

МЕТОД ПОКРАЩЕННЯ ВИДИМОСТІ НА ЗАТУМАНЕНИХ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ ТА ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЯ У КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ

Сердюк М. Є. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна.

Беркут В. Г. – магістр з прикладної математики, випускник факультету прикладної математики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна.

Сірик С. Ф. – асистент кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Присутність на цифрових зображеннях туману та димки може спричинити проблеми у процесах розпізнавання, відстеження, класифікації об'єктів. Тому методи видалення туману та покращення розрізнюваності об'єктів на зображеннях, отриманих в умовах поганої видимості, є затребуваними в багатьох задачах комп'ютерного зору. У туманних погодних умовах контраст та колір зображення різко погіршуються. Видалення туману часто супроводжується появою артефактів на зображенні та спотворенням кольорів. Отже актуальним є пошук способів правильної оцінки присутності та видалення туману зі збереженням деталей та кольорів зображення та розробка відповідних методів обробки затуманених зображень.

Мета. Метою роботи є пошук ефективних підходів до розв'язання задачі видалення туману та димки з цифрових зображень та реалізація їх в комп'ютерній системі обробки цифрових зображень [1].

Методи. Основні етапи обробки зображення виконуються на каналі інтенсивності, що сприяє збереженню кольорів. Запропоновано підхід для утримання значень пікселів, які обробляються, у допустимому діапазоні, що дозволяє краще зберегти деталі зображення. Для оцінки карти пропускання використовуються частотні фільтри. В модифікованому методі оцінка щільності туману виконується з використанням нейронної мережі.

Результати. Запропоновано метод видалення туману та димки з одиночних зображень, який ефективно покращує видимість об'єктів, зберігає деталі та кольори на зображенні, а також його модифікація з іншим способом оцінки щільності туману. Представлені методи були реалізовані в комп'ютерній системі [1].

Висновки. Запропонований метод та його модифікація ефективно видаляють туман та димку з одиночних зображень, покращуючи розрізнюваність об'єктів на них. Реалізація цих методів у комп'ютерній системі обробки зображень [1] розширила функціонал системи та збільшила її можливості по підвищенню якості зображень, отриманих в умовах поганої видимості. Система може бути застосована для попередньої обробки зображень з метою запобігання помилкам в подальшій роботі алгоритмів комп'ютерного зору.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: обробка зображень, видалення туману та димки, модель туману, покращення видимості, карта пропускання, оцінка атмосферного світла.

АБРЕВІАТУРИ

CUS – запропонований метод видалення туману;
CUSD – модифікація запропонованого методу з використанням нейронної мережі;
dB – децибел;
DCP – метод апіорного темного каналу;
DCP&CLANE – метод темного каналу з використанням контрастно-обмеженої еквалізації гістограми та адаптивної гамма-корекції;
DFP – дискретне перетворення Фур'є;
DSP – метод видалення туману в реальному часі;
EmguCV – бібліотека комп'ютерного зору;
HSI – колірна модель: Hue – тон, Saturation – насиченість, Intensity – значення інтенсивності;
HSV – колірна модель: Hue – тон, Saturation – насиченість, Value – значення інтенсивності;
MCP – метод апіорного медіанного каналу;
OpenCV – бібліотека комп'ютерного зору;
PSNR – метрика якості, пікове відношення сигналу до шуму;
RGB – колірна модель: R – червоний канал, G – зелений, B – синій;

SSIM – метрика якості: індекс структурної схожості двох зображень;

YUV – колірна модель: Y – компонента яскравості, U та V – компоненти кольору.

НОМЕНКЛАТУРА

A – атмосферне світло;
 c – колірний канал в моделі RGB;
 $D(u, v)$ – відстань від точки (u, v) до початку координат частотного прямокутника;
 D_0 – параметр фільтру Баттерворта;
 $F(u, v)$ – результат Фур'є-перетворення в точці (u, v) ;
 $G_n(u, v)$ – результат застосування низькочастотного фільтру в точці (u, v) ;
 $G_e(u, v)$ – результат застосування високочастотного фільтру в точці (u, v) ;
 $H_n(u, v)$ – фільтр низьких частот;
 $H_e(u, v)$ – фільтр високих частот;
 i – уявна одиниця, $i = \sqrt{-1}$;

I – вихідне зображення з туманом або димкою;

$I^c(x)$ – інтенсивність колірної каналу c у пікселі x вихідного зображення;

$I^Y(x)$ – значення інтенсивності (Y-складової колірної моделі YUV) у пікселі x вихідного зображення;

$I^6(x)$ – інтенсивність зображення в пікселі x після високочастотної фільтрації;

$I^H(x)$ – інтенсивність зображення в пікселі x після низькочастотної фільтрації;

$\hat{I}(x)$ – інтенсивність зображення в пікселі x після фільтрації;

J – відновлене зображення з покращеною видимістю;

$J^c(x)$ – інтенсивність колірної каналу c у пікселі x відновленого зображення;

$m \times n$ – розмір матриці вихідного зображення;

$M \times N$ – розмір збільшеної матриці зображення;

p – порядок фільтру Баттерворта;

t – карта пропускання;

t_{\min} – мінімальне значення карти пропускання;

t_{\max} – максимальне значення карти пропускання;

$\hat{t}(x)$ – карта пропускання, перерахована на діапазон $[0; 255]$;

t_0 – обмеження карти пропускання знизу;

th – пороговий коефіцієнт для покращення кольорів та контрасту;

(u, v) – координати у частотній області;

V – компонента яскравості вихідного зображення в колірній моделі HSV;

\hat{V} – перерахована компонента яскравості обробленого зображення в колірній моделі HSV;

x – піксель зображення.

ВСТУП

Несприятливі погодні умови, такі як туман, димка, пил, погіршують якість зображень, отриманих поза приміщеннями. Поява артефактів на таких зображеннях призводить до небажаних проблем та помилок в роботі алгоритмів комп'ютерного зору, які використовуються в системах відеоспостереження, розпізнавання, виявлення об'єктів, сегментації зображень тощо. Тому важливим етапом в роботі практично будь-якої системи аналізу зображень або комп'ютерного зору є попередня обробка, яка відіграє ключову роль у підвищенні якості подальшого розпізнавання, аналізу та інтерпретації графічних даних. Однією із задач, яка розв'язується на цьому етапі, є поліпшення розрізнованості об'єктів на цифрових зображеннях, отриманих в умовах недостатньої видимості, шляхом видалення туману та димки. В туманних погодних умовах контраст та колір зображення різко погіршуються. Рівень погіршення якості збільшується разом з відстанню від камери до об'єкта. Складність задачі видалення туману полягає в тому, що туман залежить від

© Сердюк М. Є., Беркут В. Г., Сірик С. Ф., 2019
DOI 10.15588/1607-3274-2019-4-16

невідомої інформації про глибину сцени. Ефект туману – це функція відстані між камерою та об'єктом. Отже, видалення туману потребує оцінки карти глибини зображення. Крім того, відновлення яскравості пікселів при видаленні туману часто супроводжується спотворенням точності передачі кольорів. Тому актуальною є розробка та вдосконалення підходів до розв'язання даної задачі, які направлені на знаходження способів правильного оцінювання присутності та видалення туману зі збереженням деталей та кольорів зображення.

Об'єктом дослідження є процес покращення видимості на цифрових зображеннях, отриманих в умовах поганої видимості.

Предметом дослідження є математичні моделі та методи для видалення туману та димки з цифрових зображень.

Метою даної роботи є пошук ефективних підходів до розв'язання задачі видалення туману та димки із зображення та використання їх в комп'ютерній системі обробки цифрових зображень.

Дана робота є продовженням проекту з розробки програмного забезпечення для покращення якості цифрових зображень шляхом видалення різного роду плям природного походження на них. На першому етапі були реалізовані функції виявлення та видалення тіней [1].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основною причиною погіршення якості зображень, що містять сцени на відкритому повітрі в умовах туманних кліматичних умов, є розсіювання більшої частини світла до моменту його досягнення камери через наявність великої кількості розсіяних частинок в повітрі (наприклад, туману, диму або частинок інших речовин). Математично цей процес виражається моделлю формування зображення, яка часто зустрічається в задачах обробки затуманених зображень [2, 3]. Через атмосферні частинки, які поглинають і розсіюють світло, тільки певний відсоток відбитого світла досягає спостерігача. Інтенсивність $I(x)$ пікселя x затуманеного зображення є результатом дії двох основних адитивних компонентів – прямого ослаблення та світла повітря. В кожному колірному каналі $c \in \{R, G, B\}$ такого зображення інтенсивність пікселя може бути представленою у вигляді:

$$I(x) = J(x) \cdot t(x) + A \cdot (1 - t(x)). \quad (1)$$

Перший доданок у правій частині формули (1) є прямим ослабленням, яке описує випромінювання сцени та його загасання в середовищі. Другий доданок – світло повітря, отримується від раніше розсіяного світла, результат його дії – зміщення кольорів.

Карта пропускання $t(x) \in [0; 1]$ для кожного пікселя x вихідного зображення описує частину світла, яка не розсіюється і досягає камери. Тобто карта пропускання несе оцінку щільності туману для кожного пікселя затуманеного зображення.

Задача полягає у відновленні J – вільного від туману зображення – із I .

Складність задачі відновлення J визначається тим, що атмосферне світло A та карта пропускання $t \in$ також невідомими.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Існують різні підходи до розв'язання задачі покращення видимості на зображеннях, спотворених туманом або димкою. Можна виділити дві основні групи методів обробки затуманених зображень: методи, які не використовують фізику процесу передачі світла в атмосфері, та методи, основані на фізичній моделі туману.

Методи першої групи спрямовані на поліпшення зображень шляхом відновлення контрасту. Для цього використовуються просторові фільтри, вирівнювання гістограм та інші перетворення, як покращують візуальне сприйняття зображення. В роботі [4] автор, аналізуючи множину зображень, отриманих зовні приміщень, відзначає, що контраст незатуманених зображень значно вище, ніж зображень з помутніннями, викликаними туманом та димкою, а світло навколишнього середовища, що у великій степені залежить від відстані об'єктів до спостерігача, має схильність бути розмитим. На основі таких спостережень автор пропонує метод видалення туману, який базується на максимізації локального контрасту зображень з помутніннями. Такий метод може забезпечити хороший візуальний ефект, але він не відновлює реальний контраст сцени у відповідності до моделі передачі атмосфери, тому результати можуть бути перенасиченими та неприродними.

В роботі [5] розглядається метод відновлення затуманених зображень, оснований також на підвищенні контрастності. Автори відзначають, що просте підвищення контрастності супроводжується втратою інформації, що є наслідком переповнення або недостатнього заповнення значень пікселів. Тому видалення туману пропонується здійснювати шляхом мінімізації функції вартості, яка враховує контраст і втрату інформації. Такий підхід дозволив оптимальним чином підвищити контраст та зберегти інформацію на зображенні. Крім того, було запропоновано розширення алгоритму видалення туману зі статичних зображень для роботи з відео, що поступає на вхід в режимі реального часу. Проте метод погано адаптується до зображень з різним ступенем помутніння та не може ефективно видаляти щільні помутніння у відео.

У роботі [6] автори запропонували метод відновлення видимості на одному зображенні, базуючись на медіанному фільтрі для видалення туману або димки. Метод має високу швидкодію, може працювати в режимі реального часу, видаляє помутніння в значній мірі, але спричиняє появу ореолів та порушення кольорів.

У роботі [7] представлено метод видалення туману, який спирається на загальну закономірність в при-

родних зображеннях, отриманих на відкритому повітрі, де пікселі невеликих ділянок зображення зазвичай мають одномірний розподіл в колірному просторі RGB, відомий як кольорові лінії. Автор представив локальну структурну модель для кольорових ліній в туманних сценах і використав її для відновлення сцени. Для отримання повної і збалансованої карти оцінки шуму і розсіювання була використана марковська модель випадкового поля.

В основі методу покращення розпізнаваності деталей на затуманених зображеннях, представленому в [8], лежить модифікований алгоритм Retinex з автоматичним визначенням декількох рівнів інтенсивності, використовуючи які можна освітлити або затемнити зображення. При обробці зображення, визначаються просторові області з однаковою інтенсивністю та локальним контрастом по кожному колірному каналу. Пікселі, що являються близькими до цих рівнів інтенсивності, особо обробляються для того, щоб виявити деталі, які могли бути невидимими для людського зору. Кожен ідентифікований рівень отримує свою вагу відповідно до його поширеності. Результати демонструють потужність даного підходу на широкому спектрі тестових випадків.

У [9, 10] запропоновано метод, в якому розмиття туману здійснюється за допомогою розрахунку повітряно-світлового потоку. Представлений алгоритм базується на припущенні, що зображення без помутніння добре апроксимуються декількома сотнями різних кольорів, які утворюють щільні кластери у просторі RGB. Алгоритм добре працює на широкому колі зображень, проте він приймає кожен кадр у відео як окреме зображення і повністю базується на методах розмиття зображень.

Є методи, які базуються на порівнянні декількох зображень, отриманих в різних погодних умовах [11, 12]. Такі методи заздалегідь мають отримати прийняття зображення, що збільшує складність отримання незатуманених зображень.

Існують алгоритми видалення туману, які використовують моделі, що базуються на фізиці розсіювання світла в атмосфері. Для оцінки щільності туману чимало методів використовують явище апіорного темного каналу. Теорія апіорного темного каналу базується на статистиці зображень на відкритому повітрі, що не містять туману. Для більшості локальних областей на зображеннях, які не містять неба, часто деякі пікселі мають дуже низьку інтенсивність хоча б по одному каналу в RGB зображенні. На затуманеному зображенні інтенсивність цих темних пікселів по цьому каналу в основному визначається світлом неба. Тому темні пікселі можуть безпосередньо дати змогу точно оцінити ступінь щільності туману. Так, в [2] представлено метод на основі моделі візуалізації туману, який дозволяє оцінити ступінь щільності туману та відновити якісне незатуманене зображення. При цьому будується хороша карта глибини. Даний підхід правильний з фізичної точки зору і здатний обробляти віддалені об'єкти навіть на сильно затуманених зо-

браженнях. Метод не опирається на значні перепади щільності або затінення поверхонь у вхідному зображенні. Однак результат може містити декілька ореолів. Як і будь-який підхід, що використовує строге припущення, цей підхід також має свої власні обмеження. Темний канал може бути непридатним, якщо об'єкт сцени за своєю суттю аналогічний світлу атмосфері на великій локальній області (наприклад, автомобільні фари, засніжена поверхня тощо), і на об'єкти не падають тіні.

В [2] метод темного каналу комбінується з методом м'якого матування для уточнення карти передачі, що викликає велике обчислювальне навантаження. В [13] пропонується метод керуючого фільтра для зменшення обчислювальних витрат. Керований фільтр може використовуватися як оператор розмиття, який зберігає риси границь на зображенні і може краще використовувати структури в оброблюваному зображенні. У [14] запропоновано вдосконалений підхід для видалення туману з одного зображення шляхом комбінування темного каналу та керованої фільтрації зображення. Запропоновано ефективну схему адаптації радіуса локальних областей, що використовується при отриманні темного каналу, та радіуса керованого фільтра. Оброблені зображення мають задовільну якість, однак метод видає помилкові результати у випадку з зображеннями, що мають різкі зміни в глибині сцени.

У [15] безтуманне зображення отримується через оцінку шарів туману на основі медіанної фільтрації із застосуванням методу темного каналу. Результатом є покращений розмитий шар разом з приглушеними текстурами та збереженими переходами глибини на зображенні. Алгоритм є простим та ефективним способом для «очищення» зображення та покращення контрасту.

Видалення туману з використанням темного каналу часто супроводжується спотворенням кольорів в області неба та яскравих регіонів. Для вирішення цієї проблеми в [16] запропоновано покращений метод, який базується на інверсному зображенні та темному каналі. Інверсне зображення застосовується для оцінки нової карти передачі, яка використовується для зміни вихідної карти, щоб уникнути спотворення кольорів. Потім карта уточнюється з використанням керуючого фільтра.

У роботі [17] розглядається ефективний метод видалення помутніння з одного вхідного зображення, який будує карту передачі шляхом видалення дрібних деталей із мінімального з каналів RGB за допомогою низькочастотного фільтра. Далі карта уточнюється з використанням каналу інтенсивності кольорного простору HSI та локального контрасту. На основі моделі розсіювання світла в атмосфері генерується якісне зображення без димки. Проте на зображеннях з щільним туманом помутніння видаляється не повністю.

Аналіз існуючих підходів, які використовують фізику процесу утворення туману, дозволяє виділити основні етапи розв'язання задачі:

- 1) оцінка карти пропускання;
- 2) оцінка атмосферного світла;
- 3) видалення туману.

В деяких підходах для покращення результатів використовується етап попередньої та (або) післяобробки. В цих випадках якість результатів підвищується, але зменшується швидкодія.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В даній роботі пропонується метод CUS видалення туману зі збереженням деталей зображення з урахуванням фізичної моделі туману. Затуманене зображення I описується формулою (1). Коли карта пропускання близька до нуля, то перший доданок у формулі (1) теж буде близьким до нуля. Оскільки відновлена інтенсивність сцени J схильна до шуму, то карту пропускання обмежують нижньою границею t_0 та зберігають деяку кількість туману в дуже щільних областях туману, як пропонується у [2]. Зазвичай $t_0 = 0,1$. З урахуванням цього з формули (1) випливає, що

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t_0, t(x))} + A. \quad (2)$$

Для того, щоб відновити шукане зображення J , необхідно отримати оцінку карти пропускання t та оцінку атмосферного світла A . Зауважимо, що A – це константа, яка обчислюється глобально для зображення I .

На практиці застосування формули (2) для видалення туману часто призводить до небажаних артефактів, які з'являються у результаті роботи з неточною картою пропускання. Під неточною картою пропускання розуміється зображення, отримане на основі вихідного зображення, емпіричні значення якого повністю не відповідають теоретичним, тобто не враховується емпірична природа $t(x)$. Наприклад, при розрахунках можна отримати значення інтенсивності поза межами допустимого діапазону $[0; 255]$. Виникає питання, як скорегувати отримане значення, щоб не спотворити кольори та саме вихідне зображення. В даній роботі пропонується підхід, який дозволяє плавно зменшити інтенсивність затуманених пікселів та утримати значення зображення у допустимому діапазоні, що дозволяє краще зберегти деталі зображення.

Метод CUS передбачає виконання трьох етапів, визначених вище.

Першим етапом є побудування карти пропускання. Для реалізації оцінки карти пропускання в даній роботі використовуються ідеї із [18]. Процедура побудування карти пропускання складається з таких кроків:

1. У вхідному зображенні виділяється складова інтенсивності за формулою

$$I^Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$$

як Y -складова колірної моделі YUV [19]. Саме на основі аналізу цієї складової будується карта пропускання. Результатом є матриця інтенсивностей $[I_{jk}^Y]$, $j = 1, 2, \dots, m$, $k = 1, 2, \dots, n$.

2. Матриця інтенсивностей збільшується за розміром у два рази з використанням лінійної інтерполяції. Новий розмір матриці $M \times N$, де $M = 2m$, $N = 2n$. Парність розмірів матриці необхідна для подальшого застосування DFT та спрощення комп'ютерної реалізації. Всі елементи матриці множаться на $(-1)^{j+k}$ для того, щоб Фур'є-перетворення було центрованим, тобто початок координат (0, 0) знаходився у центрі частотного прямокутника.

3. До збільшеної матриці інтенсивностей застосовується пряме DFT [20]:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} I_{jk}^Y e^{-i2\pi(uj/M + vk/N)},$$

де $j = 0, 1, \dots, M-1$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, тобто здійснюється перехід до частотної області. Відомо, що частоти у Фур'є-перетворенні зв'язані з варіацією інтенсивності на зображенні. Частотна складова, що змінюється найповільніше ($u=0$, $v=0$), співпадає із середньою інтенсивністю зображення. Низькі частоти, що відповідають точкам поблизу початку координат Фур'є-перетворення, визначають компоненти зображення, що змінюються повільно. По мірі віддалення від початку координат більш високі частоти починають відповідати все більш швидким змінам інтенсивності, що уявляють собою межі об'єктів та інші деталі зображення, які характеризуються різкими змінами яскравості, наприклад шум на зображенні.

4. Застосовується фільтр низьких частот Баттерворта порядку p з частотою зрізу на відстані D_0 від початку координат [20]:

$$H_n(u, v) = \frac{1}{1 + [D(u, v) / D_0]^{2p}},$$

в якому відстань від точки (u, v) до початку координат визначається за формулою

$$D(u, v) = [(u - m)^2 + (v - n)^2]^{1/2}.$$

Зауважимо, що в комп'ютерній реалізації даного етапу було використано такі значення параметрів фільтра Баттерворта: $p=1$, $D_0=30$.

Результат низькочастотної фільтрації отримується таким чином:

$$G_n(u, v) = H_n(u, v) \cdot F(u, v).$$

Множення матриць H_n і F здійснюється поелементно. Відзначимо, що низькочастотна фільтрація пригнічує високочастотні складові, зокрема шум, та створює згладжене зображення.

5. Застосовується зворотне DFT [20]:

$$I_{jk}^H = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G_n(u, v) e^{i2\pi(uj/M + vk/N)},$$

результатом якого є матриця $[I_{jk}^H]$ розміром $M \times N$. Виділяється дійсна частина результату, всі елементи матриці множаться на $(-1)^{j+k}$, щоб компенсувати ефект від множення зображення на ту ж саму величину. Здійснюється повернення до вихідних розмірів матриці, тобто її розміри зменшуються вдвічі.

6. За аналогією до матриці $[I_{jk}^Y]$ застосовується фільтр високих частот Баттерворта порядку p з частотою зрізу на відстані D_0 від початку координат [20]:

$$H_g(u, v) = \frac{1}{1 + [D_0 / D(u, v)]^{2p}}.$$

Результатом високочастотної фільтрації є матриця:

$$G_g(u, v) = H_g(u, v) \cdot F(u, v).$$

Високочастотна фільтрація пригнічує низькочастотні компоненти та генерує зображення з покращеними краями.

7. До отриманої матриці застосовується зворотне DFT:

$$I_{jk}^g = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} G_g(u, v) e^{i2\pi(uj/M + vk/N)},$$

результатом якого є матриця $[I_{jk}^g]$ розміром $M \times N$. Аналогічно виділяється дійсна частина результату, всі елементи матриці множаться на $(-1)^{j+k}$, розмір матриці зменшується вдвічі.

8. Результуюча матриця інтенсивностей розраховується як сума двох отриманих матриць:

$$\hat{I}(x) = I^H(x) + I^g(x).$$

9. Далі із значень матриці \hat{I} отримують карту пропускання

$$t(x) = 1 - \hat{I}(x) / 255.$$

Зазначимо, що для візуалізації карти пропускання в комп'ютерній системі було здійснено масштабування $t(x)$ у діапазон $[0; 255]$ з розтягуванням значень на весь відрізок:

$$\hat{t}(x) = \frac{t(x) - t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}} \cdot 255.$$

На наступному етапі оцінюється атмосферне світло. Для цього вхідне зображення спочатку конвертується в колірний простір HSV, в якому компонента V несе інформацію про яскравість пікселя. Метод перетворення зображення із колірної моделі RGB в HSV та навпаки описано, наприклад, в [19]. Далі відбираються 0,1% найяскравіших пікселів в $\hat{I}(x)$. Ці пікселі відповідають найщільнішим областям туману. З отриманих пікселів відбирається один, який відпові-

дає пікселю на вихідному зображенні з найбільшою яскравістю (канал V). Його значення обирається в якості значення атмосферного світла A .

Наступним етапом є видалення туману. Для цього пропонується підхід, який дозволяє уникнути виходу значень пікселів за межі допустимого діапазону, що може спричинити появу артефактів та зміщення кольорів. Будемо застосовувати процедуру видалення туману лише для компоненти яскравості V вхідного зображення, а кольори будемо вирівнювати на останньому етапі. Лише для каналу V застосуємо формулу, яка побудована емпіричним шляхом з урахуванням (2):

$$\hat{V} = V + (V - A) \cdot (1 - \max(t_0, t)). \quad (3)$$

Пояснимо сенс другого доданка. Різниця між яскравістю пікселя та атмосферним світлом $(V-A)$ майже завжди від'ємна. Множник $(1 - \max(t_0, t))$, який по суті є інверсією карти пропускання, дозволяє врахувати щільність туману та додавати до V лише частину значення $(V-A)$. Тобто корегування значення V на величину другого доданку формули (3) призводить до вирівнювання яскравості пікселя таким чином: для областей з більш щільним туманом інтенсивність зменшується сильніше, для менш затуманених – слабкіше. Отже, значення $(V-A)$ можна розглядати як адаптивну величину, на яку слід відкоригувати V з урахуванням щільності туману в конкретному пікселі. Якщо результуюче значення яскравості \hat{V} виходить за межі інтервалу $[0; 255]$, другий доданок у формулі (3) зменшується на 25%, поки не буде отримано коректне значення. Таким чином досягається плавне зменшення інтенсивності V пікселя у просторі HSV та не допускається вихід цього значення за межі діапазону.

Далі здійснюється повернення до колірному простору RGB. Метод конвертації можна знайти у [19]. Для отримання результуючого зображення виконується ще одне перетворення, спрямоване на покращення кольорів та контрасту, за правилом [21]:

$$J^c = \left(\left(\left(\frac{I^c}{255} - 0,5 \right) \left(\frac{100 + th}{100} \right)^2 \right) + 0,5 \right) \cdot 255.$$

Поріг th є таким, що налаштовується, за замовчуванням $th = 10$.

На основі описаного методу пропонується ще одна модифікація для видалення туману CUSD, яка дозволяє отримати якісні результуючі зображення. В ході аналізу різних методів видалення туману було помічено, що ключову роль в цьому процесі відіграє оцінка товщини туману (карта пропускання), а також післяобробка, яка здатна значно покращити результат. Оскільки, як слідує з моделі формування туману, туман стає щільнішим зі збільшенням відстані від об'єкта до камери, то можна припустити, що в якості оцінки товщини туману можна використовувати карту глибини сцени. Для оцінки глибини сцени на одному зображенні (без залучення додаткових зобра-

жень) в даній роботі використовується підхід на основі машинного навчання, описаний в [22]. Автори запропонували нейронну мережу, розроблену на мові Python, з використанням бібліотеки Tensorflow 1.0 для машинного навчання, яка здатна оцінювати глибину сцени з одного зображення. Код для даного методу знаходиться у відкритому доступі на GitHub під ліцензією «UCLB ACP-A», що дозволяє безкоштовне використання даного програмного продукту в некомерційних цілях. Отже, в методі, що розглядається, оцінка глибини сцени здійснюється за допомогою нейронної мережі. Для подальшого видалення туману застосовуються кроки методу CUS, розглянуті вище.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Описані вище методи реалізовані в комп'ютерній системі [1] як ще одна група функцій обробки зображень на додаток до виявлення та видалення тіней (різні методи), кластеризації, обробки границь. Програма розроблена на мові C# з використанням бібліотеки комп'ютерного зору EmguCV, яка є кросплатформеною .Net огорткою бібліотеки OpenCV.

Крім запропонованого методу CUS та його модифікації CUSD з використанням нейронної мережі, в комп'ютерній системі були додатково реалізовані такі методи видалення туману:

1) метод апріорного темного каналу (DCP) на основі ідей, викладених у [2];

2) метод апріорного медіанного каналу (MCP), представлений у [3];

3) метод темного каналу з використанням контрастно-обмеженої еквалізації гистограми та адаптивної гамма-корекції (DCP&CLAHE), що описано у [23];

4) видалення туману (DSP), орієнтоване на виконання у реальному часі на цифрових сигнальних процесорах, на основі ідей, викладених у [24].

Реалізація цих методів дозволила провести порівняльний аналіз результатів обробки зображень цими методами з результатами, отриманими запропонованим методом та його модифікацією. Крім того, реалізація багатьох методів розширила функціонал системи.

Програма має віконний інтерфейс та містить декілька меню для вибору способу та методу обробки зображення. Графічні засоби керування програмою згуртовані в панелі відповідно до свого призначення. Основне вікно має три області для відображення вхідного, проміжного та результуючого зображень. Програма надає можливість виводу додаткових вікон з проміжними зображеннями, які отримуються в процесі роботи того чи іншого методу. Таким чином можна побачити, які кроки обробки проходить зображення перед отриманням остаточного результату. Передбачені також додаткові методи обробки, які можуть покращити результати основної обробки.

Порівняння результатів роботи різних методів видалення туману між собою здійснювалось як візуально, так і за допомогою формальних метрик якості. Для розрахунку метрик використовувалась база зображень FRIDA [25], яка була створена для перевірки роботи

алгоритмів видалення туману та відновлення контрасту. База даних містить набір оригінальних зображень без туману, карту глибини та чотири затуманених зображення з різними видами туману для кожного оригіналу. Отже, для розрахунку формальних метрик якості в роботі використовувались тестові зображення без туману та результати видалення туману різними методами.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Представлені в роботі методи були протестовані на низці зображень. Результат обробки методом CUS із збереженням деталей зображення представлений на рис. 1.

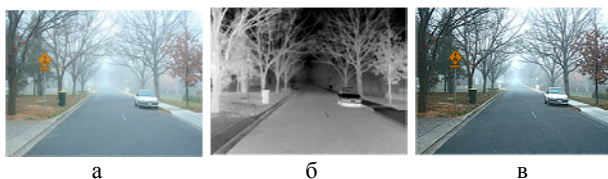


Рисунок 1 – Приклад обробки зображення методом CUS: а – вихідне зображення, б – карта пропускання, в – результуюче зображення

Результат видалення туману методом CUSD представлений на рис. 2.

На рис. 3 наведено результати видалення туману на трьох тестових зображеннях різними методами.

Для порівняння зображень, отриманих в результаті обробки різними методами видалення туману, з оригінальними зображеннями без туману були використані формальні метрики якості PSNR, SSIM та ентропія Шеннона.

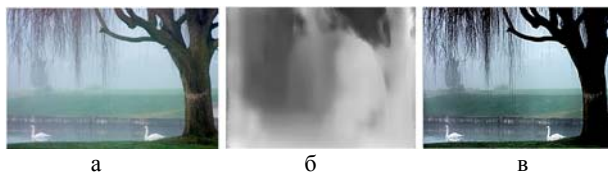


Рисунок 2 – Приклад обробки зображення методом CUSD: а – вихідне зображення, б – карта пропускання, отримана за допомогою нейронної мережі, в – результуюче зображення

Метрика PSNR – пікове відношення сигналу до шуму, характеризує співвідношення між максимумом можливого значення сигналу та потужністю шуму, що спотворює значення сигналу. Більші значення PSNR відповідають меншим відмінностям зображень, що порівнюються.

Метрика SSIM – індекс структурної схожості двох зображень. Значення SSIM знаходиться в межах від -1 до +1. Значення +1 досягається при повному співпадінні зображень.

Ентропія – це міра невизначеності випадкової величини. Чим більший випадковий характер інтенсивності пікселів, тим більше ентропія у зображення. Низька ентропія означає низьку контрастність зобра-

ження. Ентропія розраховується для результуючого зображення, щоб оцінити рівень контрасту для різних методів.

У таблиці 1 наведено результати розрахунків формальних метрик якості для зображень, оброблених різними методами. В таблиці представлені середні значення по набору протестованих зображень.

Таблиця 1 – Результати розрахунків метрик якості

| Метод видалення туману | PSNR | SSIM | Ентропія Шеннона |
|------------------------|-------|------|------------------|
| DCP | 38,92 | 0,77 | 6,65 |
| MCP | 38,59 | 0,74 | 6,52 |
| DCP&CLANE | 39,17 | 0,70 | 6,90 |
| DSP | 38,08 | 0,77 | 6,67 |
| CUS | 36,67 | 0,76 | 6,45 |
| CUSD | 37,04 | 0,73 | 6,52 |

6 ОБГОВОРЕННЯ

В результаті тестування запропонованих методів на низці зображень з туманом різного характеру було виявлено, що найкраще ці методи справляються з видаленням димки та негустого туману. При цьому результуючі зображення мають досить високу якість, контраст, окремі деталі добре розрізняються. Але при застосуванні цих методів до сильно затуманених зображень часто спостерігаються перепади контрасту та деякі зміщення кольорів сцени.

Візуальне порівняння якості результатів видалення туману запропонованими методами з результатами роботи інших методів демонструє, що найкраще видимість поліпшується при застосуванні методів CUS та DCP&CLANE. Результуючі зображення часто виходять дуже різкими, з підвищеним контрастом, що дозволяє краще розрізнити об'єкти сцени. Непогані за візуальною якістю результати дає і метод CUSD. Але треба відзначити, що цей метод не підходить для програмних додатків, що працюють в реальному часі, оскільки час роботи нейронної мережі порівняно високий.

Порівняння формальних показників якості розглянутих методів дає неоднозначні результати. Так, за метрикою PSNR запропоновані методи CUS та CUSD демонструють дещо нижчі результати, ніж інші розглянуті методи. Але значення метрики перевищує 30 dB, що є хорошим показником. За метрикою SSIM метод CUS демонструє найкращі результати поряд з методами DCP та DSP. Дещо нижчий показник дає метод CUSD. Варто відзначити, що метрика SSIM більше відповідає візуальному сприйняттю зображення людиною, ніж PSNR. Саме в термінах метрики SSIM запропонований метод CUS показав один з найкращих результатів обробки затуманених зображень.

Якщо порівняти показники ентропії, то методи CUS та CUSD отримали менші у порівнянні з іншими методами значення. Це пояснюється тим, що запропоновані методи виконують «м'яку» обробку зображень зі збереженням деталей на ньому, отже показник контрастності (ентропія) виходить меншим у порівнянні з іншими методами.

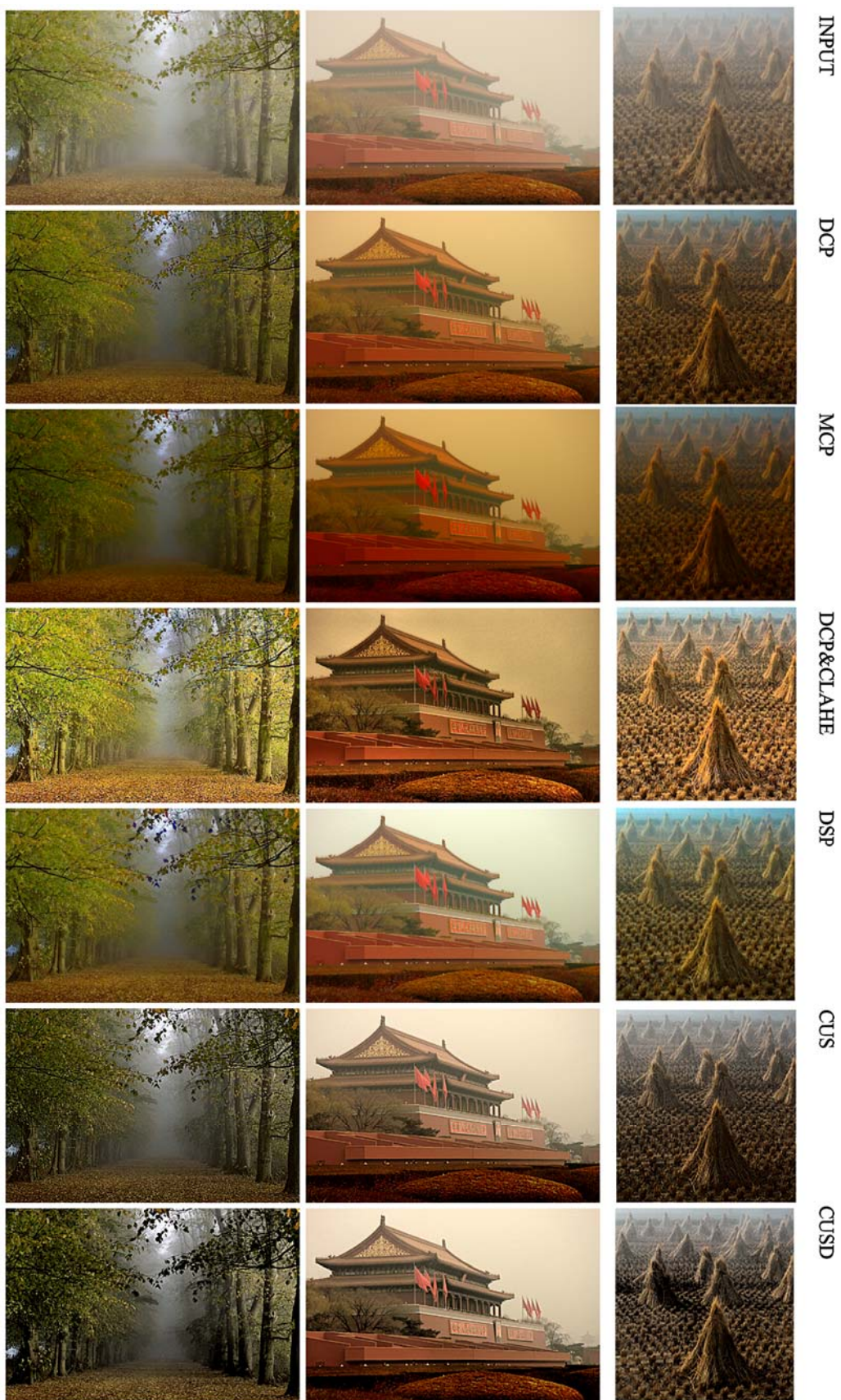


Рисунок 3 – Результати видалення туману різними методами

Відзначимо, що для об'єктивності аналізу запропонованого методу для результуючих зображень не застосовувались додаткові процедури їх післяобробки. Використання процедур попередньої та післяобробки дозволить ще підвищити якість оброблених зображень.

ВИСНОВКИ

Алгоритми видалення туману із цифрових зображень є затребуваними в багатьох задачах комп'ютерного зору. Аналіз існуючих методів показав, що немає єдиного універсального підходу для покращення видимості, який би однаково добре працював на всіх типах затуманених зображень. В даній роботі запропоновано метод видалення туману з покращенням збереження деталей та кольорів та його модифікація з використанням нейронної мережі.

Запропоновані методи разом з чотирма іншими розглянутими методами були додані в комп'ютерну систему обробки зображень з метою видалення різних плям та спотворень природного походження [1], що значно розширило функціонал системи. В залежності від типу зображення, спотвореного туманом, можна обирати метод, який дасть найкращі результати.

Наукова новизна полягає в розробці методу видалення туману та димки, який зберігає деталі зображення та не спотворює кольори. Запропоновано підхід, який дозволяє плавно зменшити інтенсивність затуманених пікселів та утримати значення зображення у допустимому діапазоні, що сприяє кращому збереженню деталей зображення. Основні етапи обробки виконуються на каналі інтенсивності, що сприяє збереженню кольорів. Запропоновано модифікацію методу, в якій оцінка щільності туману виконується з використанням нейронної мережі.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований метод дозволяє отримати якісні зображення після видалення з них туману та димки, зі збереженням деталей та кольорів на зображенні, тому його можна використовувати для попередньої обробки зображень в різних задачах комп'ютерного зору, а також в естетичних цілях, наприклад, у споживчій фотографії.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи кафедри комп'ютерних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара «Дослідження математичних моделей фізичних процесів методами ідентифікації та рекурентного аналізу із застосуванням інформаційних технологій» (шифр 0113U004203, період дії теми: 01.01.2016 – 31.12.2018, шифр 0119U101053, 01.01.2019 – 31.12.2021).

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Сердюк М. Є. Комп'ютерна система локалізації та видалення тіней у цифрових зображеннях / М. Є. Сердюк, В. Г. Беркут // Радіоелектроніка, інформатика, управління. –

2017. – №2(41). – С. 127–133. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-14
2. He K. Single image haze removal using dark channel prior / K. He, J. Sun, X. Tang // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. – Dec. 2011. – Vol. 33, No. 12. – P. 2341–2353. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168
3. Kang Hyun-Jin. Fast Removal of Single Image using Pixel-based Median Channel Prior / Hyun-Jin Kang, Young-Hyung Kim, Yong Hwan Lee // I. J. Advanced Science and Technology Letters. – 2015. – Vol. 98. – P. 124–127. DOI: 10.14257/astl.2015.98.31
4. Tan R. T. Visibility in bad weather from a single image / R. T. Tan // Proceedings of the 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '08). – Anchorage, Alaska. – 2008. – P. 1–8.
5. Kim J.-H. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing / J.-H. Kim, W.-D. Jang, J.-Y. Sim, C.-S. Kim // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 2013. – Vol. 24, No. 3. – P. 410–425. DOI: 10.1016/j.jvcir.2013.02.004
6. Tarel J. P. Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image / J. P. Tarel, N. Hautiere // Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision. Kyoto, Japan. – 2009. – P. 2201–2208. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459251
7. Fattal R. Dehazing Using Color-Lines / Raanan Fattal // ACM Transactions on Graphics. – 2014. – Vol. 34, No. 1. – P. 13. DOI: 10.1145/2651362
8. Livingston M. A. Image Processing for Human Understanding in Low-visibility / Mark A. Livingston, Caelan R. Garrett, Zhuming Ai // Information Technology Division, Naval Research Laboratory. – 2011. – P. 1–9.
9. Berman D. Non-Local Image Dehazing / D. Berman, T. Treibitz, S. Avidan // Proceedings of the CVPR Computer Vision and Pattern Recognition; Las Vegas, NV, USA. – 2016. – P. 1674–1682. DOI: 10.1109/CVPR.2016.185
10. Berman D. Air-light Estimation using Haze-Lines / D. Berman, T. Treibitz, S. Avidan // Proceedings of the IEEE 13th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing; Stanford, CA, USA. – 2017. – P. 5178–5191. DOI: 10.1109/ICCPHOT.2017.7951489
11. Narasimhan S. G. Removing weather effects from monochrome images / S. G. Narasimhan, S. K. Nayar // Proceedings of the CVPR Computer Vision and Pattern Recognition; Kauai, HI, USA. – 2001. – P. 186–193. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990956
12. Chen G. A Novel Physics-based Method for Restoration of Foggy Day Images / G. Chen, T. Wang, H. J. Zhou // Journal of Image and Graphics. – 2008. – Vol. 13, No. 5. – P. 888–893. DOI: 10.1109/SNPD.2007.350
13. He K. M. Guided image filtering / K. M. He, J. Sun, X. O. Tang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 35, No. 6. – P. 1397–1409. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213
14. Pang J. Improved single image dehazing using guided filter / J. Pang, O. C. Au, Z. Guo // In Proc. APSIPA ASC, Xi'an, China. – 2011. – P. 1–4.
15. Zhang Y.-Q. Visibility enhancement using an image filtering approach / Y.-Q. Zhang, Y. Ding, J.-S. Xiao, J. Liu, Z. Guo // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – Vol. 2012, Article 220. – 2012. – P. 1–6. DOI: 10.1186/1687-6180-2012-220
16. Shi L. Image Haze Removal Using Dark Channel Prior and Inverse Image / Lei Shi, Xiao Cui, Li Yang, Zhigang Gai, Shibo Chu, Jing Shi // International Conference on Measurement Instrumentation and Electronics 2016 (ICMIE 2016), Munich, Germany. – 2016. – P. 89–93. DOI: 10.1051/mateconf/20167503008
17. Fast Single Image Haze Removal Method based on Atmospheric Scattering Model / [D. Huang, W. Wang, J. Lu, K. Chen]

- // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51, Issue. 17. – P. 211–216. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.144
18. Kumari A. Real Time Visibility Enhancement for Single Image Haze Removal / A. Kumari, S. K. Sahoo // Proc. Int. Conf. on Information Processing (IMCIP). – 2015. – P. 501–507. DOI: 10.1016/j.procs.2015.06.057
19. Understanding Color Models: A Review / [Noor A. Ibraheem, Mokhtar M. Hasan, Rafiqul Z. Khan, Pramod K. Mishra] // ARPN Journal of Science and Technology, ISSN 2225-7217. – 2012. – Vol. 2, No. 3. – P. 265–275.
20. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений : пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
21. Esterhuizen D. C# How to: Image Contrast / D. Esterhuizen [Electronic resource]. – Access mode: <https://softwarebydefault.com/2013/04/20/image-contrast/>
22. Godard C. Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency / C. Godard, O. M. Aodha, G. Brostow [Electronic resource]. – Access mode: http://zfpascal.net/cvpr2017/Godard_Unsupervised_Monocular_Depth_CVPR_2017_paper.pdf
23. Arora T. Evaluation of a New Integrated Fog Removal Algorithm IDCP with CLAHE / Tarun A. Arora, Gurpadam B. Singh, Mandeep C. Kaur // International Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence, ISSN: 2321-404X. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 12–18.
24. Real Time Image Haze Removal on Multi-core DSP/ [L. Bai, Y. Wu, J. Xie, P. Wen] // 2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, APISAT2014. – 2014. – P. 244–252. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.532
25. Improved Visibility of Road Scene Images under Heterogeneous Fog / [J.-P. Tarel, N. Hautière, A. Cord et al.] // Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'10), San Diego, CA, USA, June 21–24, 2010. DOI:10.1109/IVS.2010.5548128

Стаття надійшла до редакції 13.06.2019.
Після доробки 18.10.2019.

УДК 004.932

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ВИДИМОСТИ НА ЗАТУМАНЕННЫХ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Сердюк М. Е. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных технологий Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, г. Днепр, Украина.

Беркут В. Г. – магистр по прикладной математике, выпускник факультета прикладной математики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, г. Днепр, Украина.

Сирик С. Ф. – ассистент кафедры компьютерных технологий Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, г. Днепр, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Присутствие на цифровых изображениях тумана и дымки может вызывать проблемы в процессах распознавания, отслеживания, классификации объектов. Поэтому методы удаления тумана и улучшения различимости объектов на изображениях, полученных в условиях плохой видимости, востребованы во многих задачах компьютерного зрения. В туманных погодных условиях контраст и цвет изображения резко ухудшаются. Удаление тумана часто сопровождается появлением артефактов на изображении и искажением цветов. Поэтому актуальным является поиск способов правильной оценки присутствия и удаления тумана с сохранением деталей и цветов изображения и разработка соответствующих методов обработки затуманенных изображений.

Цель. Целью работы является поиск эффективных подходов к решению задачи удаления тумана и дымки с цифровых изображений и реализация их в компьютерной системе обработки цифровых изображений [1].

Методы. Основные этапы обработки изображения выполняются на канале интенсивности, что способствует сохранению цветов. Предложен подход для удержания значений обрабатываемых пикселей в допустимом диапазоне, что позволяет лучше сохранить детали изображения. Для оценки карты пропускания используются частотные фильтры. В модифицированном методе оценка плотности тумана выполняется с использованием нейронной сети.

Результаты. Предложен метод удаления тумана и дымки из одиночных изображений, который эффективно улучшает видимость объектов, сохраняет детали и цвета на изображении, а также его модификация с другим способом оценки плотности тумана. Представленные методы были реализованы в компьютерной системе [1].

Выводы. Предложенный метод и его модификация эффективно удаляют туман и дымку из одиночных изображений, улучшая различимость объектов на них. Реализация этих методов в компьютерной системе обработки изображений [1] расширила функционал системы и увеличила ее возможность по повышению качества изображений, полученных в условиях плохой видимости. Система может быть использована для предварительной обработки изображений с целью предотвращения ошибок в дальнейшей работе алгоритмов компьютерного зрения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обработка изображений, удаление тумана и дымки, модель тумана, улучшение видимости, карта пропускания, оценка атмосферного света.

UDC 004.932

THE METHOD OF IMPROVING FOGGED IMAGES VISIBILITY AND ITS USING IN THE PROCESSING IMAGES COMPUTER SYSTEM

Serdiuk M. E. – PhD, Associate Professor of Computer Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine.

Berkut V. G. – Master of Applied Mathematics, graduate student of Applied Mathematics Faculty, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine.

Sirik S. F. – Assistant of Computer Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Presence of fog and haze on digital images may cause problems in processes of recognition, tracking, classification of objects. Thus methods for removing fog and improving visibility of objects in images obtained under poor visibility conditions are in demand in many computer vision problems. In foggy weather, contrast and color of an image get worse. Fog removal is often accompanied by artifacts in the image and color distortion. Therefore, it is relevant to seek methods for correct assessing presence and removal of fog while preserving image details and colors and developing appropriate methods for blurred images processing.

Objective. The purpose of this research is to find effective approaches to solving the problem of removing fog and haze from digital images and implementing them in a digital image processing computer system [1].

Method. Main stages of image processing are performed on the intensity channel, which helps to preserve colors. The proposed approach keeps the values of the processed pixels in an acceptable range, which allows better preservation of image details. Frequency filters are used to evaluate the transmission map. In a modified method, fog density is estimated using a neural network.

Results. The method of removing fog and haze from single image is proposed. This method effectively improves the objects visibility, preserves details and colors in the image. A modification of the method with another fog density estimation method is also proposed. The presented methods were implemented in a computer system [1].

Conclusions. The proposed method and its modification effectively remove fog and haze from single image and improve the objects distinguishability in them. The implementation of these methods in a computer image processing system [1] has expanded the functionality of the system and increased its ability to improve the quality of images obtained under poor visibility conditions. The system can be used for preliminary image processing to prevent errors in further operation of computer vision algorithms.

KEYWORDS: image processing, fog and haze removal, fog model, improved visibility, transmission map, atmospheric light evaluation.

REFERENCES

1. Serdiuk M. E., Berkut V. G. Kompiuterna sistema lokalizatsii ta vydalennia tinei u tsyfrovnykh zobrazhenniakh, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, №2(41), pp. 127–133. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-14
2. He K., Sun J., Tang X. Single image haze removal using dark channel prior, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Dec. 2011, Vol. 33, No. 12, pp. 2341–2353. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.168
3. Kang Hyun-Jin, Young-Hyung Kim, Yong Hwan Lee Fast Removal of Single Image using Pixel-based Median Channel Prior, *I. J. Advanced Science and Technology Letters*, 2015, Vol. 98, pp. 124–127. DOI: 10.14257/astl.2015.98.31
4. Tan R. T. Visibility in bad weather from a single image, *Proceedings of the 26th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '08)*. Anchorage, Alaska, 2008, pp. 1–8.
5. Kim J.-H., Jang W.-D., Sim J.-Y., Kim C.-S. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2013, Vol. 24, No. 3, pp. 410–425. DOI: 10.1016/j.jvcir.2013.02.004
6. Tarel J. P., Hautiere N. Fast Visibility Restoration from a Single Color or Gray Level Image, *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision*. Kyoto, Japan, 2009, pp. 2201–2208. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459251
7. Fattal R. Dehazing Using Color-Lines, *ACM Transactions on Graphics*, 2014, Vol. 34, No. 1, P. 13. DOI: 10.1145/2651362
8. Livingston M. A., Caelan R. Garrett, Zhuming Ai Image Processing for Human Understanding in Low-visibility, *Information Technology Division, Naval Research Laboratory*, 2011, pp. 1–9.
9. Berman D., Treibitz T., Avidan S. Non-Local Image Dehazing, *Proceedings of the CVPR Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, NV, USA, 2016, pp. 1674–1682. DOI: 10.1109/CVPR.2016.185
10. Berman D., Treibitz T., Avidan S. Air-light Estimation using Haze-Lines, *Proceedings of the IEEE 13th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing*. Stanford, CA, USA, 2017, pp. 5178–5191. DOI: 10.1109/ICCPHOT.2017.7951489
11. Narasimhan S. G., Nayar S. K. Removing weather effects from monochrome images, *Proceedings of the CVPR Computer Vision and Pattern Recognition*. Kauai, HI, USA, 2001, pp. 186–193. DOI: 10.1109/CVPR.2001.990956
12. Chen G., Wang T., Zhou H. J. A Novel Physics-based Method for Restoration of Foggy Day Images, *Journal of Image and Graphics*, 2008, Vol. 13, No. 5, pp. 888–893. DOI: 10.1109/SNPD.2007.350
13. He K. M., Sun J., Tang X. O. Guided image filtering, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, Vol. 35, No. 6, pp. 1397–1409. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213
14. Pang J., Au O. C., Guo Z. Improved single image dehazing using guided filter, In *Proc. APSIPA ASC*. Xi'an, China, 2011, pp. 1–4.
15. Zhang Y.-Q., Ding Y., Xiao J.-S., Liu J., Guo Z. Visibility enhancement using an image filtering approach, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Vol. 2012, Article 220, 2012, pp. 1–6. DOI: 10.1186/1687-6180-2012-220
16. Shi L., Cui Xiao, Yang Li, Gai Zhigang, Chu Shibo, Shi Jing Image Haze Removal Using Dark Channel Prior and Inverse Image, *International Conference on Measurement Instrumentation and Electronics 2016 (ICMIE 2016)*. Munich, Germany, 2016, pp. 89–93. DOI: 10.1051/mateconf/20167503008
17. Huang D., Wang W., Lu J., Chen K. Fast Single Image Haze Removal Method based on Atmospheric Scattering Model, *IFAC-PapersOnLine*, 2018, Vol. 51, Issue 17, pp. 211–216. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.144
18. Noor A. Ibraheem, Mokhtar M. Hasan, Rafiqul Z. Khan, Pramod K. Mishra Understanding Color Models: A Review, *ARPJN Journal of Science and Technology*, 2012, Vol. 2, No. 3, pp. 265–275.
19. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaya obrabotka izobrazhenij : per. s angl. Moscow, Texnosfera, 2005, 1072 p.
20. Kumari A., Sahoo S. K. Real Time Visibility Enhancement for Single Image Haze Removal, *Proc. Int. Conf. on Information Processing (IMCIP)*, 2015, pp. 501–507. DOI: 10.1016/j.procs.2015.06.057
21. Esterhuizen D. C# How to: Image Contrast / D. Esterhuizen [Electronic resource]. Access mode: <https://softwarebydefault.com/2013/04/20/image-contrast/>
22. Godard C., Aodha O. M., Brostow G. Unsupervised Monocular Depth Estimation with Left-Right Consistency, [Electronic resource]. Access mode: http://zfpascal.net/cvpr2017/Godard_Unsupervised_Monocular_Depth_CVPR_2017_paper.pdf
23. Arora T., Gurpadam B. Singh, Mandeep C. Kaur Evaluation of a New Integrated Fog Removal Algorithm IDCP with CLAHE, *International Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*, 2014, Vol. 2, Issue 1, pp. 12–18.
24. Bai L., Wu Y., Xie J., Wen P. Real Time Image Haze Removal on Multi-core DSP, *2014 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, APISAT 2014*, 2014, pp. 244–252. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.532
25. Tarel J.-P., Hautiere N., Cord A., Gruyer D., Halmaoui H. Improved Visibility of Road Scene Images under Heterogeneous Fog, *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'10)*. San Diego, CA, USA, June 21–24, 2010. DOI: 10.1109/IVS.2010.5548128