоплюють або всю земну кулю або якусь її значну частину. Загальнонаціональні ГІС охоплюють територію всієї країни, регіональні — якусь її частину, таку, як економічний район, адміністративна область чи група суміжних областей, басейн великої річки і т.ін. До категорії «локальні ГІС» відносять геоінформаційні системи меншого територіального охоплення, але рекомендації щодо територіальних обмежень локальних ГІС відсутні. До даної категорії, як правило, належать і муніципальні геоінформаційні системи (МГІС) — специфічна категорія геоінформаційних систем, що розробляються для території міста або його частини [1].

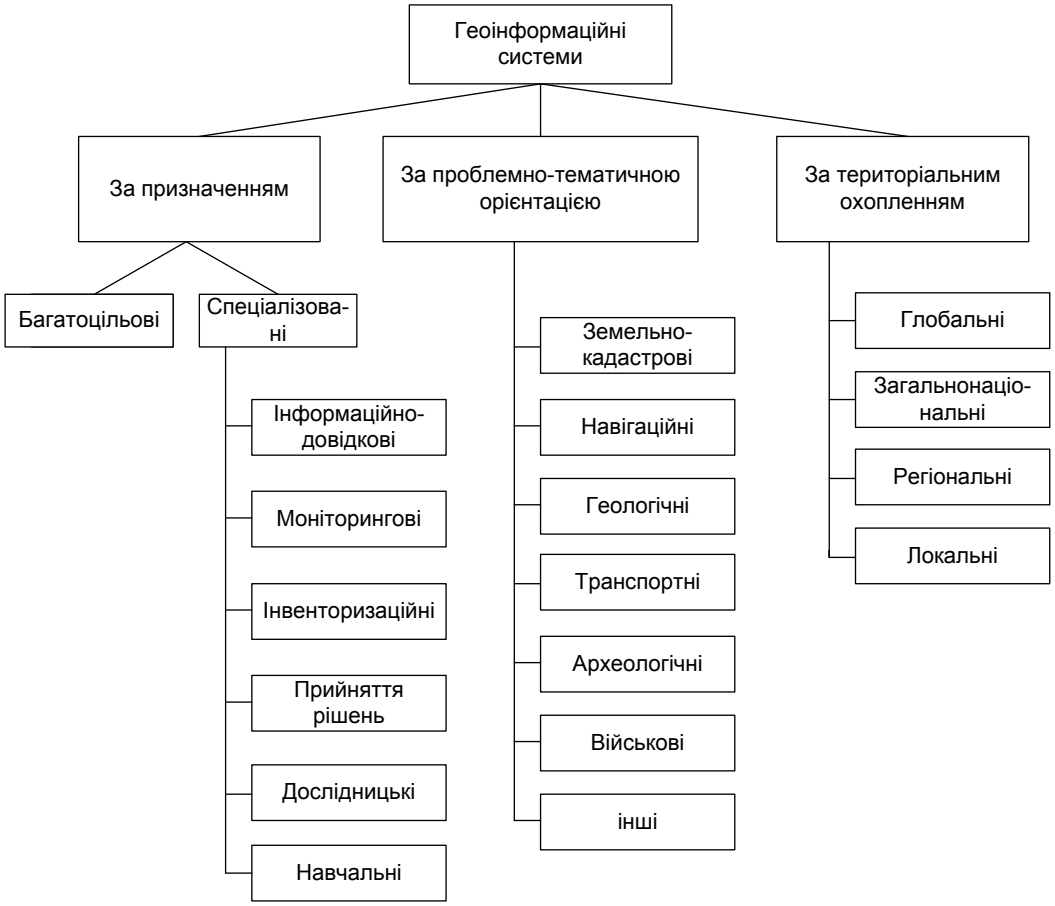


Рис.1. Класифікація ГІС

Система управління міським транспортом - спеціалізована ГІС з багаторівневою розподіленою клієнт-серверною архітектурою, яка передбачає взаємодію, обмін даними між ними. Клієнт-серверна архітектура визначається такими складовими:

- інформаційно-аналітична система диспетчерського центру управління міським транспортом;
- система зв'язку та обміну даними з мобільними об'єктами;
- комплекси автоматизованих робочих місць користувачів системи з віддаленим доступом;
- бортові навігаційні комплекси транспортних засобів [2].

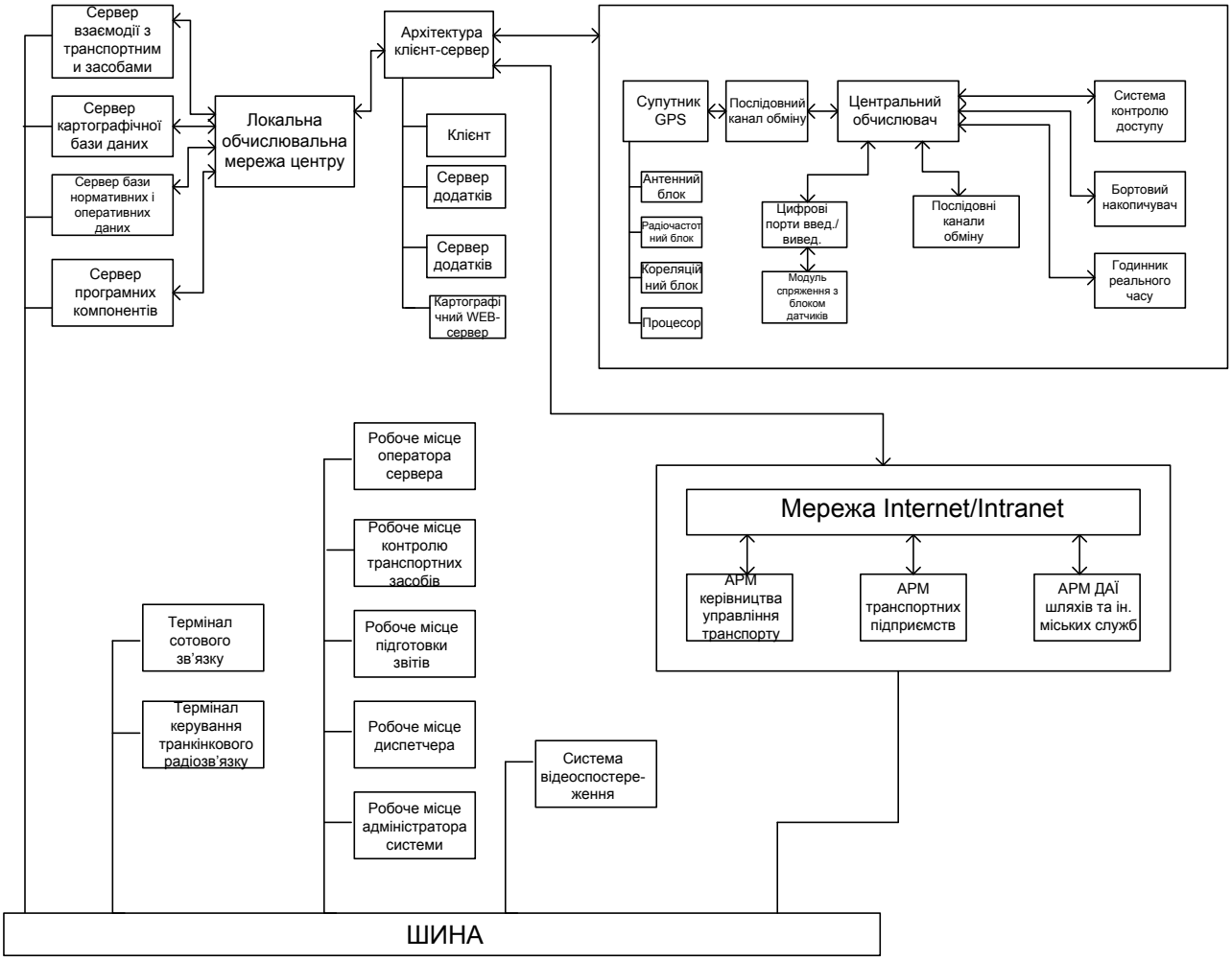


Рис. 2 . Оптико-електронна інформаційна система знаходження і контролю за переміщенням транспортних засобів

Нейронні мережі використовують різні алгоритми для розпізнавання символів, одні з яких виконуються таким чином.

1. Необхідно привести до стандартного розміру символи, які буду розпізнаватись.
2. Формують вхідні параметри нейронної мережі, які складаються з нормованих параметрів яскравості.
3. Формують вихідні параметри з кількості символів, що розпізнаються.
4. Відбувається додаткове оброблення для визначення основних перепадів яскравості.
5. Результатом розпізнавання є символ, якому відповідає найбільше зі значень вихідного вектора нейронної мережі.

Розпізнавання полягає у виділенні із зображенням букви її початкових ознак і після цього застосовується нейронної мережа для класифікації відповідного зображення символу до набору букв, які зберігаються в базі знань. Кінцевим результатом буде сформований набір значень, що вказують на відповідність образу розпізнавання на символу із заданого набору символів. Набір символів складається з набору літер та арабських цифр.

Для вирішення поставленої задачі використовується алгоритм, призначений для автоматичного розпізнавання номерних знаків транспортних засобів. На першому етапі зображення отримане за допомогою відеокамери надходить на блок обробки. В цьому блоці відбувається попередня фільтрація, та сегментація номерного знаку. Далі зображення потрапляє в нейромережу, де відбувається остаточне розпізнавання.

Тобто, загальний алгоритм складається з етапів:

1. Попередня обробка зображення.
2. Сегментація.
3. Розпізнавання.

На першому етапі кольорове зображення перетворюється в чорно-біле і представляється бінаризованим (рисунок 2). Для кожного пікселя обчислюється його яскравість в межах від нуля до 255. Рівню яскравості 0 відповідає чорний колір, рівню 255 − білий. Таким чином, для зберігання зображення потрібен один байт на піксель.

Яскравість пікселя обчислюється за формулою:

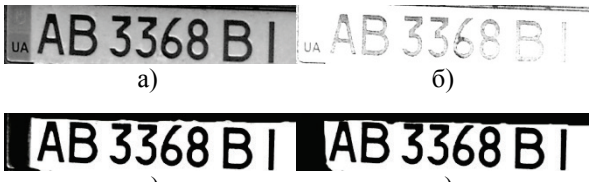
$$I = \frac{\max(R+G+B) + \min(R+G+B)}{2},$$

де *R, G, B* - нормований на 256 (один байт) червоний, зелений і блакитний компонент кольору пікселя відповідно.

а) б)

Рис. 2. Зображення а) створене та б) бінаризоване

Другим етапом є, власне, бінаризація. Результат бінаризації залежить від заздалегідь заданого параметра − співвідношення чорних пікселів і загальної їх кількості на зображенні. Далі наводиться докладний опис процедури бінаризації. Приклади бінаризації зображення з різними параметрами наведено на малюнку 3.



а) б)

в) г)

Рис. 3. Бінаризація:
а) вихідне зображення, б) 25% чорних пікселів, в) 50% чорних пікселів, г) 75% чорних пікселів

Алгоритм бінаризації зображення:

1. Створюємо одновимірний масив *I* з 256 елементів (від 0 до 255). Заповнюємо його нулями.
2. Пробігаємо попіксельно все зображення. Збільшуємо на одиницю значення у клітинці масиву *I*, відповідної яскравості пікселя і (*I[i]*++). У підсумку, значення кожної комірки масиву *I[i]* буде дорівнювати кількості пікселів яскравості рівняння і на всьому зображенні.
3. На цьому кроці визначається поріг яскравості *a*. Нехай *N* − загальна кількість пікселів (висота помножена на ширину), k − коефіцієнт, що визначає кількість чорних пікселів. Тоді *kN* дорівнюватиме бажаній кількості чорних пікселів на бінарному зображенні. Підсумовуємо значення комірок масиву, починаючи з нульової до тих пір, поки значення цієї суми не перевищить *kN*. Індекс останньої підсумовуваної комірки і буде порогом *a*.

4. Повторно пробігаємо попіксельно все зображення. Порівнюємо рівень яскравості кожного пікселя з порогом *a*. Якщо цей рівень менше або дорівнює *a*, то піксель стає чорним, інакше − білим.

Далі бінаризоване зображення обробляється за допомогою деяких методів. Щоб знайти область номерного знаку, по-перше використовується алгоритм розмиття. За допомогою алгоритму розмиття,зображення обробляється вздовж по вертикальним та горизонтальним лініям (скан-лініям). Якщо кількість білих пікселів менше бажаного порогу або більше, ніж будь-який інший бажаний поріг, білі пікселі перетворяться в чорний колір. У цій системі, порогові значення обрані як 10 і 100 для горизонтального і вертикального розмиття.

Зображення аналізується починаючи з верхнього лівого кута і закінчується правим нижнім. Визначаємо місця переходу між білою та чорною областю зображення, а потім на їх основі визначити прямі лінії, а на перетині прямих ліній визначити кути отриманої рамки номерного знаку. Таким чином визначається така кількість послідовних точок переходу, що може розглядатись як пряма лінія.

Далі після знаходження першого перепаду кольору пряма лінія визначається різницею між кольорами сусідніх пікселів. Для цього використаємо функцію:

$$f(i) = A * \sin(\frac{2 * \pi * (i + C)}{B}),$$

де А – амплітуда, відстань по осі ординат аналізованого піксела від прогнозованої границі (підбирається експериментально); В – коефіцієнт розтягнення по осі абсцис (оптимальне значення В=4 – забезпечує прямолінійне діагональне сканування); С – забезпечує початкові умови для сканування (з якого піксела обчислюється перехід кольору). Коефіцієнти А, В, С слід обирати серед множини натуральних чисел. Таким чином кількість аналізованих пікселів можливо скоротити в два рази.

Після того, як знайдені координати кутів номерного знака, аналізується виділена ділянка зображення із подальшим розпізнаванням символів на ній за допомогою описаних вище алгоритмів [5].

Після розмиття, морфологічні операції, розширення застосовуються до зображення для зазначення місця номерного знаку [6-8]. Однак, може бути більше одного кандидату на область розташування номерного знаку. Щоб знайти точну область та ліквідувати інші регіони, до зображення застосовуються деякі інші критерії на розмиття та фільтрацію. Оброблене зображення після цієї стадії, як показано на малюнку 4 (а) і зображення з участю лише номерного знаку показана на малюнку 4 (б).

Рис. 4. Зображення області номерного знаку:
а) область номерного знаку б) зображення лише з номерним знаком

Після отримання такої області номерного знаку, зображення скорочується до вигляду, показаному на рисунку 5.

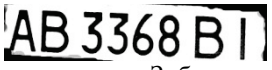


Рис.5. Область з номерним знаком. Зображення, готове до сегментації

У сегментації символів, номерний знак поділяється на складові частини для отримання символів в індивідуальному порядку. По-перше, зображення фільтрується для підвищення якості та видалення шумів і небажаних плям. Тоді до зображення застосовується операція розширення для розділу символів один від одного, якщо символи близькі один до одного. Після цієї операції застосовується горизонтальне та вертикальне розмиття для визначення характерних областей. Сегментація проходить зліва направо. Шукається точка, підозріла на належність символу. Зображення сканується вертикальними смугами. Маючи на увазі імовірність тіні, пропускаємо точки пов'язані з верхом і низом растра. Точка, яка не має такого зв'язку, передається алгоритмом виділення символу (рисунок 6).

Рис.6. Пошук підозрілої точки

Алгоритм пошуку точки, підозрілої на приналежність символу:
1. Початковою стає крайня ліва вертикальна лінія пікселів.
2. Починаючи від верхнього пікселя, спускаємося вниз, поки не зустрінемо білий піксель. Так ми отримуємо верхню межу області пошуку.
3. Починаючи від нижнього пікселя, підіймаємося вгору, поки не зустрінемо білий піксель. Так ми отримуємо нижню межу області пошуку.
4. У виділеній області пошуку шукаємо першу чорну крапку. Якщо такої не знайдеться, то поточною стає наступна лінія у напрямку праворуч. Переходимо на крок 2.
5. Знайдена точка передається алгоритмом виділення символу. Від обраної точки будується чотирьохзв'язна область. Таким чином, виділяється символ. Накладаються обмеження на ширину області, враховуючи можливі зливання символів тінню і брудом.

З положення символу на номері стає ясно буква це чи цифра. Тому для символу, з порівняння його растра з еталоном, отримуємо 10 або 13 оцінок для цифри або букви відповідно. Приймаємо рішення на користь символу з максимальною оцінкою.

Еталони символів зберігаються в матрицях. Чорний піксель відзначається одиницею. Фоновим пікселям відповідають комірки із записаними в них відстанями до найближчого чорного пікселя зі знаком мінус. Відстань рахується за наступною формулою:

$$d = \max(x, y), \qquad d = x + y$$

де *x, y* − модулі зміщень до найближчої чорної точки.

Обчислення оцінки відбувається наступним чином. Растр символу трансформуються до розмірів еталона, і вони накладаються один на одного. Відповідні чорним пікселям символу значення в комірках еталона сумуються. Поява точки у клітинці символу, далекій від найближчої чорної точки в еталоні, істотно знижує значення оцінки (рисунок 7).

Алгоритм сегментації не завжди виділяє символ мінімальним охоплюючим прямокутником. Тому при накладенні растрів виникає необхідність зміщувати еталон щодо растра символу. Оцінка обчислюється для вихідного положення еталону на растрі і для всіх випадків зсуву еталона щодо растра символу у восьми напрямках на три пікселя. З положення, що відповідає максимальній отриманій оцінці, проводиться аналогічна процедура, але зі зрушенням в один піксель. У підсумку максимальний зсув еталона щодо символу сягає чотирьох крапок, що покриває помилки сегментації.

Навчання нейронної мережі відбувається звичайним чином, тобто використовується алгоритм зворотнього поширення помилки. Програма навчання одержує на вхід файл із зображеннями символів. При навчанні символи із цієї бази перебираються циклічно. Для прискорення й поліпшення навчання погано розпізнавані символи проглядаються частіше за інші. Крім того, при навчанні мережі використовується регулярізація ваг мережі, тобто вводиться їхнє експонентне згасання.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто оптико-електронну інформаційну систему для пошуку та контролю руху транспортних засобів, а також був описаний алгоритм контролю руху. Система зв'язку та обміну даними з мобільними об'єктами забезпечує встановлення зв'язку для отримання координат про місцезнаходження транспортного засобу з використанням радіомодемної системи обміну даних. Метод дозволяє здійснювати імітаційне моделювання контролю руху транспортних засобів та створення оптико-електронної системи на його основі.

Після розпізнання державного номерного знаку програма співставляє його з існуючими номерними знаками в базі даних порушників Правил дорожнього руху. За допомогою використання постійного оновлення баз даних порушників та обміну базами між робочими станціями робота служб ДАІ може вийти на якісно новий рівень. Таким чином, створення мережі ДАІ може підвищити ефективність використання системи розпізнавання державних номерних знаків і ефективність роботи ДАІ взагалі.

Беручи до уваги той факт, що розмір і кольори номерного знака, а також розмір, тип і кольори шрифту, за допомогою яких виконується номерний знак, фіксовані й регламентуються ДСТУ 4278:2004 «Знаки номерні транспортних засобів», можна зробити висновок про більшу доцільність вибору алгоритму розпізнавання, заснованого на такому методі, що припускає апріорну наявність шрифту, що розпізнається, в базі даних. Це дозволить спростити алгоритм розпізнавання за рахунок позбавлення від функцій, у яких немає необхідності, зосередившись більше не на універсальності (у плані різноманітності розпізнаваних шрифтів) системи розпізнавання номерів, а на швидкодії й надійності (за рахунок спрощення алгоритмів).

Номерний знак не завжди перебуває в ідеальному положенні для сприйняття, тобто може бути повернутим щодо спостерігача на якийсь кут, або може бути підданий частковій корозії чи бути забрудненим. З урахуванням даних обставин пропонується при розробці систем розпізнавання номерних знаків використати нейромережі, або алгоритми на їхній основі. Завдяки нечіткій логіці, що використовується в них, можна досягти більш точного результату, у той час, коли алгоритми, засновані на чіткій відповідності, можуть не дати результату через недолік інформації, або її перекручування (наприклад, частина букви покрита іржею).

Розглянуто алгоритм виділення рамки номерного знаку, що містить символи, котрі підлягають розпізнаванню. Пропонується при розробці програмного забезпечення системи розпізнавання автомобільних номерів використати процедурну мову програмування з використанням нейроалгоритмів, отриманих, наприклад, за допомогою спеціальних програм-емуляторів нейромереж.

Розроблена система розпізнавання державних номерних знаків автотранспорту за умови створення загальної мережі ДАІ дасть значно більший ефект від її використання, ніж від впровадження окремих одиниць, не пов‘язаних між собою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кошкарев А. В. Программы, проэкты, базы и банки данных географических и картографических автоматизированных информационных систем // Картография и геоинформатика. Итоги науки и техники (Сер. «Картография»). – М.: ВИНИТИ АН СССР, 1991. – Т. 14. – С. 118-176.
2. Сербенюк С. Н. Картография и геоинформатика - их взаимодействие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990.–159 с.
3. Тэнк Д.У., Хопфим Д.Дж. Коллективные вычисления в нейроподобных электронных схемах. – В мире науке, № 2,1988.-С.46-55.
4. Світличний О.О. Основи геоінформатики. // Світличний О.О., Плотницький С.В. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://geoknigi.com/book_view.php?id=572.
5. Мартынюк Т.Б. Организация цифрового фильтра для нейросетевого классификатора биоэлектрических сигналов / Т.Б. Мартынюк, А.Г. Буда, В.В. Хомюк, А.В. Кожемяко, А.М. Гуцол // Современные информационные и электронные технологии (СИЭТ-2008): 9-я междунар. науч.-практ. конф., 19-23 мая 2008 г.: тезисы докл. – Одесса, 2008. – С. 63.
6. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры. Кн. 3: учеб. пособие для вузов / общ. ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 528 с. (Нейрокомпьютеры и их применение). ISBN 5-93108-007-4.
7. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс / С. Хайкин; пер. с англ. – 2-е изд. – М.: ООО "И.Д. Вильямс", 2006. – 1104 с. ISBN 5-8459-0890-6.
8. Комарцова Л.Г. Нейрокомпьютеры: учеб. пособие для вузов / Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с. ISBN 5-7038-1908-3.

Надійшла до редакції 13.04.2011р.

КОЖЕМ’ЯКО А.В – к.т.н., доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

КОЖЕМ’ЯКО В.П. – д.т.н., проф., завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

УСАНОВА М.В. – студентка кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

УСАНОВА Н.В. – студентка кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.