

Мамонова Г.В.

к.ф.-м.н., доцент кафедри системного аналізу та кібербезпеки,
КНЕУ ім. В. Гетьмана

Гензерська С.Я.

Студентка бакалаврату, спеціальність «Системний аналіз»
КНЕУ ім. В. Гетьмана

Гриб С.О.

Студентка бакалаврату, спеціальність «Системний аналіз»
КНЕУ ім. В. Гетьмана

Mamonova G.V.

Candidate Candidate of Physical and Mathematical, Associate Professor at
the Department of Systems Analysis and Cybersecurity,
KNEU named after V. Hetman

Hryb S.O.

Bachelor's student, majoring in Systems Analysis
KNEU named after V. Hetman

Henzerska S.Y.

Bachelor's student, majoring in Systems Analysis
KNEU named after V. Hetman

СТОХАСТИЧНІ МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ В ОБРОБЦІ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ВІДЕО

STOCHASTIC METHODS AND MODELS IN IMAGE AND VIDEO PROCESSING

Анотація. Сучасні інформаційні технології значно розширили можливості обробки зображень та відео, що знайшло широке застосування в медицині, транспорті, безпеці та інших галузях. Особливе значення мають математичні моделі, зокрема випадкові процеси, які дозволяють ефективно моделювати природний шум, реконструювати зображення та сегментувати їх. Марковські випадкові поля (MRF), фільтри Калмана та байєсівські методи відіграють ключову роль у фільтрації шуму та аналізі відео. У статті аналізуються існуючі методи обробки зображень та відео на основі випадкових процесів. Розглянуто застосування марковських випадкових полів для моделювання залежностей між пікселями та використання байєсівського підходу в сегментації та шумозаглушенні. Особлива увага приділяється методам стиснення відео, які дозволяють оптимізувати обсяг даних без суттєвої втрати якості, зокрема за допомогою дискретного косинусного перетворення (DCT). Дослідження підтверджує ефективність використання випадкових процесів у задачах фільтрації шуму, реконструкції зображень та аналізу відео, а також висвітлює перспективи інтеграції машинного навчання для підвищення точності обробки даних. Отримані результати можуть бути корисними для розробки більш надійних та продуктивних алгоритмів, які знайдуть застосування в медицині, робототехніці, системах безпеки та мультимедійних технологіях.

Ключові слова. Обробка зображень, обробка відео, стохастичні процеси, випадкові поля Маркова, оптичний потік, фільтр Калмана, байєсівські методи, шумозаглушення, сегментація, аналіз руху, стиснення даних, штучний інтелект, машинне навчання, комп'ютерний зір, відеоспостереження, автономні системи, медична візуалізація, програмне забезпечення для відеомонтажу, обробка в режимі реального часу.

Abstract. Modern information technologies have significantly expanded the capabilities of image and video processing, which has found wide application in medicine, transport, security, and other industries. Of particular importance are mathematical models, in particular random processes, which allow for efficient modeling of natural noise, image reconstruction, and segmentation. Markov random fields (MRF), Kalman filters, and Bayesian methods play a key role in noise filtering and video analysis. The paper analyzes the existing methods of processing images and videos based on random processes. The application of Markov random fields for modeling dependencies between pixels and the use of the Bayesian approach in segmentation and noise reduction are considered. Special attention is paid to video compression methods, which allow you to optimize the amount of data without significant loss of quality, in particular by using the discrete cosine transform (DCT). The study confirms the effectiveness of using random processes in noise filtering, image reconstruction, and video analysis tasks, and highlights the prospects for integrating machine learning to improve data processing accuracy. The results obtained can be helpful in developing more reliable and productive algorithms that will find applications in medicine, robotics, security systems, and multimedia technologies.

Keywords. Image processing, video processing, stochastic processes, Markov Random Fields, optical flow, Kalman filter, Bayesian methods, noise reduction, segmentation, motion analysis, data compression, artificial intelligence, machine learning, computer vision, video surveillance, autonomous systems, medical imaging, video editing software, real-time processing.

Сучасні інформаційні технології значно розширили можливості обробки зображень і відео. Ці процеси застосовуються в багатьох галузях, таких як медицина, транспорт, безпека, розваги та комунікації. Обробка зображень дає змогу автоматизувати діагностичні процеси в медицині, підвищувати точність систем розпізнавання облич, реалізовувати високоточне відстеження об'єктів і оптимізувати передачу мультимедійних даних. Важливим компонентом успішної обробки є використання математичних моделей, серед яких провідну роль відіграють стохастичні процеси. Вони дозволяють моделювати природний шум, прогнозувати та ефективно обробляти динамічні сигнали. Моделі, такі як Марковські випадкові поля (MRF), фільтри Калмана та Байєвські методи, використовуються для задач фільтрації шуму, реконструкції зображень, сегментації та аналізу відео.

Метою даної роботи є аналіз існуючих методів обробки зображень та відео з використанням випадкових процесів, а також визначення переваг і недоліків цих методів у різних застосуваннях.

1. Використання випадкових процесів у сегментації зображень

Сегментація зображень — це процес розділення зображення на області, що відповідають різним об'єктам сцени. У цьому завданні використовуються математичні моделі, які враховують низькорівневі характеристики поверхонь. Одним із популярних підходів є побудова ймовірнісної моделі за Байєсовим підходом. Для цього застосовують розподіли $P(y|x)$ (модель зображення) та $P(x)$ (пріоритетний розподіл), об'єднані за допомогою теореми Байєса для отримання апостеріорного розподілу $P(x|y)$. Цей розподіл дозволяє оцінити найімовірнішу сегментацію.

Для неконтрольованої сегментації, коли параметри моделі та класи пікселів невідомі, використовують методи максимізації очікування (ЕМ) або його варіації.

Марковські випадкові поля в зображеннях

Марковські випадкові поля (MRF) є важливим інструментом для моделювання залежностей між пікселями при обробці зображень. Вони будуються на основі графів, де вершини представляють пікселі, а ребра — залежності між ними. MRF використовують для опису локальних властивостей зображень та створення моделей енергетичних функцій, мінімізація яких дає оптимальну сегментацію. Одним із підходів є застосування моделей слабкої мембрани, що імітують еластичну поверхню для відновлення гладких областей зображення з урахуванням меж між об'єктами.

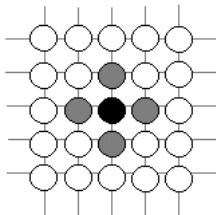
Розглянемо певний підклас MRF, який найчастіше використовується схемами в обробці зображень. У цьому випадку ми розглядаємо S як решітку L і визначаємо так звані однорідні системи сусідства n -го порядку як:

$$G^n = \{G^n(i, j) : (i, j) \in \alpha\} \quad (1)$$

$$CapG^n(i, j) = \{(k, l) \in \alpha : (k - i)^2 + (l - j)^2 \leq n\}. \quad (2)$$

Очевидно, що ділянки поблизу кордону мають менше сусідів, ніж внутрішні. Крім того, $G^0 \equiv S$ і для всіх $n \geq 0$: $G^n \subset G^{n+1}$.

На рис. 1 показано околиці першого порядку, що відповідають $n = 1$.



Кліки:

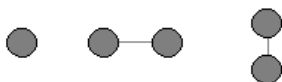
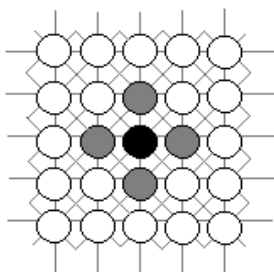


Рис. 1. Система сусідства першого порядку (виконано авторами)

Кліки $\{(i, j)\}$, $\{(i, j), (i, j + 1)\}$, $\{(i, j), (i + 1, j)\}$. На практиці більше ніж дві системи порядку (див. Рис. 2) використовуються рідко, оскільки енергетична функція була б надто складною та потребувала б великого обчислення.



Кліки:

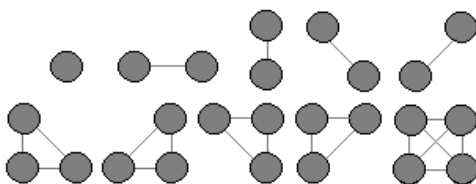


Рис. 2. Система сусідства другого порядку (виконано авторами)

Модель слабкої мембрани була введена в реконструкцію зображення А. Проблема полягає в тому, щоб реконструювати поверхні, які є безперервними майже скрізь або, іншими словами, безперервними на ділянках. Щоб досягти задовільної формалізації цього принципу, використовувалась модель мембрани: уявіть собі еластичну мембрану, яку ми намагаємось притиснути до поверхні. Краї виглядатимуть як розриви мембрани. Залежно від того, наскільки еластична мембрана, країв може бути більше або менше.

2. Баєвський метод для зменшення шумів зображення

Баєвський підхід базується на створенні ймовірнісних моделей, які враховують залежності між пікселями. Основна задача — отримання безшумного зображення x на основі зашумлених спостережень Y . Використовуючи апостеріорний розподіл ймовірностей $P(x|Y)$, можна відновити зображення шляхом максимізації цього розподілу. Баєвський метод забезпечує високу якість відновлення, однак вимагає значних обчислювальних ресурсів для обробки складних MRF.

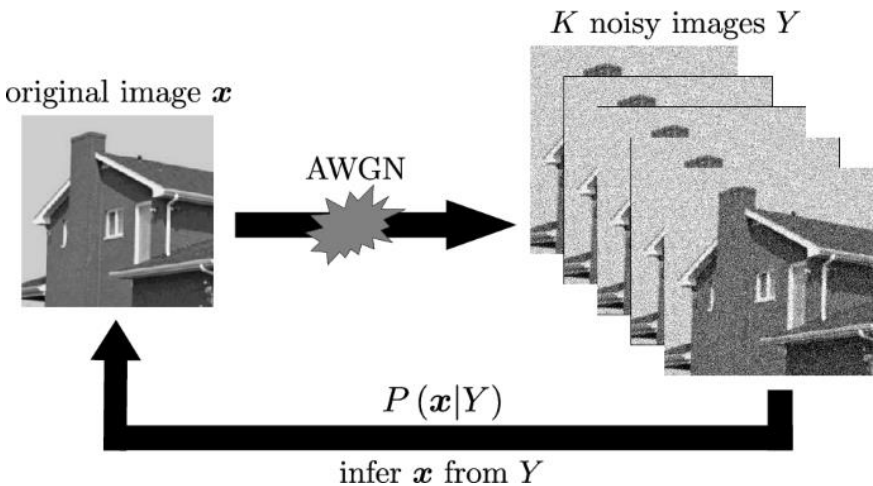


Рис. 3. Приклад застосування Баєвського методу в усуненні шумів (виконано авторами)

3. Оптичний потік в обробці відео

Оптичний потік описує схему видимого руху об'єктів у зоровій сцені, відштовхуючись від змін у послідовності зображень. Це векторне поле, що представляє напрямок і швидкість руху кожного пікселя зображення. Оптичний потік обчислюється на основі рівняння сталості яскравості, що стверджує, що яскравість точки на об'єкті залишається незмінною під час руху.

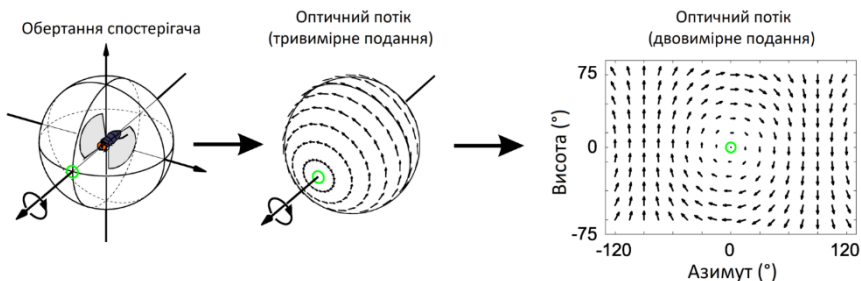


Рис. 4. Оберт оптичного потоку, що сприймається спостерігачем ([4])

На рисунку 4 зображено оберт оптичного потоку, що сприймається людиною-спостерігачем — мухою. Напрямок і величина оптичного потоку у кожній точці представлені стрілками, що відображають відповідний напрямок і довжину. Послідовності упорядкованих зображень дозволяють аналізувати рух, який можна розглядати або як миттєву швидкість зображення, або як дискретне зміщення між кадрами.

Потік використовується для оцінювання руху об'єктів і стискання відео, а також для аналізу тривимірної структури сцени. Важливим аспектом є його здатність визначати взаємодію руху об'єктів і спостерігача відносно сцени через використання математичних моделей, таких як якобіан зображення. Такий підхід широко застосовується в робототехніці, зокрема для виявлення й відстеження об'єктів, виділення основного плану, навігації роботів, а також візуальної одометрії. Оптичний потік використовується для керування мініатюрними літальними апаратами.

Важливо зазначити, що існують алгоритми оптичних потоків, або ж методи їх визначення:

Фазова кореляція — це процедура, яка передбачає обернення нормалізованого спектра взаємної потужності.

Блокові методи — включають підходи, що базуються на мінімізації суми квадратів різниць, суми модулів різниць або максимізації нормалізованої взаємної кореляції.

Диференціальні методи оцінювання оптичного потоку використовують часткові похідні сигналу зображення, шуканого поля потоку або їхні похідні вищого порядку. Серед таких методів виділяють: метод Лукаса-Канаде; метод Горна-Шунка; метод Бакстона; метод Блека-Джепсона; загальні варіаційні методи.

Дискретні методи оптимізації передбачають дискретизацію простору пошуку.

4. Калманівське фільтрування для відстеження об'єктів у відео

Фільтр Калмана — це рекурсивний алгоритм для оцінювання стану системи, що описується стохастичною моделлю. Його часто використовують для відстеження об'єктів у відео через прогнозування їхнього майбутнього положення з урахуванням шуму вимірювань. Застосування фільтру Калмана найчастіше відбувається для двох задач: відстеження рухомих об'єктів і усунення невизначеності, спричиненої обмеженнями якості камери або зовнішніми факторами.

Основними етапами роботи фільтру Калмана є:

Модель стану: описує рух об'єкта за допомогою рівнянь стану, таких як рівномірний або прискорений рух.

Оновлення спостережень: коригує прогнозоване положення об'єкта на основі нових даних з відео.

Рекурсія: фільтр постійно уточнює положення на кожному кроці.

Розширений Калманівський фільтр (EKF) і Unscented Kalman Filter (UKF) розроблені для нелінійних систем, що дозволяє використовувати його у більш складних задачах, таких як роботи з тривимірним рухом або поворотами об'єктів.

5. Компресія відео та методики зменшення шуму

Стиснення відео передбачає зменшення обсягу даних цифрового відеозапису. Воно базується на двох ключових принципах: надлишковість просторової інформації в межах кожного кадру й надлишковість часової інформації, оскільки більшість кадрів схожі на попередній та наступний.

Типові алгоритми стиснення відео спочатку стискають перший кадр, використовуючи методи стиснення зображень. Потім аналізують і кодують лише відмінності між наступним і попереднім кадрами. У випадках, коли кадр суттєво відрізняється, його стискають окремо.

Стиснення з втратами дозволяє значно зменшити розмір файлу, зберігаючи прийнятну якість для людського ока, тоді як стиснення без втрат використовується для спеціальних завдань, де важлива точна відновлюваність даних. Більшість сучасних алгоритмів стиснення базуються на дискретному косинусовому перетворенні (DCT), яке ефективно усуває просторову надмірність. Інші методи, такі як фрактальне стиснення та дискретне вейвлет-перетворення, рідше використовуються у відео, але залишаються актуальними

для статичних зображень. Основними методами є квантування, цифрове телемовлення та стандарти стиснення.

Зменшення шуму у стислому відео — процес обробки відеоданих для усунення артефактів, які виникають внаслідок компресії. Компресія з втратами, яка широко використовується для зменшення розмірів файлів (наприклад, у форматах MPEG, H.264), може створювати шум або візуальні дефекти, такі як блокування, розмиття або спотворення кольорів. Щодо користі даного процесу, можна зазначити, що після компресії зменшення шуму допомагає відновити сприйняття відео до максимально можливої якості, зберігаючи чіткість деталей та зменшуючи артефакти.

Шумоподавлення здійснюється за налаштування наступних складових:

1) Фільтри для згладжування:

- Адаптивні фільтри: згладжують шум, зберігаючи основні деталі, такі як краї об'єктів.

- Методи розмиття (Gaussian Blur): ефективні для усунення дрібних шумів, але можуть викликати втрату деталей.

2) Методи постобробки: Застосовуються після декодування відео. Наприклад, фільтри блоків зменшують візуальні артефакти у форматах MPEG або H.264.

3) Нові алгоритми:

- Глибокі нейронні мережі: автоматично виявляють та усувають артефакти, часто забезпечуючи більш якісне відновлення.

- Просторово-часові моделі: враховують рух об'єктів між кадрами для згладжування шуму без втрати динамічних деталей.

Серед сучасного програмного забезпечення для обробки звертаємо увагу на

- Adobe Premiere Pro

Функції: професійний монтаж, кольорокорекція, аудіообробка.

Застосування: кіноіндустрія, реклама, стріми.

Особливість: інтеграція з Photoshop і After Effects.

- DaVinci Resolve

Функції: монтаж, кольорокорекція, аудіоефекти.

Застосування: кінематографічний контент у високій роздільній здатності.

- VSDC Free Video Editor

Функції: стабілізація зображення, базові візуальні ефекти.

Застосування: створення контенту для соціальних мереж.

Переваги: безкоштовний інструмент для початківців.

Програмне забезпечення інтегрує алгоритми машинного навчання для автоматичної сегментації сцен, усунення шуму та аналізу

динаміки відео. Наприклад, OpenCV використовується для роботи з оптичним потоком, а Python-бібліотеки (TensorFlow, PyTorch) підтримують навчання моделей для прогнозування поведінки об'єктів.

Відеообробка знаходить широке застосування в різних галузях: у медицині алгоритми аналізу МРТ і КТ допомагають виявляти аномалії, а роботизовані системи, як Da Vinci, забезпечують точність операцій. В автомобільній промисловості автопілоти використовують відео для розпізнавання об'єктів і прогнозування дій, а системи допомоги водієві, такі як контроль смуги руху, базуються на оптичному потоці. У кіноіндустрії сучасні програми, наприклад Adobe After Effects, додають реалістичні ефекти, підтримуючи якість 4K і 8K. У системах безпеки технології розпізнавання обличчя та аналізу поведінки сприяють ідентифікації осіб і виявленню підозрілих дій. Освітні застосунки, включно з віртуальними лабораторіями, візуалізують експерименти, а в спорті аналіз руху покращує техніку спортсменів. У маркетингу відеообробка дозволяє створювати адаптований контент для соціальних мереж і аналізувати емоційні реакції аудиторії.

Висновок. У роботі детально розглянуто різні методи, які ґрунтуються на випадкових процесях, і їхнє практичне застосування. Для обробки зображень були досліджені методи сегментації, шумозаглушення та відновлення на основі Марковських випадкових полів, а також Баєсові підходи до зменшення шумів. Ці методи спрямовані на підвищення якості обробки даних, зменшення впливу шумів та покращення чіткості зображень. Вони знаходять широке застосування, наприклад, у медицині для аналізу медичних зображень, таких як МРТ або КТ, що дозволяє автоматизувати процеси діагностики та виявляти патології з високою точністю.

Використання випадкових процесів підтверджується їх здатністю зменшувати шум, підвищувати точність прогнозування та забезпечувати автоматизацію аналізу. У медицині це допомагає виявляти найменші аномалії у зображеннях і відео, в автомобільній галузі — прогнозувати рух транспортних засобів і пішоходів, у безпеці — забезпечувати надійне виявлення загроз або підозрілих ситуацій у відеопотоках. У кіноіндустрії випадкові процеси сприяють створенню реалістичних візуальних ефектів і стабілізації відео, а в освітній сфері — моделюванню випадкових природних явищ у навчальних матеріалах.

Перспективи розвитку в цій сфері пов'язані з інтеграцією сучасних підходів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, для автоматичного виявлення аномалій, аналізу руху та підви-

щення якості зображень і відео. Поєднання таких методів із алгоритмами, заснованими на випадкових процесах, дозволить створювати більш точні та швидкі системи обробки даних, що знайдуть застосування у безпілотному транспорті, робототехніці, автоматизованих системах спостереження та аналізу поведінки в реальному часі.

Бібліографічні посилання

1. Derin H., Won C.S. A parallel segmentation algorithm using relaxation with varying neighborhoods and its mapping to array processors// Computer Vision, Graphics and Image Processing. — 1987. — Vol. 40. — P. 54–78.
2. Dobruschin P. L. The description of a random field using conditional probabilities and constructions of its regularity // Theory of Probability and its Applications. — 1968. — Vol. XIII, No. 2. — P. 197–224.
3. Kataoka Sh., Yasuda M. Bayesian Image Denoising with Multiple Noisy Images. — Published online: 16 July 2019.
4. Algorhythm Studio. — URL: <https://algorhythmstudio.com/>
5. Reporter ZP. — URL: <https://reporter.zp.ua/>
6. Кафедра: Кращі програми для обробки відео: огляд та відгуки. — URL: <https://kafedra.com.ua/krashhi-programy-dlya-obrobky-video-oglyad-ta-vidguky/>

Статтю подано до редакції: 07.11.2024