

Принципи Побудови Нейромережі для Відбору і Первинної Обробки Інформації з Елементами Зорового Аналізатора Людини

Віталій Боюн, чл.-кор. НАН України
Відділ інтелектуальних відеосистем реального часу
Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАНУ
Київ, Україна
vboyun@gmail.com

Principles of Constructing a Neural Network for the Selection and Primary Processing of Information with Elements of the Human Visual Analyzer

Vitaliy Boyun, C.-Member of National Academy of Sciences of Ukraine
Department of Intelligent Real Time Video Systems,
V.M.Glushkov Institute of Cybernetics NASU,
Kyiv, Ukraine
vboyun@gmail.com

Анотація—Для підвищення оперативності, продуктивності й ефективності створюваних відеосистем реального часу пропонується використати як прототип принципи організації нейромережі на рівні сітківки ока людини, зокрема: принципи близькодії з кільцевою організацією “on”- і “off”-центрів, спеціалізацію шарів нейронів, зворотні зв’язки між клітинами для управління сприйняттям, адаптацію розмірів рецепторних полів (так звана пластичність нейронів).

Abstract—To improve the efficiency, productivity and efficiency of the real-time video systems being created, it is proposed to use as a prototype the principles of the organization of the neural network at the level of the human eye, in particular: the principles of short-range interaction with the ring organization “on”- and “off”-centers, specialization of layers of neurons, feedback between cells for controlling perception, adapting the size of receptor fields (the so-called plasticity of neurons).

Ключові слова—відеосистема реального часу; зоровий аналізатор людини; кільцева організація нейронів; “on”- і “off”-центри; нейромережа; базатошарова обробка

Keywords—video system of real time, human visual analyzer, ring organization of neurons, “on”- and “off”-centers, neural network, multilayer processing

I. ВСТУП

Відеосистеми реального часу відіграють значну роль у системах автоматизації виробничих процесів, візуального контролю якості продукції, робототехніці, системах

оборонного і військового призначення, системах автоматизації наукових та медико-біологічних досліджень тощо. Причому діапазон їх застосування та вимоги до них постійно розширюються. Особливо це стосується відеосистем із зворотним зв’язком, де результати обробки інформації в реальному часі використовуються для управління процесом або інших дій. Такі системи висувають підвищені вимоги не тільки до продуктивності обчислювальних засобів, але і щодо запізнювання інформації в контурі зворотного зв’язку, які не забезпечуються в рамках традиційних підходів.

Зорова система людини вдосконалювалась упродовж мільйонів років і досягла надзвичайно високого рівня організації. Узагальнена модель зорової системи людини є багатофункціональною та складається з декількох десятків, а то й сотні, локальних моделей, які описують цілий ряд структурних, фізичних, геометричних і психофізичних механізмів і процесів. Процес сприйняття візуальної інформації людиною є динамічним, з багатьма змінюваними параметрами і багатьма зворотними зв’язками. Ми не тільки бачимо, ми й реагуємо, тобто такий процес є активним. Тому феномен зору надає надзвичайно багато різнопланових елегантних рішень для систем технічного зору.

II. ОРГАНІЗАЦІЯ СІТКІВКИ ЗОРОВОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ

Значна частина попередньої обробки зорової інформації відбувається вже на рівні сітківки. Центральна ямка і периферія сітківки організовані за кільцевим

принципом. Однак у центральній ямці кожна колбочка має вихід на гангліозну клітину, а на периферійній сітківці палички об'єднуються в групи, підсумовуючи сигнали з більших ділянок рецепторного поля і забезпечуючи підвищення чутливості при недостатньому освітленні (в обмін на зменшення просторової роздільності) [1-3].

Центральна ямка спеціалізована на чіткий зір, а периферія сітківки – на високу чутливість. Горизонтальні та дифузні клітини є гальмівними на рівні сітківки. Амакринові та інтерплексіформні клітини відповідають за адаптацію розмірів рецепторних полів. Клітини центральної ямки та сітківки організовані за кільцевим принципом (“on”- і “off”-центри).

З огляду на вищезазначене набуває актуальності задача побудови нейромереж високої продуктивності і ефективності для відеосистем реального часу з використанням принципів організації нейронів сітківки ока людини.

III. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗОРОВОГО АНАЛІЗАТОРА ЛЮДИНИ У ВІДЕОСИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Хоча напрямок підвищення вибіркової відеосистем реального часу [4-6] дозволяє значно підвищити їх ефективність, однак він не забезпечує можливості сприйняття і обробки відеоінформації про надшвидкісні об'єкти (наприклад, снаряд) або високодинамічні процеси. У той же час паралельний характер отримання зображення сенсорною матрицею погано узгоджується з подальшими послідовними процесами аналого-цифрового перетворення та обробки інформації, призводить до необхідності детального програмування цих процесів. Хоча при реалізації паралельної обробки має місце значна надлишковість в представленні інформації, однак за рахунок однорідної обробки інформації, зменшення пересилок та запам'ятовування, відсутності детального програмування послідовних процесів, також можливе значне підвищення продуктивності й ефективності обробки.

Нейромережева організація обчислень є надзвичайно ефективною. Однак традиційні нейромережеві обчислення, хоч існують вже десятки їх варіантів для розв'язання різних задач, є надзвичайно складними при апаратній реалізації і вимагають складного налаштування на задачу [7]. Як прототип пропонується використовувати методи організації сприйняття, обробки інформації та зв'язків між нейронами сітківки ока людини [1-3].

На організацію сприйняття відеоінформації значною мірою впливають рівень освітлення сцени та величина контрасту. Характеристикою рівня освітлення є середнє значення яскравості, а контраст визначається як середнє значення приростів яскравості по модулю (δ -ентропія) [4,5,8].

Ця інформація може бути використана для попереднього налаштування параметрів сприйняття відеоінформації. При високому рівні освітлення можливе детальне дослідження об'єкта за допомогою колбочок центральної ямки, організованих за кільцевим принципом. При цьому на вибір порогу впливає величина контрасту.

Високий рівень контрасту при реалізації „on”- і „off”-центрів для виділення інформативних ознак вказує на необхідність збільшення порогу бінаризації, в той час як невисокий рівень контрасту вимагає зменшення порогу бінаризації. Прикладом реалізації „on”-центру може бути маска Лапласа [9] розміром 3x3

виду 1

	-1	
-1	4	-1
	-1	

 або виду 2

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

У масці для реалізації „off”-центру знаки при коефіцієнтах змінюються на протилежні.

Зовсім малий контраст для забезпечення виділення інформативної ознаки вимагає нарощування гальмівних кілець навколо центрального збуджувального елемента і відповідного підвищення його ваги, тобто перехід від однокільцевої маски 3x3 до використання двокільцевих масок 5x5 тощо.

0	0	-1	0	0
0	-1	-2	-1	0
-1	-2	16	-2	-1
0	-1	-2	-1	0
0	0	-1	0	0

-1	-1	-1	-1	-1
-1	-2	-2	-2	0
-1	-2	32	-2	-1
-1	-2	-2	-2	-1
-1	-1	-1	-1	-1

При цьому степінь підсилення для масок Лапласа змінюється від 4, 8 до 16 та 32 відповідно.

Центральна ямка сітківки організована на колбочках, горизонтальних (HC), біполярних (BC) і гангліозних клітинах R-типу (GrC) за кільцевим принципом (“on”- і “off”-центри) (рис.1). Горизонтальні клітини є гальмівними. Зворотні зв'язки через амакринові (AC) клітини управляють сприйняттям контрасту шляхом зміни порогу або нарощування шарів нейронів навколо центрального.

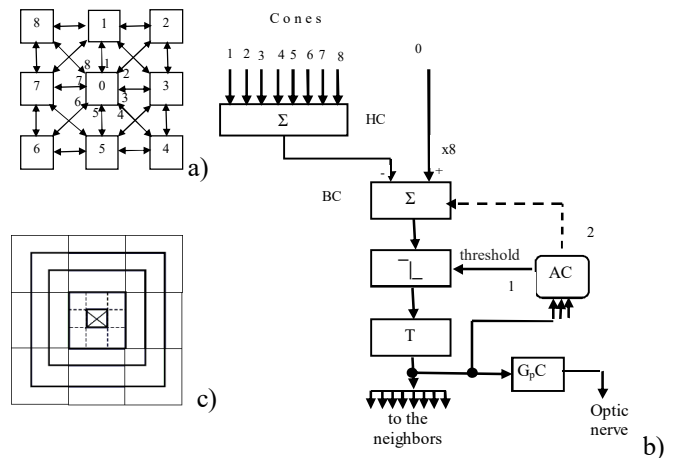


Рис. 1. Горизонтальні і біполярні клітини з нарощуванням кілець: а) кільцева організація нейронів у центральній ямці (“on”-центр): елемент “0” у центрі – збуджувальний, елементи “1–8” навколо – гальмівні; б) реалізація “on”-центру розміром 3x3; в) нарощування кілець навколо центрального елемента для підвищення чутливості до сприйняття контрасту

Така організація нейромережі добре узгоджується з напрацьованим арсеналом методів виділення різних інформативних ознак за допомогою масок Лапласа, Превіта, Робертса та ін. [9], завдяки чому можна ефективно підкреслювати контури, виділяти ознаки краю, виявляти інформативні точки, лінії, їхню орієнтацію, обчислювати градієнти тощо. Розглянута кільцева організація нейронів центральної ямки забезпечує підвищення контрасту, який збільшується з нарощуванням шарів нейронів навколо центрального елемента. Організація зв'язків між нейронами є досить універсальною і забезпечує можливість реалізації на такій структурі згорток з матрицями 3×3 , 5×5 , ... за рахунок збільшення часу обчислення. Усі обчислення на структурі виконуються паралельно. Слід також зауважити, що обчислення сум з виходів кільцевих нейронів та обчислення різниці між збуджувальним та гальмівними нейронами здійснюється послідовним кодом, що дозволяє реалізувати на такій схемі не тільки бітові коди після порогового обмеження, але і повнорозрядні коди. При цьому час обчислень збільшується практично пропорційно розрядності повнорозрядних кодів. Коефіцієнти матриць практично завжди можна прийняти числами, пропорційними степені двійки (0, 1, 2, 4, 8, ...), що виключає необхідність виконання операції множення.

Результати підсилення контрасту при використанні кільцевої організації нейронів з одним і двома кільцями навколо центрального елемента наведено на рис.2.

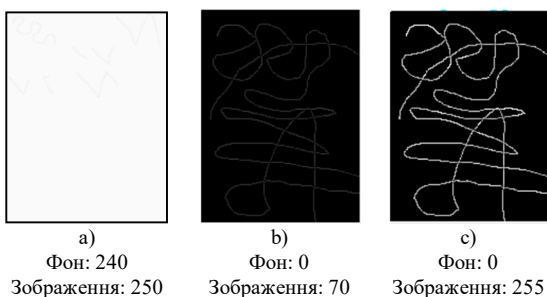


Рис. 2. Підсилення контрасту на колбочках центральної ямки за рахунок кільцевої організації нейронів: а) вхідне зображення; б) кільцева організація нейронів центральної ямки з маскою 3×3 ; в) кільцева організація нейронів центральної ямки з маскою 5×5

Корекцію параметрів сприйняття контрасту, по аналогії з функціями амакринових клітин, пропонується здійснювати шляхом оцінювання кількості колбочок (підключених до збуджувального входу біполярної клітини) на визначеній ділянці рецепторного поля, що здолали поріг дискретизації. При їх відсутності або невеликій кількості поріг знижується, поки не досягне заданого рівня, наприклад 10%, від загальної кількості колбочок цього рецепторного поля (вихід 1 на Рис. 1). Радикальніше діє вихід 2 амакринової клітини, який управляє нарощуванням кільця навколо центрального елемента.

Розглянемо деякі особливості роботи “on”- і “off”-центрів.

“On”-центри забезпечують виділення більш світлих об’єктів на темному фоні (показують внутрішню границю

об’єкта), а “off”-центри – навпаки, виділяють більш темні об’єкти на світлому фоні (показують зовнішню границю об’єкта). Результати роботи “on”- і “off”-центрів щодо світлих і темних об’єктів показано на рис.3.

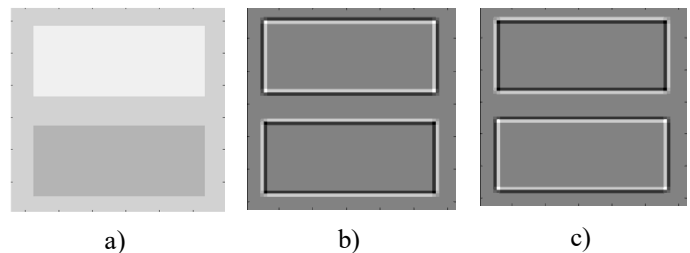


Рис. 3. Результати роботи “on”- і “off”-центрів при виділенні світлих (темних) об’єктів на темному (світлому) фоні: а) вхідні зображення; б) результат роботи “on”-центра; в) результат роботи “off”- центра. (Результати подані на шкалі ± 128 .)

Для більш точного розуміння процесів, які відбуваються при проходженні маски по зображенню, моделювання здійснюється в повнорозрядних кодах, тобто без порогового обмеження. Проведені дослідження дозволили виявити ряд цікавих і корисних особливостей обробки зображень масками. Наприклад, зазвичай для виділення контурів або виділення інформативних ознак здійснюється прохід по зображенню однією маскою, наприклад з “on”- або “off”-центром. Однак у зображеннях наявні елементи більш світлого кольору на фоні більш темного, і навпаки, а вони виділяються різними масками.

Пропонується адаптивно використовувати обидва центри. Для цього, в залежності від різниці між збуджувальним входом біполярної клітини та сумою гальмівних входів з горизонтальної клітини, використовується той або інший центр (можливо, цим процесом управляє амакринова або якась інша клітина). Якщо ця різниця додатна, то процес іде по “on”-центру, в протилежному випадку - по “off”-центру. При цьому від’ємні результати використання маски обнуляються. Результатом такого підходу є можливість відображати сцену з більш точними розмірами об’єктів незалежно від яскравостей фону і об’єктів (рис.4).

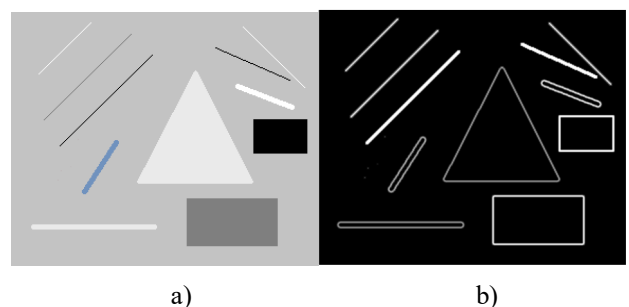


Рис. 4. Адаптивне використання “on”- і “off”-центрів: а) вхідне зображення, б) результат обробки.

Враховуючи широкі можливості адаптації нейронних зв’язків до форми, орієнтації тощо [10], розглянута організація елементів центральної ямки за рахунок зміни коефіцієнтів маски забезпечує також виявлення ліній, контурів, країв, обчислення градієнта тощо. Тобто

забезпечена можливість використовувати напрацьований арсенал масок не тільки по розмірам масок але і по функціям.

В умовах недостатнього рівня освітлення ефективно працюють палички сітківки за рахунок підсумовування сигналів з більших рецепторних полів, обмінюючи просторову роздільність на підвищення чутливості. Великий контраст у цих умовах не вимагає значного розширення рецепторних полів, тобто достатньо використання полів для підсумовування розміром 2x2, що дає підвищення чутливості сприйняття контрасту з використанням лапласіна 3x3 у $8 \times 4 = 32$ рази. При малому контрасті необхідно збільшувати рецепторні поля для підсумовування до 3x3, 4x4, що забезпечує степінь підсилення у $8 \times 9 = 72$ та $8 \times 16 = 128$ разів. При цьому розміри зображення зменшуються відповідно в 4, 9 та 16 разів.

Периферія сітківки спеціалізована на високу чутливість і організована на паличках сітківки, дифузних (DC), біполярних (BC) і гангліозних клітинах М-типу (G_{MC}) також за кільцевим принципом (рис. 5). Підвищення чутливості в умовах недостатнього освітлення забезпечується завдяки сумачі сигналів зі значної кількості паличок і дії гальмівних дифузних клітин. При цьому, відповідно, зменшується роздільна здатність по простору. Зворотні зв'язки через інтерплексіформні (IPSC) клітини управляють порогами або розмірами рецепторних полів.

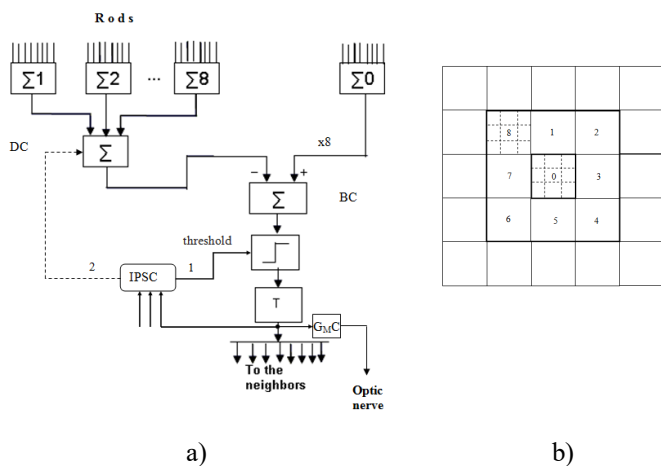


Рис. 5. Дифузні і біполярні клітини з нарощуванням кілець: а) реалізація кільцевої організації нейронів периферійної сітківки; б) нарощування кілець для підвищення чутливості в умовах недостатнього освітлення.

Результати підсилення чутливості периферійної сітківки шляхом сумачі сигналів масками 2x2, 3x3, 4x4 та їх кільцевої організації з маскою Лапласа 3x3 наведені на рис. 6.

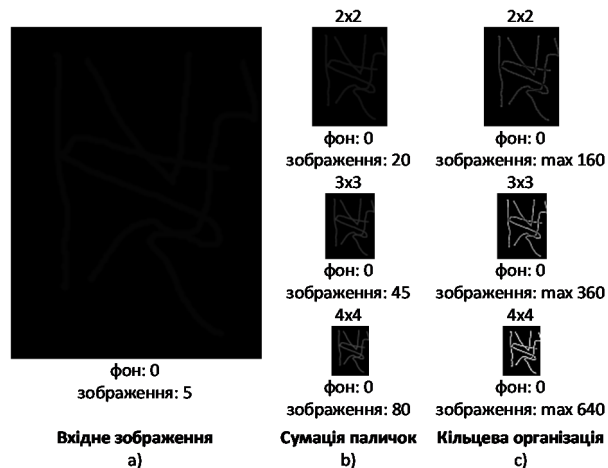


Рис. 6. Підсилення чутливості периферійної сітківки шляхом сумачі сигналів з паличок та їх кільцевої організації: а) вхідне зображення; б) результат підсилення за рахунок сумачі масками 2x2, 3x3, 4x4; в) результат підсилення за рахунок кільцевої організації з маскою Лапласа 3x3

Корекцію параметрів сприйняття зображення в умовах недостатнього освітлення, по аналогії з функціями інтерплексіформних клітин, пропонується здійснювати шляхом оцінювання кількості груп підсумованих паличок на визначеній ділянці рецепторного поля, що здолали поріг дискретизації. При їх відсутності або невеликій кількості вихід 2 інтерплексіформної клітини управляє нарощуванням кілець навколо центрального елемента.

Для реалізації зазначених вище підходів пропонується узагальнена структура нейромережі (рис.7), яка шляхом переналаштування на одному або декількох шарах нейронів, може працювати в режимі центральної ямки або периферійної сітківки.

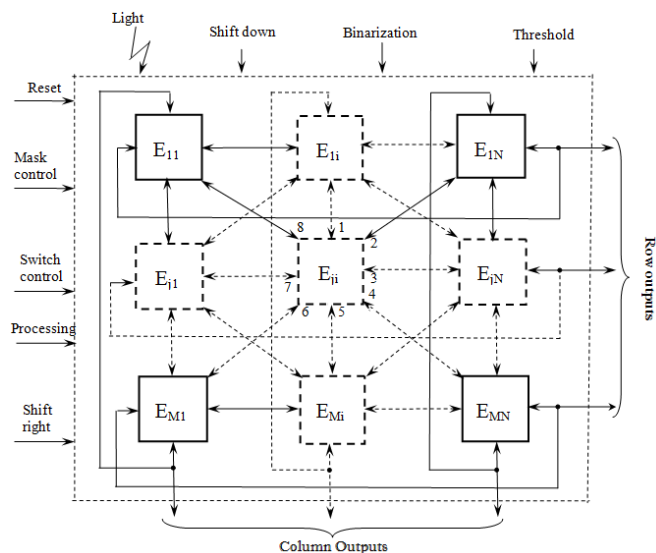


Рис. 7. Структура сенсорної матриці з обробкою зображень. Додаткові шари нейронів для обчислення моментів, визначення місцеположення об'єктів тощо.

Кожний елемент матриці має зв'язки тільки з сусідніми елементами матриці (принцип близькодії), тобто, по аналогії із зоровим аналізатором людини, може реалізувати on- і off-центри з кільцевою організацією.

Елемент матриці забезпечує сприйняття світла фотодетектором, бінарizaцію, виконання логікової обробки інформації, комутацію входів і виходів елемента матриці та кільцеві зсуви інформації вздовж рядків і стовпців матриці, а також запам'ятовування спочатку бінаризованої вхідної інформації, потім результатів логікової обробки або результатів зсуву.

Крім того, підключення на виходи рядків і стовпчиків сенсорної матриці додаткових пристроїв з мікроконтролером для управління процесами дозволяє значно розширити її функціональні можливості. Кільцеві зв'язки в рядках і стовпчиках матриці забезпечують не тільки зсув інформації в них, але й записування в матрицю проміжних результатів обчислень. Тобто це дозволяє використовувати матрицю декілька разів для послідовних процесів обчислення. При цьому може бути використаний цілий арсенал напрацьованих методів на базі масок для придушення шумів і покращення якості зображення, виділення країв, підкреслення або виділення контурів, виділення орієнтаційних ознак, обчислення градієнтів. Коефіцієнти масок задаються комплексно (тобто вказується тільки тип матриці) і відповідні процедури реалізуються без операції множення.

Середні значення яскравості й контрасту для попереднього налаштування матриці можуть бути обраховані на запропонованій матриці шляхом підключення накопичувальних суматорів на виходах рядків або стовпців. Зсуваючи зображення, наприклад вправо, і підсумовуючи значення яскравостей пікселів рядків, отримуємо середні значення по рядках, а потім, зсуваючи їх по вертикалі і накопичуючи в мікроконтролері, отримуємо середнє значення яскравості всього зображення. При розмірах зображення кратних степені 2 легко реалізується усереднення шляхом зчитування старших розрядів накопичувальних суматорів. Аналогічно може бути обраховане і середнє значення контрасту. При цьому можуть бути реалізовані підходи до адаптації налаштувань шляхом обчислення середніх значень яскравості і контрасту для окремих ділянок зображення.

З використанням зазначених методів розроблено ряд спеціалізованих технічних рішень, захищених патентами на винаходи, для суміщення процесів сприйняття відеоінформації з її обробкою безпосередньо на сенсорній матриці. Зокрема, це сенсорні матриці з паралельною бінарizaцією зображення і визначенням місцеположення

та параметрів об'єкта [11,12], з обчисленням перших і других моментів інерції бінаризованого зображення для рядків, стовпців і всього зображення [13], з морфологічною обробкою бінаризованого зображення [14], з паралельним аналого-цифровим перетворенням та можливістю нелінійного сприйняття яскравості [12].

ВИСНОВКИ

Таким чином, використання принципів організації нейронів зорового аналізатора людини на рівні сітківки дозволяє розробляти нейромережі високої продуктивності та спрощеного налаштування для відбору і первинної обробки інформації в системах реального часу.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] H.R. Schiffmann, Sensation and perception. 5-th ed. Piter, SPb., Russia, 2003. 928 p. (in Russian)
- [2] D. Anderson, Cognitive psychology. 5-th ed. Piter, SPb., Russia, 2002. 496 p. (in Russian)
- [3] V. Boyun, A human visual analyzer as a prototype for construction of the set of dedicated systems of machine vision. Transactions of the International conference "Artificial intelligence. Intelligent systems. II-2010, 2010, vol. 1, pp. 21-26. (in Ukrainian)
- [4] V. Boyun, Intelligent selective perception of visual information. Informational aspects. Artificial intellect. 2011. №3. pp.16-24. (in Ukrainian)
- [5] V. Boyun, Intelligent Selective Perception of Visual Information in Vision Systems. Proceedings of the 6-th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Application. (IDAACS'2011). (Czech Republic, Prague. 15-17 September 2011). -2011. - Vol.1. - P.412-416.
- [6] V. Boyun, Directions of Development of Intelligent Real Time Video Systems. Application and Theory of Computer Technology, [S.l.], v. 2, n. 3, p. 48-66, apr. 2017. ISSN 2514-1694. Available at: <<http://www.archyworld.com/journals/index.php/atct/article/view/65>>. Date accessed: 26 sep. 2017. doi: <https://doi.org/10.22496/atct.v2i3.65>.
- [7] O.G. Rudenko, E.V. Bodiensky, Artificial neural networks. The company "SMIT", Kharkov, 2005. 407 p. (in Russian)
- [8] V. Boyun, The dynamic theory of information. Fundamentals and applications. Institute of Cybernetics of NASU, Kyiv, Ukraine, 2001, 326 p. (in Russian)
- [9] R. Gonsales, R. Woods, Digital image processing. Technosphere, Moscow, Russia, 2005. 1072 p. (in Russian)
- [10] I.A. Shevelev, Neurons of visual cortex. Adaptability and dynamics of receptive fields. Nauka, Moscow, USSR, 1984. – 220 p. (in Russian)
- [11] V.P. Boyun, Device for determination and parameters of an object in an image. Ukraine Patent for an invention, № 76597, BI №6, 10.01.13. (in Ukrainian)
- [12] V.P. Boyun, Sensor device for determination of location and center of gravity of an object. Ukraine Patent for an invention, № 106292, BI №15, 11.08.14. (in Ukrainian)
- [13] V.P. Boyun, Sensor device for determination of location and moments of inertia of an object in an image. Ukraine Patent for an invention, № 106301, BI №15, 11.08.14. (in Ukrainian)
- [14] V.P. Boyun, Sensor matrix with image processing. Ukraine Patent for an invention, № 109335, BI №6, 10.08.15. (in Ukrainian)