

Масштабталатын маскалар көмегімен сандық бейнелерге доминантты құрылымдарды бөлуге арналған әдістер

¹КАЗАНЦЕВ Иван Гаврилович, ф.-м.ф.д., аға ғылыми қызметкер, kazantsev.ivan@gmail.com,

^{2,3*}МУХАМЕТЖАНОВА Бигуль Олжабаевна, докторант, grek79@mail.ru,

³СҮЛЕЙМЕН Айнұр Елубайқызы, аға оқытушы, ai-box@mail.ru,

³ТАУ Ардақ Ғалымжанқызы, аға оқытушы, ardak-tau@mail.ru,

³СМАГУЛОВА Асемгуль Сериковна, к.т.н., доцент, assemgul_work@mail.ru,

¹Есептеу математикасы және математикалық геофизика институты, Ресей, 630090, Новосибир, академик Лаврентьев даңғылы, 6,

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қазақстан, 010008, Нұр-Сұлтан, Сәтпаев көшесі, 2,

³Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Функциялардың белгілі бір түрлерін алу және кескін мазмұнын анықтау үшін компьютерлік көру жүйелерінде қолданылатын бұрыштардың анықтаулы көрсетілген. Екі өлшемді сандық кескіндердегі бұрыштық құрылымдарды бөлшектеу үшін масштабталатын маскалар қарастырылады. Маска – бұл 2D терезесі, кескіннің бойымен сырғып, кескін фрагменттерімен бүктелген. Біз кішірек масканы оның жақтары мен жиектері бойымен кеңейтуге негізделген масштабталатын 2D маска моделін ұсынамыз. Бұл жағдайда субматрицалар өзгеріссіз қалады, ал жаңа элементтердің пайда болуы – субматрицаның элементтерін бұрыштық құрылымын сақтай отырып қайталау. Сынақ кескінімен сандық эксперименттер жүргізілді.

Кілт сөздер: бейнені өңдеу, жылжымалы терезе, масштабталатын маска, бұрыштарды анықтау, компьютерлік көру, бейнені өңдеу, кескінді тану, морфологиялық кескін әдістері, кескінді сегментациялау, бұрыштар, доминантты құрылымдар.

Кіріспе

Бұл жұмыста дәстүрлі әдіспен бейнелердегі бұрыштарды анықтауға арналған жаңа маскалар қарастырылады [1]. Бұрыштарды анықтаудың кейбір шуылға қарсы және тиімді алгоритмдерін жасауға қызығушылық бірнеше ондаған жылдар бойы компьютерлік көру және бейнелерді өңдеудің көптеген салаларында болды [2]-[4]. Жеке өзекті мәселе бет-әлпетті тану, жергілікті екілік үлгілер бинарлық әдісі ерекше қолданылады. Бұл тәсіл бағытталған туындылардың нұсқасын қолданады және Кирштің дифференциалды маскалары ретінде белгілі [5].

Бұрыштық құрылымдардың шыңдары немесе бұрыштық нүктелер кескіннің маңызды жергілікті ерекшелігі болып табылады және доминантты, сипаттамалық, сингулярлық немесе қызығушылық нүктелері деп аталатын сыныпқа жатады. Бұрыштар айналу мен жарық жағдайларының өзгеруіне өзгермейді. Олар бет-әлпетті (мысалы, көздің бұрыштарын), саусақ іздерін және мәтіндердегі әріптерді тану кезінде, сондай-ақ бақылау кезінде белгілер мен белгілер

ретінде кеңінен қолданылады. Соңғы жылдары үш өлшемді ақпарат алуға мүмкіндік беретін терең камералар мен басқа стерео сенсорларды кеңінен қолдана отырып, бұрыштарды анықтаудың қызықты саласы пайда болды [6]. Маңызды қосымшаларға камераны калибрлеу, роботты шарлау және машинаны көру, сурет салу және үлгіні тану кіреді. Біздің соңғы жұмыстарымызда бейнелердегі бұрыштарды анықтау үшін масштабталатын маскалар алдық [7], [8]. Бұл жұмыста біз масштабталатын маскаларды, Кирш маскаларын және FAST алгоритмін қолдана отырып, сынақ бейнелердегі бұрыштарды табу үшін компьютерлік эксперименттер жүргіземіз (Features from Accelerated Segment Test) [9].

Әдістер

Қосымшаларға байланысты бұрыштың өзі бұрыштың жоғарғы жағы деп те аталады, яғни, жеке нүкте және аз жергілікті объект, оның ішінде шыңнан басқа, одан таралатын сәулелер, сонымен қатар бүкіл бұрыштық құрылым. Екі өлшемді кескіндерді өңдеу кезінде бұрыштың шекарасын

құрайтын жақтар бейненің (бұрыштың) бір облысы мен екіншісінің (фонның) айырмашылығын сипаттайтын жарықтылықтың басым өзгерістері көзбен шолып байқалатын түзу сызықтарға (жиктерге) қосылады. Бұрыштарды табудың кең таралған тәсілдерінің бірі-шекараларды анықтау және бинаризация, сонымен қатар бейненің екілік аналогындағы кейінгі анықтау процедуралары. Бұл әдіс екінші туынды нөлге тең болған кезде нүктенің төңірегіндегі бейненің жарықтығын зерттеуге және белгіні шекараға қалыпты бағытта өзгертуге негізделген. Бұл жұмыста шеттер мен бинаризацияны жасамайтын алгоритмдер тобы қарастырылады және ол жартылай реңкті бейнемен тікелей жұмыс істейді, оның элементтерін жергілікті көршімен сканерлейді және кескін фрагментінің бұрыштық құрылым моделін бағдарламалайтын маскамен корреляциясын есептейді. Бұрыштың ішкі ауданы шамамен үстірт деп болжанады. Масканың өлшемі біркелкі емес, бейнені сканерлеген кезде масканың орталық элементі зерттелетін бейне фрагментінің ортасына орналастырылады. Бейненің әр элементі үшін фрагменттің түйісу мәндері және орталық элементтің айналасындағы әртүрлі бұрылыстар үшін маска есептеледі. Олардың максималды абсолютті мәні нүктеде бұрыштың болу өлшемі ретінде сақталады.

Көптеген дифференциалды маскарлар немесе екі өлшемді түйіннің дискретті ядролары белгілі [1]. Маскарларды салу схемаларының арасында Кирш маскасы [5] ерекшеленеді, ол бағытталған шекараларды еліктейді:

$$K^1 = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & -3 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}, K^2 = \begin{bmatrix} -3 & 5 & 5 \\ -3 & 0 & 5 \\ -3 & -3 & -3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Мұнда біз сегіз айналмалы нұсқаның алғашқы екеуін көрсетеміз. Қарастырылып отырған детекторлар масштабталмайтын қасиетке ие, бұл жылдам есептеуді ұйымдастыруға қиындық тудырады. Мысалы, 3×3 маскасымен сканерленген деректерді үлкен маскарлармен есептеулерде қолдану қиын. Біртіндеп өсіп келе жатқан мөлшердегі маскарлармен есептеулер сызықтық және аудан параметрлері және бұрыштың фондық аймаққа өту сәті туралы ақпаратты қамтиды. Кирш маскарларымен салыстырғанда (1) масштабталатын маскарлар бұрыштық құрылым мен фон арасындағы шекара белгілі бір пиксельдің ішінде оның ортасынан өтеді, ал екі іргелес пиксель олардың жақтары мен шеттерінде. 3×3 масштабталатын маскарлар (1) салыстыру үшін көрсетілген:

$$W_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}, W_2^2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 3 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Мұнда W_n^r масканың r – бұрылған нұсқасын білдіреді ($r=1, \dots, R$) өлшемі $N \times N$ $N=2n-1$. Біз масштабталатын маскарларды модельдеудің негізгі принциптерін жинақтаймыз. Біріншіден,

матрицаның үлкен өлшемдерге дейін кеңейту мүмкіндігі бар. Жоғарғы (0) масканың ортасында орналасқан, ал бұрыштық қабырғалар ($a-s$) бұрыштық денені ($c-s$) бос ұяшықтарға фондық мәндер ($d-s$) берілген жерде. Бізге кейбір анықтамалар қажет.

$$\left\{ \begin{array}{l} W_3^1 = \begin{bmatrix} a & c & c & c & a \\ d & a & c & a & d \\ \vdots & d & 0 & d & \vdots \\ \vdots & \vdots & d & \vdots & \vdots \\ d & d & d & d & d \end{bmatrix} \\ W_2^3 = \begin{bmatrix} d & d & a & c & c \\ \vdots & d & a & c & c \\ \vdots & d & 0 & a & a \\ \vdots & d & d & d & d \\ d & d & d & d & d \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3)$$

Бұрыштық маска моделі өзіне ұқсастық принципін қамтиды, бұл n саны көбейген сайын бұрыштық жақтардың a мәні берілген тарату сызығы бойымен таралады (жолдар, бағандар, диагональдар). Сонымен қатар, бұрыштық дененің ішкі элементтерінің c мәндері масканың ортасынан оның шетіне дейін таралады, ал d фондық мәндері маска аймағын бұрыштық элементтерге қосымша етіп толтырады. Масканың орталық жазбасы барлық маска жазбаларының қосындысы сияқты нөлге тең таңдалады. Бұл осы типтегі жылжымалы маскамен жинақтау арқылы жасалған кескінге дифференциалды әсерді түсіндіреді.

$|A_n|, |C_n|, |D_n|$, және $|O_n| = 1$ арқылы a, c, d , және 0 мәндері бар маска жазбаларының санын арқылы белгілейміз. W_n маскасының барлық жазбаларының саны (ыңғайлы болу үшін жол үсті индекстері төмендетіледі) $|W_n| = (2n-1)^2$ тен. $|A_n|, |C_n|, |D_n|$ мәндерін есептеп, дифференциалды маска жағдайын келесідей жазамыз.

Біз $|A_n|, |C_n|, |D_n|$ мәндерін жалпы түрде білдіре аламыз:

$$\begin{cases} |A_n| = 2(n-1) \\ |C_n| = (n-1)^2 \\ |D_n| = (n-1)(3n-1) \end{cases}. \quad (4)$$

Дифференциалды маска жағдайын жазамыз

$$|A_n| a + |C_n| c + |D_n| d = 0. \quad (5)$$

Содан кейін біз дифференциалды жағдайға келеміз (5):

$$2a + (n-1)c + (3n-1)d = 0. \quad (6)$$

Матрицалардың масштабталуына байланысты бізде еркін m үшін тағы бір ұқсас теңдеу бар:

$$2a + (m-1)c + (3m-1)d = 0. \quad (7)$$

(7)-ден (6) алып тастағанда, біз аламыз:

$$c + 3d = 0. \quad (8)$$

Содан кейін c -ны (6) ауыстырыңыз және d тұрғысынан шешім табыңыз:

$$(a, c, d) = (-d, -3d, d) = -d(1, 3, -1). \quad (9) \quad \text{335}$$

Салыстырмалы түрде қарапайым салмақ $(a, c, d) = (1, 3, -1)$ 90 градус бұрыштардың масштабталатын маскасын құрайды. Жұмыста 45 және 135 градус бұрыштардың масштабталатын маскалары [7].

Есептеу схемасы

F үлкен f кескінінің бір бөлігін (яғни фрагменті) N^2 өлшеммен белгілесін, онда W_n ($N=2n-1$) жылжымалы терезесі F өлшеммен бірдей мөлшерде тоқтады. Фрагменттің ұқсастық өлшемі және W_n айналмалы нұсқасы, W_n^r , $r=1, \dots, R$ маскасын белгілі бір сәйкестендіруден алуға болады (Гильберт кеңістігінің таңдалған нормасында):

$$\|F - W_n^r\|^2 = \|F\|^2 - 2\langle F, W_n^r \rangle + \|W_n^r\|^2. \quad (10)$$

Осы арақатынастан F фрагменті $\|W_n^r\|^2 = \text{const}$ арқасында $\langle F, W_n^r \rangle$ максимумын тауып, W бұрышымен жақсырақ жақындатылған. Содан кейін бұрышты анықтау өлшемі келесі түрде тұжырымдалуы мүмкін:

$$Q = \max_{r,n} \langle F, W_n^r \rangle. \quad (11)$$

Ағымдағы координаттары (i, j) пиксельде орналасқан N^2 өлшемді F фрагменті F кескін өрісі бойымен қозғалса, W_n^r , $r=1, \dots, R$ маска матрицасы бар f фрагментінің скаляр көбейтіндісі есептеледі:

$$q_n^r(i, j) = \langle F, W_n^r \rangle. \quad (12)$$

R айналу арасындағы максималды жауаптардың бейнесін есептейміз, $R=8$:

$$Q_n^R(i, j) = \max_{r=1, \dots, R} |q_n^r(i, j)|. \quad (13)$$

Масканың бағыты кезінде максималды жауап пайда болады деп күтілуде, ол фрагментте байқалған бұрыштың бұрылуына жақсы сәйкес келеді. Бұрыштың оның жақтары бойымен кеңістіктік кеңеюін басқа параметрді өзгерту арқылы бағалауға болады n маскасының өлшемі. Ол үшін біз M бүтін санын пайда болатын бұрыштың максималды мөлшерін бағалау ретінде таңдаймыз және масканың өсуіне максималды жауаптардың бейнесін есептейміз:

$$Q_M^R(i, j) = \max_{n=1, \dots, M} |Q_n^R(i, j)|. \quad (14)$$

Сынақ бұрышының көлемінің ұлғаюымен реакция бұрыштың кеңею шегіне дейін өседі деп болжанады, ал оларға жеткенде реакция қанығады немесе масканың әсерінен күрделі оқиға пайда болады. Q_M бейненің визуалды қасиеттерін зерттей отырып, бұрыштық нүктелерде үлкейтілген мәндері бар бастапқы бейненің нұсқасын байқаймыз. Енді бұрыштық нүктелерді бейнедегі маңызды немесе үстем нүктелерді қалдыратын жіктеу шегін енгізу арқылы алуға болады. Нәтижесінде Q_M (14) жауап мәндерінің диапазонындағы шашырау «күшті» және «әлсіз» бұрыштардың терминдері үшін негіз болады. Бұрыштарды таңдаудың бір нұсқасы – күшті (әлсіз) бұрыштардың берілген санын таңдау. Бұл мәселелерді шешу параметрлер саласындағы бұрыштық ерекшеліктерді

(r, n, M) және жергілікті экстремумдармен көп уақытты қажет ететін операцияларды толық сипаттауды қажет ететін сияқты.

Жұмыс нәтижесі

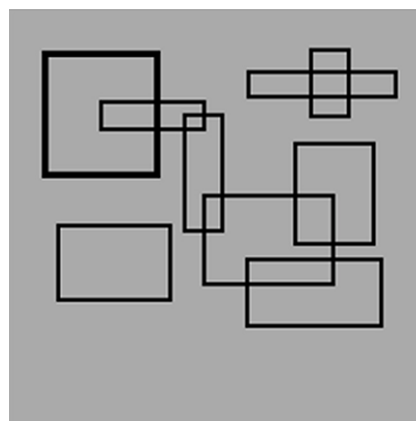
Бұл бейнеде Кирш маскалары мен жаңа масштабталатын маскалар жасалынған 128 оң жақ бұрыш бар. Көрсетілген мекен-жайда FAST (features from accelerated segment test) бағдарламасының авторлары барлық 128 бұрышты дұрыс анықтау арқылы бағдарламаның жұмысын бейнелейді. Алгоритмнің сипаттамасын жұмыста табуға болады [10]. MATLAB пакетін қолдана отырып, біз бейнені (512²) компьютердің жадын оқиымыз (1-сурет).

Q критерийін есептеңіз (2-сурет) Маска өлшемімен 3².

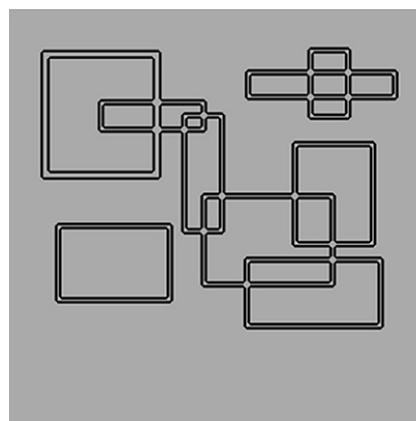
Көрнекі Q критерийі көрсетілген, 9² өлшемді масштабталатын маска көмегімен есептелген. Үлкен масканы тегістеу әсері байқалады (3²-ші маскамен салыстырғанда (3-сурет).

128 квадраттары бар бастапқы бейне ұсынылған, олардың орталықтары бұрыштық құрылымдардың шыңдарын көрсетеді (4-сурет).

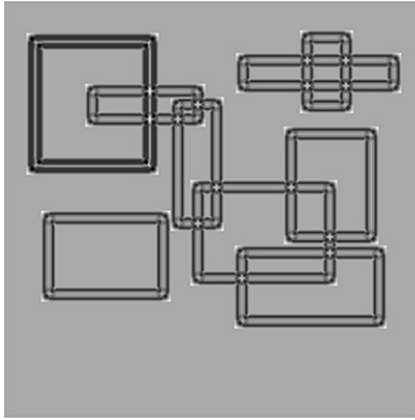
Сандық эксперименттер жаңа масштабта-



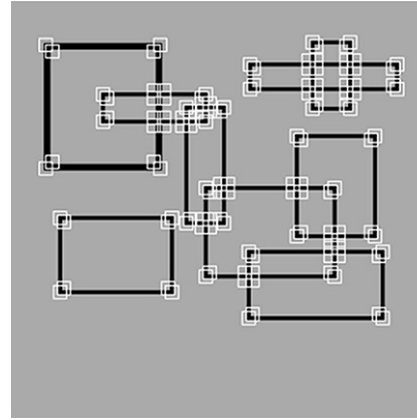
1-сурет – Сынақ суреті



2-сурет – Q өлшемінің мәндерін визуализациялау. Басым нүктелер қараңғы жарықтығы бар пикселдерде орналасқан



3-сурет – Q критерии мәндерін визуализациялау, 90 градус 9×9 бұрыш маскасын қолдана отырып есептелген



4-сурет – FAST детекторларын, Кирш маскарларын және жаңа маскарларды қолдана отырып, 90 градус бұрыштарды алу нәтижесі. Таңдалған бұрыштардың саны барлық үш әдіс үшін бірдей және 128 бұрыштық шыңдарға тең

латын маскарлардың анықталуын дәстүрлі FAST детекторларымен және Кирш маскарларымен салыстыруға болатындығын көрсетеді. Таңдалған бұрыштардың саны барлық үш әдіс үшін бірдей және 128 бұрыштық шыңдарға тең.

Қорытынды

Масштабталатын детекторларды құруға ыңғайлы бұрыштарды анықтауға арналған маска матрицалары ұсынылған. Ұсынылған тәсілмен анықталатын құрылымдарға екі өлшемді массивтің ортасында шыңдары бар бұрыштар жатады. Бұл құрылымдар бейнелер массивін қайта өту үшін жылжымалы терезені қажет етпейді, өйткені

біріктіру шекаралармен немесе периметрлермен жұмыс істейтін төменгі деңгейдегі негізгі процедураларға негізделген шкаланың немесе иерархияның келесі деңгейінде жүреді. Бұл әдісті дәстүрлі Кирш маскарларымен және жылдам бейнені талдау алгоритмімен қатар қолдануға болады, бірақ маскарлардың мөлшерін таңдауға шектеусіз. Біз бірнеше рет жинақтауды есептеу кезінде жылдам Фурье түрлендіруімен компьютерлік уақытты үнемдеуге болады деп күтеміз. Жан-жақты сандық эксперименттер мен салыстырмалы зерттеулер, соның ішінде басқа тиімді бұрыштарды анықтау алгоритмдері жақын болашақта зерттеу тақырыбы болып табылады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. R.C. Gonzalez and R.E. Woods. Digital Image Processing. NY: Pearson, 2018.
2. W. Zhang, C. Sun, T. Breckon and N. Alshammari. «Discrete curvature representations for noise robust image corner detection». IEEE Trans. on Image Processing, vol. 28, pp. 4444-4459, 2019.
3. A. Dutta, A. Kar and B.N. Chatterji. «Corner Detection Algorithms for Digital Images in Last Three Decades». Institution of Electronics and Telecommunication Engineers Technical Review, vol. 25, pp. 123-133, 2008.
4. J. Chen, L. Zou, J. Zhang and L. Dou. «The Comparison and Application of Corner Detection Algorithms». Journal of Multimedia, vol. 4, pp. 435-441, 2009.
5. B.H. Shekar and K.P. Uma. «Kirsch directional derivatives based shot boundary detection: an efficient and accurate method». Procedia Computer Science, vol. 58, pp. 565-571, 2015.
6. I. Sipiran and B. Bustos. «Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes». Visual Computer, vol. 27, pp. 963-976, 2011.
7. I.G. Kazantsev, B.O. Mukhametzhanova, K.T. Iskakov and T. Mirgaliyzy. «Detection of the Corner Structures in Images by Scalable Masks». Journal of Applied and Industrial Mathematics, vol. 14, pp. 73-84, 2020.
8. I.G. Kazantsev, B.O. Mukhametzhanova and K.T. Iskakov. «Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks». Siberian Electronic Mathematical Reports, vol. 18, pp. 61-71, 2021.
9. Starovoitov V.V., Eldarova E.E. and Iskakov K.T. «Comparative analysis of the SSIM index and the Pearson coefficient as a criterion for image similarity». Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, vol. 8, pp. 76-90, 2020.
10. E. Rosten, R. Porte, and T. Drummond. «Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, pp. 105-119, 2010.

Методы выделения доминантных структур на изображениях с помощью масштабируемых масок

¹КАЗАНЦЕВ Иван Гаврилович, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник, kazantsev.ivan@gmail.com,

^{2,3*}МУХАМЕТЖАНОВА Бигуль Олжабаевна, докторант, grek79@mail.ru,

³СУЛЕЙМЕН Айнура Елубайкызы, старший преподаватель, ai-box@mail.ru,

³ТАУ Ардак Галымжанкызы, старший преподаватель, ardak-tau@mai.ru,

³СМАГУЛОВА Асемгуль Сериковна, т.ф.к., доцент, asemgul_work@mail.ru,

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики, Россия, 630090, Новосибирск, пр. академика Лаврентьева, 6,

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Казахстан, 010008, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2,

³Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Н. Назарбаева, 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Показано обнаружение углов, используемых в системах компьютерного зрения для извлечения определенных видов функций и определения содержания изображения. Рассмотрены масштабируемые маски для выделения угловых структур в двумерных цифровых изображениях. Маска представляет собой 2D-окно, скользящее по изображению и свернутое с фрагментами изображения. Мы предлагаем модель масштабируемой 2D-маски, основанную на расширении меньшей маски вдоль ее сторон и краев. При этом подматрицы остаются неизменными, а генерация новых элементов заключается в повторении элементов подматрицы, сохраняя структуру угла. Проведены численные эксперименты с тестовым изображением.

Ключевые слова: обработка изображений, раздвижное окно, масштабируемая маска, обнаружение углов, компьютерное зрение, обработка изображений, распознавание изображений, морфологические методы изображений, сегментация изображений, углы, доминантные структуры.

Methods for Selecting Dominant Structures in Images Using Scalable Masks

¹KAZANTSEV Ivan, Dr. Phys. and Math. Sci., Senior Researcher, kazantsev.ivan@gmail.com,

^{2,3*}MUKHAMETZHANOVA Bigul, doctoral student, grek79@mail.ru,

³SULEIMEN Ainur, Senior Lecturer, ai-box@mail.ru,

³TAU Ardak, Senior Lecturer, ardak-tau@mai.ru,

³SMAGULOVA Asemgul, Cand. Tech. Sci., Associate Professor, asemgul_work@mail.ru,

¹The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Russia, 630090, Novosibirsk, Academic Lavrentiev Avenue, 6,

²L.N. Gumilyov Eurasian National University, Kazakhstan, 010008, Nur-Sultan, Satpayev Street, 2,

³Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. Shows the angle detection, used in computer vision systems to extract certain types of functions and determine the content of the image. Scalable masks for highlighting angular structures in two-dimensional digital images are considered. The mask is a 2D window that slides over the image and is collapsed with fragments of the image. We propose a model of a scalable 2D mask based on the expansion of a smaller mask along its sides and edges. At the same time, the submatrices remain unchanged, and the generation of new elements consists in repeating the elements of the submatrix, preserving the structure of the angle. Numerical experiments with the test image were carried out.

Keywords: image processing, sliding window, scalable mask, angle detection, computer vision, image processing, image recognition, morphological image methods, image segmentation, angles, dominant structures.

REFERENCES

1. R.C. Gonzalez and R.E. Woods. Digital Image Processing. NY: Pearson, 2018.
2. W. Zhang, C. Sun, T. Breckon and N. Alshammari. «Discrete curvature representations for noise robust image corner detection». IEEE Trans. on Image Processing, vol. 28, pp. 4444-4459, 2019.
3. A. Dutta, A. Kar and B.N. Chatterji. «Corner Detection Algorithms for Digital Images in Last Three Decades». Institution of Electronics and Telecommunication Engineers Technical Review, vol. 25, pp. 123-133, 2008.
4. J. Chen, L. Zou, J. Zhang and L. Dou. «The Comparison and Application of Corner Detection Algorithms». Journal of Multimedia, vol. 4, pp. 435-441, 2009.
5. B.H. Shekar and K.P. Uma. «Kirsch directional derivatives based shot boundary detection: an efficient and accurate method». Procedia Computer Science, vol. 58, pp. 565-571, 2015.
6. I. Sipiran and B. Bustos. «Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes». Visual Computer, vol. 27, pp. 963-976, 2011.
7. I.G. Kazantsev, B.O. Mukhametzhanova, K.T. Isakov and T. Mirgalikzy. «Detection of the Corner Structures in Images by Scalable Masks». Journal of Applied and Industrial Mathematics, vol. 14, pp. 73-84, 2020.
8. I.G. Kazantsev, B.O. Mukhametzhanova and K.T. Isakov. «Detection of the corner structures in 3D arrays using scalable masks». Siberian Electronic Mathematical Reports, vol. 18, pp. 61-71, 2021.
9. Starovoitov V.V., Eldarova E.E. and Isakov K.T. «Comparative analysis of the SSIM index and the Pearson coefficient as a criterion for image similarity». Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications, vol. 8, pp. 76-90, 2020.
10. E. Rosten, R. Porte, and T. Drummond. «Faster and Better: A Machine Learning Approach to Corner Detection». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, pp. 105-119, 2010.