

УДК 004.08

В.В. ГРИЦИК

Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ УНІФІКАЦІЇ СТАНДАРТНИХ ПОРОГОВИХ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ.

У роботі представлено дослідження автора у напрямку огляду ефективних методів сегментації, що пов'язаних які можна використати в навчальному процесі сьогодення. У роботі проаналізовано базові рішення та їх математичне обґрунтування. Показано основні обмеження застосування та проблемні області застосування. У роботі описано основні принципи порогового визначення. Порогові методи є одними з найпростіших в реалізації та найбільш широко застосовуваних методів сегментації зображень. Мета порогового значення – розподілити зображення на регіони із заданими характеристиками та видалити всі інші регіони які визнано несуттєвими. Матеріал, представлений в цій роботі дає базове розуміння різних стратегій вибору порогових значень. Головною метою цієї роботи є дослідження методів порогової сегментації зображень для побудови математичної моделі швидкої обробки даних при розпізнавання зображень. Оцінюючи приналежність пікселя до сегменту комп'ютер потребує алгоритму вибору оптимального методу сегментації. Для вибору адаптації рішення до конкретного зовнішнього стану потрібно знайти алгоритм, що забезпечить найкраще розпізнавання. У статті досліджено методи сегментації, які здійснюються насамперед з метою зменшення надмірності інформації для конкретних часових умов, залишаючи в ньому лише інформацію, необхідну для вирішення конкретної задачі в конкретний момент часу. У бінарному зображенні цікаві для нас частини (наприклад, контури відображуваних об'єктів) повинні бути збережені, а незначні риси (фон) виключені. Основна ідея роботи є основою для навчання математики в системі сприйняття образів. Зокрема, комп'ютер повинен відчувати і розуміти динаміку реального світу. Тому автор досліджує моделі та засоби синтезу методів сприйняття даних зорового спектру, що знаходяться у режимі реального часу.

Ключові слова: розпізнавання зображень; сегментація зображень; комп'ютерний зір.

В.В. ГРИЦИК

Национальный университет «Львовская политехника»

ИССЛЕДОВАНИЕ УНИФИКАЦИИ СТАНДАРТНЫХ ПОРОГОВЫХ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлено исследование автора в направлении анализа эффективных методов сегментации, которые можно использовать в преподавательском процессе при рассмотрении современных задач. В работе рассмотрено базовые решения и их математическое обоснование. Показано основные ограничения использования и предметные области. Пороговые методы являются одними из самых простых в реализации и, одновременно, наиболее распространёнными. Целью порогового подхода является разделение изображения на регионы с определёнными характеристиками с одновременным удалением регионов без этих характеристик. Материал рассмотренный в этой работе даёт базовое понимание разных стратегий выбора пороговых значений.

Материал, представленный в этой работе дает базовое понимание различных стратегий выбора пороговых значений. Главной целью этой работы является исследование методов пороговой сегментации изображений для построения математической модели быстрой обработки данных при распознавания изображений. Оценивая принадлежность пиксела к сегменту компьютер нуждается алгоритма выбора оптимального метода сегментации. Для выбора адаптации решения к конкретному внешнего состояния нужно найти алгоритм, который обеспечит распознавание. В статье исследованы методы сегментации, которые осуществляются прежде всего с целью уменьшения избыточности информации для конкретных временных условий, оставляя в нем только информацию, необходимую для решения конкретной задачи в конкретный момент времени. В бинарном изображении интересующие нас части (например, контуры отображаемых объектов) должны быть сохранены, а незначительные черты (фон) исключены. Основная идея работы является основой для обучения математике в системе восприятия образов. В частности, компьютер должен чувствовать и понимать динамику реального мира. Поэтому автор исследует модели и средства синтеза методов восприятия данных зрительного спектра, находясь в режиме реального времени.

Ключевые слова: распознавание изображений; сегментация изображений; роботизированное зрение.

V.V. HRYTSYK
Lviv Polytechnic National University

RESEARCH OF IMAGE SEGMENTATION METHODS FOR THEIR UNIFICATION

The paper presents the author's research in the direction of reviewing effective methods of segmentation that can be used in the educational process today. The basic solutions and their mathematical substantiation are analyzed in the work. The main limitations of application and problem areas of application are shown. The paper describes the basic principles of threshold determination. Threshold methods are one of the easiest to implement and most widely used methods of image segmentation. The purpose of the threshold is to divide the image into regions with specified characteristics and delete all other regions that are considered insignificant. The material presented in this paper provides a basic understanding of the different strategies for selecting thresholds.

The main goal of this paper is review of image segmentation methods. The necessity of constructing a mathematical model arises immediately when using a computer for image processing. By evaluating the "eye" affiliation of a pixel to a particular segment, we do not think about how it is done but for computer we need write algorithm. If the task is some adaptation, we need to have written all possibility conditions. Instructing this computer, we have to teach him to perform similar actions, that is, to put in it the corresponding data and algorithms.

The paper investigates the methods of segmentation that are carried out primarily in order to reduce the information redundancy of the image for specific time conditions, leaving it only the information that is needed to solve a particular task at a specific time point. In the binary image, the parts that are of interest to us (for example, the outlines of the displayed objects) must be preserved and insignificant features (background) are excluded.

The main idea is form the basis for teaching math in the system of perception. In particular, the computer should feel and understand the dynamics of the real world.

Therefore, the author investigates the models and means of synthesizing the methods of perception of data of the visual spectrum, arriving in real time.

Global threshold method, multilevel threshold method, semithreshold method, variable threshold method are studied in the paper. Mathematical base is studied and presented in the article. Mathematic of image processing is integrated in the end of every part.

Keywords: pattern recognition, image segmentation, computer vision.

Постановка проблеми

Для постановки проблеми розглянемо задачу, які генерують основну проблему: 4-а промислова революція (сьогодні у 1-му десятку країн, що задають темпи розвитку на усій планеті, ІТ та виробництво сплелися настільки, що участь у технологічно процесі людей – це скоріше швидкослабнуча психологічна і фінансова складові, ніж технологічна); Сюди ж можна додати і сферу обслуговування: фінансові і страхові сектори, Інтернет послуги, продажі тощо [3, 5–7].

Тому, автор бачить потребу у підготовці спеціалістів, що будуть відповідати за сприйняття інформації, що надходять в режимі реального часу [2–4] в найбільш інформативному діапазоні спектру – візуальному.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відкриття останнього десятиліття створило можливість реалізовувати повністю автоматизовані адаптивні кібернетичні системи. Сьогодні, автоматизовані самокеровані авто та автоматизовані заводи з адаптивним виробництвом – це реальність. Автоматизовані кадровики приймають рішення про те чи працювати вам на високооплачуваній роботі. Роботизовані системи обслуговують людей при покупках і засобах доставки (від планування, автоматизовані сортування, кораблі автомобілі та погрузка). Починає працювати комп'ютерний зір, розпізнавання мови, ми починаємо розуміти процеси, що відбуваються у мозку. Автоматична ідентифікаційна система Департаменту США, для видачі віз обробляє більш семи десяти п'яти мільйонів фотографій на рік. Вертикальні ферми стали прототипом харчування наступного витка кібернетичних технологій.

Динаміка появи нових концепцій, методів та відповідних можливостей (теоретичні, прикладні розробки) [1] швидко прямує до точки, коли суспільство дійде до того моменту, коли в прогнозі розвитку людства однією із найбільш ймовірних моделей розвитку буде модель, при якій люди повністю або на 99% втрачають контроль за розвитком подій. Прикладом такого твердження є пошукові інтернет системи, коли людина читає тільки перший десяток результатів із тисяч можливих. Можливо таке припущення для людей, поза сферою досліджень адаптивних ІТ, видається дещо передчасним, але гіршим сценарієм є те що це єдино можлива модель розвитку.

Для підготовки роботи досліджено та використано роботи таких відомих вчених як Розенфельд, Хамадані, Ріхтер, Оцу, Кітлер, Лі, Саху та ін. [2–4, 11–17].

Мета дослідження

Метою роботи є проведення огляду базису сегментації з метою формулювання оптимізованого представлення концепції розпізнавання для подальшої підготовки фахівців з розробки адаптивних систем сприйняття зовнішнього світу.

Викладення основного матеріалу дослідження

1. Метод глобального порогу.

Метод глобального порогоування використовується для виділення об'єктів, що цікавлять значення, відмінні від фону при явному припущенні, що корисні об'єкти – темні на світлому фоні або світлі на темному фоні.

Кожен піксель класифікується як належний до об'єкту, що цікавить, або до заднього плану. Класифікація здійснюється шляхом присвоєння пікселю значення 1, якщо значення вихідного зображення знаходиться в заданому пороговому діапазоні, а 0 – в іншому випадку.

Для математичного опису процедури глобального порогу приймемо, що $a \in \mathbb{R}^X$ – вихідне зображення і $[h, k]$ є заданим пороговим діапазоном. Порогове значення $b \in \{0,1\}^X$ визначається як

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } h \leq a(x) \leq k \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки)} \end{cases};$$

для всіх $x \in X$.

Два окремі випадки цієї методології стосуються відокремлення рівномірно високих значень або рівномірно низьких значень. У першому порогове зображення b буде задано

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \geq k; \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases}$$

тоді як у другому випадку

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки)} \end{cases};$$

де k позначає відповідне значення порогу.

Алгебричне представлення глобального порогу. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ – вихідне зображення і $[h, k]$ є заданим пороговим діапазоном. Порогове зображення $b \in \{0,1\}^X$ можна обчислити за допомогою характерної функції

$$B := X_{[h, k]}(a).$$

Характерні функції

$$B := X \geq k(a) \quad \text{і} \quad b := X \leq k(a)$$

можуть використовуватися для виділення об'єкта відповідно високих і низьких значень.

Коментарі. Глобальний поріг ефективний при ізоляції об'єктів, що мають однакове значення, розміщених проти фону різних значень. Практичні проблеми виникають, коли фон нерівномірний або коли об'єкт і фон приймають широкий діапазон значень. Зауважте, також, що

$$b := X[h, k](a) : (X \geq h(a), X \leq k(a)).$$

2. Напівпори́г.

Напівпорогове значення є корисним варіантом глобального порогу у випадку, якщо значення пікселів лежать в заданому пороговому діапазоні і зберігають свої

початкові значення. Пікселі зі значеннями, що лежать поза межами порогового діапазону, встановлюються 0. Для вихідного зображення $a \in \mathbb{R}^X$ з пороговим діапазоном $[h, k]$ напівпорогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ задається як $a \in \mathbb{R}^X$:

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } h \leq a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases}$$

для всіх $x \in X$.

Два окремі випадки цієї методології стосуються відокремлення рівномірно високих значень або рівномірно низьких. У першому порогове зображення b дає

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } a(x) \geq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases},$$

тоді як у другому випадку

$$b(x) = \begin{cases} a(x), & \text{if } a(x) \leq k; \\ 0, & \text{otherwise (інші випадки);} \end{cases},$$

де k позначає відповідний поріг значення.

Алгебричне представлення напівпорогового методу. Формулювання алгебри зображення для напівпорогового зображення $b \in \mathbb{R}^X$ за діапазоном значень $[h, k]$ є

$$b := a \cdot X_{[h, k]}^a.$$

Напівпоріг зображень над безмежними наборами $[k, \infty)$ & $(-\infty, k]$ дається як

$$b(x) := a \cdot X \geq k^{(a)} \quad \text{і} \quad b(x) := a \cdot X \leq k^{(a)},$$

відповідно.

Альтернативне формулювання алгебри зображень. Напівпорогове зображення також може бути отримане шляхом обмеження вихідного зображення до тих точок, значення яких лежать у пороговому діапазоні, а потім розширюють обмеження до X зі значенням 0. Формування алгебри зображення для цього методу напівпорогового значення є

$$b := (a|_{[h, k]})^0.$$

Якщо потрібно, замість побудови a результат понад X можна побудувати підмножину c або a містять лише ті пікселі, що лежать у пороговому діапазоні, тобто

$$c := a|_{[h, k]}.$$

Коментарі. Напівпоріг є варіантом глобального порогу для випадку, якщо значення пікселів лежать в заданому пороговому діапазоні і зберігають свої початкові значення. Наприклад, фон є світлий, по краях фон чорний, корисні об'єкти сірі.

а. Багаторівневий поріг

Техніки глобальних порогів і напівпорогів, які розглянуто вище, ґрунтуються на припущенні, що зображення містить лише два типи областей. Для зображень, що

містять більше двох типів регіонів застосовують інші методи. Багаторівневе порогове значення є розширенням двох попередніх методів порогового визначення, що дозволяє здійснювати сегментацію пікселів у кілька класів [17].

Наприклад, якщо гістограма зображення містить три піки, сегментуйте зображення, використовуючи два пороги. Ці пороги ділять значення, встановлене на три діапазони без відкриття, кожний з яких може бути пов'язаний з отриманим унікальним значенням зображення.

Алгебричне представлення багаторівневого порогу. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ є вихідним зображенням, і нехай k_1, \dots, k_n є пороговими значеннями, що задовольняють умові $k_1 > k_2 > \dots > k_n$. Ці значення розділяють \mathbb{R} на $(n+1)$ інтервали, які пов'язані зі значеннями v_1, \dots, v_{n+1} у пороговому зображенні результату. А типовою може бути послідовність значень результатів $1, \frac{n-1}{n}, \dots, \frac{1}{n}, 0$. Порогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ визначається через

$$b(x) = \begin{cases} v_1, & \text{if } k_1 < a(x); \\ v_i, & \text{if } k_i < a(x) \leq k_{i-1}; \\ v_{n+1}, & \text{if } a(x) < k_n. \end{cases}$$

Формулювання алгебри зображень. Визначимо функцію $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ через

$$f(r) = \begin{cases} v_1, & \text{if } k_1 < r \\ v_i, & \text{if } k_i < r < k_{i-1} \\ v_{n+1}, & \text{if } r \leq k_n, \end{cases}$$

Порогове зображення $b \in \mathbb{R}^X$ можна обчислити компонуванням f з a , а саме:

$$b: = f \circ a.$$

б. Змінний поріг

Жоден пороговий рівень не може дати хороших результатів сегментації для цілого зображення. Порогова змінна дозволяє застосовувати різні порогові рівні до різних областей зображення.

Наприклад, об'єкти можуть контрастувати з фоном у всьому зображенні, але через нерівномірне освітлення об'єкти та фон можуть мати нижчі значення з одного боку зображення, ніж на іншому. У таких випадках зображення можна підрозділити на менші регіони. Потім встановлюються порогові значення для кожного регіону та глобального (або іншого) порогу застосовується до кожної підмножини, що відповідає регіону [12].

Точна методологія така. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ є вихідним зображенням та нехай зображення $d \in \mathbb{R}^X$ позначають порогове значення області, пов'язане з кожною точкою в X це є $d(x)$ – порогове значення, пов'язане з регіоном, в якому знаходиться точка x , що не належить цьому регіону. Порогове зображення $b \in \{0,1\}^X$ визначається через

$$b(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } a(x) \geq d(x); \\ 0, & \text{if } a(x) < d(x). \end{cases}$$

Формулювання алгебри зображень. Порогове зображення b можна обчислити так:

$$b: = X \geq d(a).$$

Коментарі. Змінне порогове значення ефективно для зображень з локально бімодальною гістограмою. Цей метод дасть бажані результати, якщо об'єктів порівняно мало і вони не групуються занадто близько один до одного. Субмагнітажі повинні бути досить великими, щоб містити як фонові, так і пікселі об'єкта.

Ті ж проблеми, що виникають при глобальному порозі, можуть виникати на місцевому рівні при змінному порозі. Таким чином, якщо зображення має місцеве неоднорідне тло або великі діапазони значень у деяких регіонах або якщо мультимодальна гістограма не розрізняє об'єкт і фон, метод дасть поганий результат. Крім того, важко визначити зображення d без деякої апріорної інформації.

с. Вибір порогу з використанням середнього та стандартного відхилення.

У цьому розділі покажемо перший з трьох методів автоматичного порогоування порогів. Конкретний поріг, отриманий тут, є лінійною комбінацією, $k_1\mu + k_2\sigma$, середнє і стандартне відхилення вихідного зображення і було запропоновано Хамадані. Середнє і стандартне відхилення – це внутрішні властивості вихідного зображення. Ваги k_1 і k_2 попередньо вибираються на основі інформації про тип зображення, щоб оптимізувати продуктивність.

Для отриманого зображення $a \in \mathbb{R}^X$ де X є сітка $m \cdot n$, середнього значення μ і стандартне відхилення σ з a даються

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a(i, j) - \mu)^2},$$

відповідно. Пороговий рівень τ встановлено на

$$\tau = k_1\mu + k_2\sigma,$$

де константи k_1 і k_2 залежать від типу зображення.

Формулювання алгебри зображень. Нехай $a \in \mathbb{R}^X$ де $X = Z_m \cdot Z_n$. Середнє та стандартне відхилення задаються висловлюваннями алгебри зображень:

$$\mu := \frac{1}{mn} \sum a;$$

$$\sigma := \sqrt{\frac{1}{mn} \sum (a - \mu)^2}.$$

Пороговий рівень отриманий з

$$\tau := k_1\mu + k_2\sigma.$$

Коментарі. Для типових ІЧ-зображень низької роздільної здатності $k_1=k_2=1$ здається, працює досить добре для видобутку «теплих» об'єктів. Для більш високої роздільної здатності $k_1=1$ або $k_1=1.5$ і $k_2=2$ може дати кращі результати.

d. Вибір порогу шляхом максимального відхилення між класами

У цьому розділі ми представляємо метод Оцу [18–19] для знаходження порогу параметри, які будуть використовуватися в схемах з декількома пороговими показниками. Для заданого k метод знаходить пороги $0 \leq \tau_1 < \tau_2 \dots < \tau_{k-1} < l-1$ для розділення пікселів $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ на класи:

$$\begin{aligned} C_0 &= \{ (x, a(x)) : 0 \leq a(x) \leq \tau_1 \}, \\ C_i &= \{ (x, a(x)) : \tau_i < a(x) \leq \tau_{i+1} \}, \\ C_{k-1} &= \{ (x, a(x)) : \tau_{k-1} < a(x) \leq l-1 \}, - \end{aligned}$$

шляхом максимального розрізнення між класами. Дисперсія між класом використовується як міра відокремленості між класами. Визначення приналежності пікселя до класу, використовує гістограму інформації, яка отримана з вихідного зображення. Після визначення порогових значень, їх можна використовувати як параметри багатопорогового (multilevel) алгоритму.

Нехай $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ і нехай \bar{h} є нормалізованою гістограмою a . Пікселі повинні бути розділені на k групи C_0, C_1, \dots, C_{k-1} шляхом вибору τ_i як зазначено нижче.

Ймовірність виникнення класу $\Pr(C_i)$ даються за формулами:

$$\begin{aligned} \Pr(C_0) &= w_0 = \sum_{j=0}^{\tau_1} \bar{h}(j) = w(\tau_1); \\ \dots \\ \Pr(C_i) &= w_i = \sum_{j=\tau_i+1}^{\tau_{i+1}} \bar{h}(j) = w(\tau_{i+1}) - w(\tau_i); \\ \dots \\ \Pr(C_{k-1}) &= w_{k-1} = \sum_{j=\tau_{k-1}+1}^{l-1} \bar{h}(j) = 1 - w(\tau_{k-1}); \end{aligned}$$

де $w(\tau_i) = \sum_{j=0}^{\tau_i} \bar{h}(j)$ – кумулятивний момент гістограми, що оцінюється до τ_i рівня.

Середні рівні класу задаються формулами:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \sum_{j=0}^{\tau_1} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_0} = \frac{\mu(\tau_1)}{w(\tau_1)}; \\ \mu_i &= \sum_{j=\tau_i+1}^{\tau_{i+1}} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_i} = \frac{\mu(\tau_{i+1}) - \mu(\tau_i)}{w(\tau_{i+1}) - w(\tau_i)}; \\ \mu_{k-1} &= \sum_{j=\tau_{k-1}+1}^{l-1} \frac{j \cdot \bar{h}(j)}{w_{k-1}} = \frac{\mu_l - \mu(\tau_{k-1})}{1 - w(\tau_{k-1})} \end{aligned}$$

тут $\mu(\tau_i) = \sum_{j=0}^{\tau_i} j \cdot \bar{h}(j)$ – кумулятивне значення гістограми до τ_i ; $\mu = \sum_{j=0}^{l-1} j \cdot \bar{h}(j)$ – загальний середній рівень a .

Для того, щоб оцінити придатність порогів на рівні $0 \leq \tau_1 < \tau_2, \dots < \tau_{k-1} < l-1$, дисперсія між класом використовується як дискримінантний критерій міри відокремленості класу. Ця дисперсія між класом σ_b^2 визначається як

$$\sigma_b^2 = w_0 (\mu_0 - \mu)^2 + w_1 (\mu_1 - \mu)^2 \dots + w_{k-1} (\mu_{k-1} - \mu)^2,$$

що еквівалентно,

$$\sigma_b^2 = w_0 \mu_0^2 + \dots + w_{k-1} \mu_{k-1}^2 - \mu^2.$$

Тут, σ_b^2 є функцією від $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}$ (якщо підставити відповідні вирази за участю τ_i). Проблема визначення придатності τ_i зводиться до оптимізації σ_b^2 , тобто, до знаходження максимуму $\sigma_b^2(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1})$; або

$$\max \{ w_0 \mu_0^2 + w_1 \mu_1^2 \dots + w_{k-1} \mu_{k-1}^2 - \mu^2 : 0 \leq \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{k-1} < l-1 \}$$

Формулювання алгебри зображень. Розглянемо формулювання алгебри зображень алгоритму для $k=3$ групи.

Він легко узагальнюється для інших k : ($1 \leq k < l-1$).

Нехай $a \in (\mathbb{Z}_l)^X$ є вихідним зображенням. Нехай h і c є нормована гістограма і нормалізована кумулятивна гістограма a відповідно. Зображення кумулятивного моменту першого порядку задано формулою

$$u := \sum t(\bar{h}),$$

де визначений параметризований шаблон

$$t(a)_j(i) = \begin{cases} j \cdot a(j), & \text{if } j \leq i; \\ 0, & \text{otherwise (в іншому випадку)}. \end{cases}$$

Коментарі. Цей алгоритм є алгоритмом без вчителя. Для великих k метод може давати погані результати, якщо класи надзвичайно добре розділені [15].

Висновки

У результаті проведеного аналізу методів сегментації зображення оптимізовано концепцію сприйняття теорії розпізнавання, зокрема, в частині сегментації зображень.

Список використаної літератури

1. Hrytsyk V., Grondzal A., Bilenyk A. Augmented Reality for People with Disabilities. Proceedings of the International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT'2015 (Lviv, September 14–17, 2015). Lviv: Polytechnic National University, 2015. P. 188–191.
2. Audio-Visual Answer to Modern Computing. *Research*eu Results Supplement*. 2010. № 26. P. 31–32.
3. Мічо Кайку. Фізика майбутнього. Переклала з англ. Анжела Кам'янець. Львів: Літопис, 2013. 432 с.
4. Software: Running Commentary for Smarter Surveillance? *Research*eu Results Supplement*. 2010. № 24. P. 29.

5. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution: What it Means, How to Respond. *World Economic Forum*. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>
6. Шваб К. Четверта промислова революція: як до неї готуватися (переклад). URL: <http://nubip.edu.ua/node/23076>
7. Kagermann H., Lukas W.-D., Wahlster W. 0 Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution (нім.). *VDI nachrichten*. 2011, April 1, №13. URL: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>;
8. Шмідт Ф., Бутирський З. Ганноверський ярмарок: Інтернет зливається з заводом. *Deutsche Welle*. 2013. URL: <http://www.dw.com/uk/ганноверський-ярмарок-інтернет-зливається-з-заводом/a-16728837>
9. Hermann M., Pentek T., Otto B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. URL: http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf
10. Business Insider. URL: <http://www.businessinsider.com/cyborgs-are-the-future-of-financial-advice-2017-2>
11. Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence a Modern Approach*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1995. 950 p.
12. Rosenfeld A., Kak A. *Digital Picture processing*. 2nd ed. New York: Academic Press, 1982. 476 с.
13. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. SMC-9. P. 62–66.
14. Sahoo P. K., Soltani S., Wong A. C., Chen Y. C. A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1988. Vol. 41. P. 233–260.
15. Ritter Gerhard X., Wilson Joseph N. *Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra*. 2nd Ed. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC press, 2000. 448 p.
16. Korzynska A., Roszkowiak L., Lopez C., Bosch R., Witkowski L., Lejeune M. Validation of Various Adaptive Threshold Methods of Segmentation Applied to Follicular Lymphoma Digital Images Stained with 3,3'-Diaminobenzidine&Haematoxylin. *Diagnostic Pathology*. 2013. Issue 8. Article number 48. DOI: 10.1186/1746-1596-8-48
17. Sauvola J. Pietikainen M. Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. 2000, **33**, 225–236. DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00055-2.
18. Hrytsyk V. V., Dunas A. Ya. Doslidzhennia metodiv rozpiznavannia obraziv dlia system kompiuternoho zoru robotiv maibutnoho. *Visnyk KhNTU*. 2017. № 3. Ч. 1, С. 297–301.

REFERENCES

1. Hrytsyk, V., Grondzal, A., Bilenkyj, A. (2015). Augmented Reality for People with Disabilities. *Proceedings of the International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, CSIT'2015 (Lviv, September 14–17, 2015)*. Lviv: Polytechnic National University, pp. 188–191.
2. Audio-Visual Answer to Modern Computing. (2010). *Research*eu Results Supplement*. **26**, 31–32.
3. Micho, Kaiku. (2013). *Fizyka maibutnoho*. Pereklala z anhl.. Anzhela Kamianets. Lviv: Litopys.
4. Software: Running Commentary for Smarter Surveillance? (2010). *Research*eu Results Supplement*. **24**, 29.
5. Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution: What it Means, How to Respond. *World Economic Forum*. Retrieved from: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond>

6. Schwab, K. The Fourth Industrial Revolution: how to prepare to Industry 4.0? (translate). Retrieved from: <http://nubip.edu.ua/node/23076>
7. Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution (нім.). *VDI nachrichten*. **13**. Retrieved from: <http://www.vdi-nachrichten.com/Technik-Gesellschaft/Industrie-40-Mit-Internet-Dinge-Weg-4-industriellen-Revolution>;
8. Schmidt, F., & Butyrskij, Z. (2013). Hannover exhibition: Internet-factory fusion. *Deutsche Welle*. Retrieved from: <http://www.dw.com/uk/ганноверський-ярмарок-інтернет-зливається-з-за заводом/a-16728837>
9. Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. Retrieved from: http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf
10. Business Insider. Retrieved from: <http://www.businessinsider.com/cyborgs-are-the-future-of-financial-advice-2017-2>.
11. Stuart, J. (1995). Russell and Peter Norvig. Artificial Intelligence a Modern Approach. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
12. Rosenfeld, A., & Kak A. (1982). Digital Picture processing. 2nd ed. New York: Academic Press.
13. Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Proceedings of the IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. **9**, 62–66.
14. Sahoo, P. K., Soltani, S., Wong, A. C., & Chen, Y. C. (1998). A Survey of Thresholding Techniques. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. **41**, 233–260.
15. Ritter Gerhard X., Wilson Joseph N. (2000). Handbook of Computer Vision Algorithms in Image Algebra. 2nd Ed. Boca Raton, London, New York, Washington: CRC press.
16. Korzynska, A., Roszkowiak, L., Lopez, C., Bosch, R., Witkowski, L., & Lejeune, M. (2013). Validation of Various Adaptive Threshold Methods of Segmentation Applied to Follicular Lymphoma Digital Images Stained with 3,3'-Diaminobenzidine&Haematoxylin. *Diagnostic Pathology*. **8**, 48. DOI: 10.1186/1746-1596-8-48
17. Sauvola, J., & Pietikainen, M. (2000). Adaptive document image binarization. *Pattern Recognition*. **33**, 225–236. DOI: 10.1016/S0031-3203(99)00055-2.
18. Hrytsyk, V. V., & Dunas, A. Ya. Doslidzhennia metodiv rozpiznavannia obraziv dlia system kompiuternoho zoru robotiv maibutnoho. *Visnyk KhNTU*. **3**, 1, 297–301.

Грицик Володимир Володимирович – д.т.н., професор Національного університету «Львівська політехніка», e-mail: volodymyrhrytsyk@gmail.com.