

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ РАЗЛИЧИЙ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Корнилов Ф.А.

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН

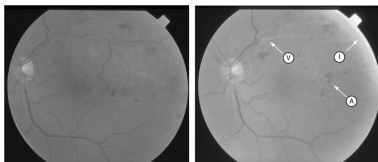
Отдел прикладных проблем управления

г. Екатеринбург, 2015

Поиск различий изображений



Анализ видеопоследовательностей →
<http://changedetection.net>



← Обработка цифровых космических снимков земной поверхности

<http://www.landinformationssystem.at/>



Lu D., Mausel P., Brondizio E., Moran E.
Change detection techniques // International Journal of Remote Sensing, June 2004. Vol. 25, № 12. P. 2365–2401.



← Биомедицинские приложения



Radke R.J., Andra S., Al-Kofahi O., Roysam B. Image change detection algorithms: a systematic survey // IEEE Transactions on image processing, Mar. 2005. Vol. 14, № 3. P. 294–307.

Структурные и неструктурные различия



Предыстория

- Радиометрическая коррекция:

Yang X., Lo C.P. Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multi-Date Satellite Images // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, August 2000. Vol. 66, № 8. P. 967–980.

- Текстуальные признаки:

le Hegarat-Masclé S., Seltz R., Hubert-Moy L., Corgne S., Stach N. Performance of change detection using remotely sensed data and evidential fusion: comparison of three cases of application // International Journal of Remote Sensing, 2006. Vol. 27, № 16. P. 3515–3532.

- Анализ контуров:

Li W., Li X., Wu Y., Hu Z. A Novel Framework for Urban Change Detection Using VHR Satellite Images // IEEE The 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). Hong Kong, 2006. P. 312–315.

- Аэросъемка и 3D модели:

Huertas A., Nevatia R. Detecting changes in aerial views of manmade structures // Image and Vision Computing, May 2000. Vol. 18, № 8. P. 583–596.

- Анализ видеопоследовательности:

Fang C.-Y., Chen S.-W., Fuh C.-S.. Automatic change detection of driving environments in a vision-based driver assistance system // IEEE Trans. Neural Networks, May 2003. Vol. 14, № 3. P. 646–657.

- Выбор порога:

Bruzzone L., Prieto D.F. An Adaptive Semiparametric and Context-Based Approach to Unsupervised Change Detection in Multitemporal Remote-Sensing Images // IEEE Transactions on image processing, April 2002. Vol. 11, № 4. P. 452–466.

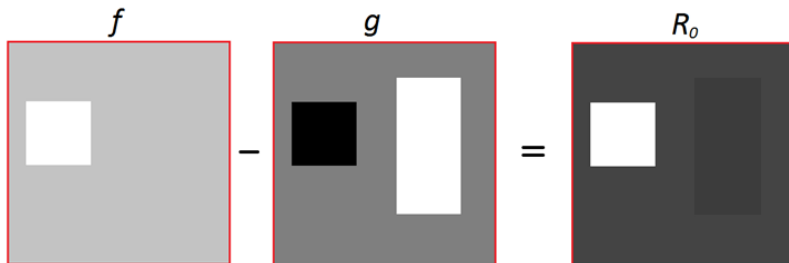
Цель работы

Исследовать класс алгоритмов поиска структурных различий, основанных на предварительном относительном яркостном выравнивании входных изображений.

Основные задачи

1. Разработать математическую формализацию задачи поиска структурных различий изображений, включающую математическую модель структурных различий и постановку задачи их обнаружения.
2. Разработать алгоритм поиска структурных различий на основе морфологического проектора. Построить распределения ошибок обнаружения и вычисление оптимальных параметров алгоритма.
3. Провести вычислительный эксперимент для сравнения и исследования различных модификаций алгоритма.
4. Разработать пакет программ “Детектор структурных различий” для обработки данных дистанционного зондирования Земли.

1.1. Разность исходных изображений

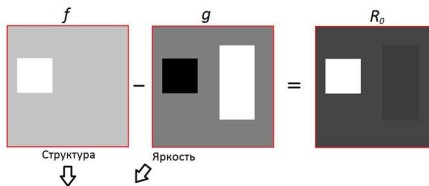


1.2. Структура изображения

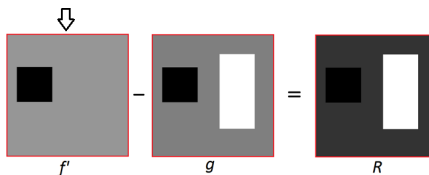
Определение

Структурой Ω изображения f назовем семейство $\mathcal{L}_f = \{L_f(i)\}_i$ множеств уровня $L_f(i) = \{x \in X \mid f(x) = i\}$ функции f .

1.3. Морфологический проектор



$$P_f g(x) = \sum_i \frac{\sum_{x' \in X} g(x') \cdot \chi_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \chi_i^f(x')} \cdot \chi_i^f(x), \text{ где } \chi_i^f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } f(x) = i, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$



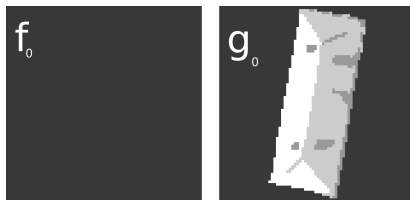
Пытьев Ю.П., Чуличков А.И. Методы морфологического анализа изображений. –М.: ФизМатЛит, 2010. 336 с.

1.4. Общая схема алгоритма поиска структурных различий

Для каждого положения сканирующего окна размера $d \times d$ выполняются следующие шаги:

1. Построение проекций $f' = P_g f$ и $g' = P_f g$.
2. Вычисление разностных изображений: $R_{fg}(x) = |f'(x) - g(x)|$ и $R_{gf}(x) = |g'(x) - f(x)|$.
3. Симметризация результата: $R(x) = \max(R_{fg}(x), R_{gf}(x))$.
4. Пороговая обработка R .

2.1. Математическая модель структурного различия 1



К каждому изображению добавляется дискретный, стационарный и независимый в каждой точке аддитивный шум с известными параметрами распределений η и ξ .

В результате получается два случайных поля:

$$f = \{f(x_i)\}_{i=1}^S = \{f^0(x_i) + n_\eta\}_{i=1}^S$$

$$g = \{g(x_i)\}_{i=1}^S = \{g^0(x_i) + n_\xi\}_{i=1}^S$$

2.2. Задача локализации структурного различия.

Постановка

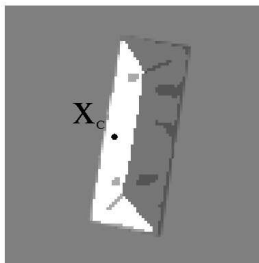
Требуется построить методику расчета условных вероятностей:

У с л о в и е 1: $p(R(x_c) = i \mid x_c \text{ принадлежит объекту}) \equiv r^+(i)$.

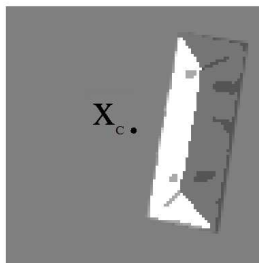
У с л о в и е 2: $p(R(x_c) = i \mid x_c \text{ принадлежит фону}) \equiv r^-(i)$.



Изображение 1



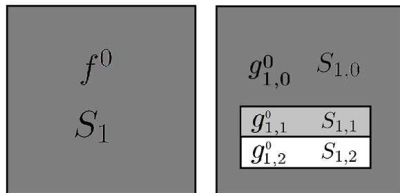
Изображение 2
Условие 1



Изображение 2
Условие 2

2.3. Задача локализации структурного различия. Параметры

Входные данные:



Параметры распределений шума η и ξ .

Результат:

Распределения яркости разностного изображения $r^+(i)$ и $r^-(i)$.

2.4. Распределение яркости разностного изображения

Теорема. При наличии структурного различия условная вероятность яркости зафиксированного пикселя разностного изображения имеет вид

$$r^+(i) = \frac{\sum_{n=1}^{N_f} \sum_{m=1}^{N_g^n} \left(S_{n,m} \cdot \sum_{k,a} (p_{k,a}^{n,m} \cdot p(|G_{k,a}^{n,m} + E_k| = i)) \right)}{\sum_{u=1}^{N_f} \sum_{v=1}^{N_g^u} S_{u,v}}, \text{ где}$$

$$p_{k,a}^{n,m} = \sum_i \left(p_n(f = i) \cdot \prod_{q=1}^{n-1} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \cdot \prod_{j=0}^{m-1} B(a_{n,j}, S_{n,j}, p_n(f = i)) \times \right. \\ \left. \times B(a_{n,m}, S_{n,m} - 1, p_n(f = i)) \cdot \prod_{j=m+1}^{N_g^n} B(a_{n,j}, S_{n,j}, p_n(f = i)) \cdot \prod_{q=n+1}^{N_f} \prod_{j=0}^{N_g^q} B(a_{q,j}, S_{q,j}, p_q(f = i)) \right),$$

$B(n, m, p)$ — биномиальное распределение вероятностей,

$a = \{a_{q,j}: a_{q,j} \leq S_{q,j} \forall (q,j), q \in [1, N_f], j \in [0, N_g^q], (q,j) \neq (n,m)\}$,

$$G_{k,a}^{n,m} = \frac{1}{k} \left(\sum_{q=1}^{N_f} \sum_{j=0}^{N_g^q} (a_{q,j} \cdot g_{q,j}^0) + (1-k) g_{n,m}^0 \right), \quad E_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^{k-1} \varepsilon_j + \frac{1-k}{k} \varepsilon_c,$$

ε_j — распределение вероятностей случайной величины $g(x_j)$, соответствующей точке $x_j \in L_f(f(x_c))$, ε_c — распределение вероятностей случайной величины $g(x_c)$.

2.5. Оптимальный порог

В качестве критерия оптимальности используется минимум суммы ошибок первого и второго рода.

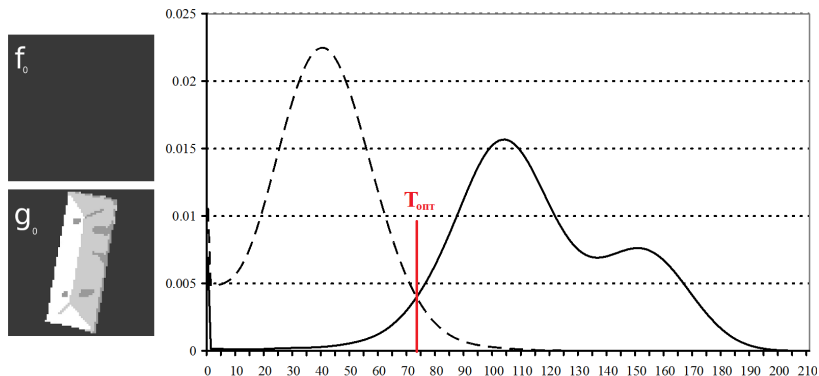
Теорема

Оптимальный порог алгоритма поиска структурных различий на основе морфологического проектора вычисляется по следующей формуле:

$$T_{opt} = \arg \min_T \left(\sum_{i < T} r^+(i) + \sum_{i > T} r^-(i) \right)$$

2.6. Пример оценки оптимального порога.

Графики распределений

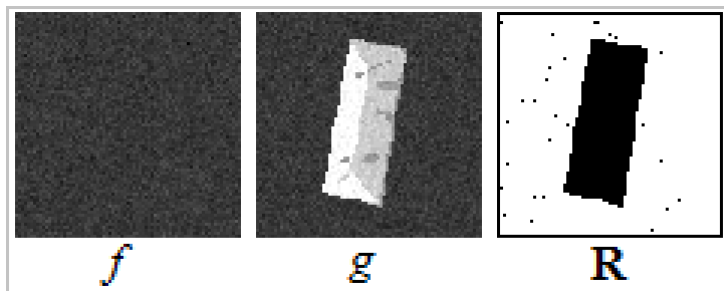


Графики распределений $r^+(R)$ (сплошная линия) и $r^-(R)$ (пунктирная линия).

Параметры: $S = 441$, $S_1 = 40$, $S_2 = 60$, $S_3 = 20$,

$g_1 = 255$, $g_2 = 204$, $g_3 = 153$, $g_0 = 56$, шум $N(0, 10)$.

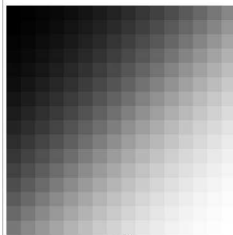
2.7. Пример оценки оптимального порога. Изображения



3.1. Ограничение морфологического проектора: пример

0	2	5				
1	4					
3						
						252
					251	254
				250	253	255

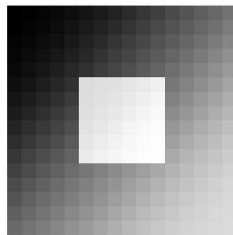
(а)



(б)

0	2					114
1			60			
		220	222			
	59	221		254	160	
			253	255		
			159			218
105					217	219

(б)



(г)

3.2. Функции преобразования яркости.

Регуляризация морфологического проектора

$$P_f g(x) = \frac{\sum_i \tilde{f}_i(x)}{\sum_j \tilde{\chi}_i^f(x)} = \sum_i \left(\frac{\sum_{x' \in X} g(x') \cdot \tilde{\chi}_i^f(x')}{\sum_{x' \in X} \tilde{\chi}_i^f(x')} \cdot \frac{\tilde{\chi}_i^f(x)}{\sum_j \tilde{\chi}_i^f(x)} \right),$$

где $\tilde{\chi}_i^f$ вычисляется по формуле билатерального фильтра

$$\tilde{\chi}_i^f(x) = \exp\left(-\frac{(f(x) - i)^2}{\sigma_c^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - x_c)^2}{\sigma_d^2}\right)$$

3.3. Функции преобразования яркости.

Частные случаи классов

— Линейная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = k \cdot f(x) + b,$$

где коэффициенты находятся с помощью МНК по двум фрагментам изображений, ограниченных сканирующим окном, из соотношения

$$\sum_{x=1}^{S_d} (g(x) - (k \cdot f(x) + b))^2 \rightarrow \min_{k,b}.$$

— Квадратичная функция преобразования яркости:

$$f'(x) = a \cdot f^2(x) + b \cdot f(x) + c,$$

где коэффициенты находятся с помощью МНК по двум фрагментам изображений, ограниченных сканирующим окном, из соотношения

$$\sum_{x=1}^{S_d} (g(x) - (a \cdot f^2(x) + b \cdot f(x) + c))^2 \rightarrow \min_{a,b,c}.$$

3.4. Функции преобразования яркости.

Глобальная оптимизация

$$E(f'; f, g) = \|f'(x) - g(x)\|^2 + \omega_m(f'; f) = \\ = \sum_{x \in X} (f'(x) - g(x))^2 + \lambda \sum_{x \in X} \sum_{y \in N_x} G_f(f'(x) - f'(y), f(x) - f(y)),$$

$$G_f(i, j) = \begin{cases} \min(i^2, \alpha^2), & \text{если } |j| < \alpha, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где N_x — окрестность точки x , параметр λ отвечает за близость приведения изображения f к g , α характеризует структуру изображения f , задавая допустимый перепад яркости между различными линиями уровня.

3.5. Обобщенная яркостная коррекция

Исходный проектор: $f' = P_f g$.

Обобщенный вариант:

$$f' = \arg \min (\|h - g\|^2 + \omega_\pi(h; f) \mid h \in \Phi),$$

где $\omega_\pi : \omega_\pi(h; f) = 0$, если существует некоторая функция преобразования яркости $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ такая, что $h(x) = F(f(x))$
 $\forall x \in X$.

3.6. Характеристические функции структурной эквивалентности

1. $\omega_1 : \omega_1(h; f) = 0$, если $h(x) = kf(x) + b \ \forall x \in X$ и для некоторых вещественных k, b , и иначе равна бесконечности.
2. $\omega_2 : \omega_2(h; f) = 0$, если $h(x) = kf(x)^2 + bf(x) + c \ \forall x \in X$ и для некоторых вещественных k, b, c , и иначе равна бесконечности.

3.

$$\omega_m(h; f) = \lambda \sum_{x \in X} \sum_{y \in N_x} G_f(h(x) - h(y), f(x) - f(y)),$$

$$G_f(i, j) = \begin{cases} \min(i^2, \alpha^2), & \text{если } |j| < \alpha, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

3.7. Структурное различие

Определение

Структурным различием назовем множество пикселей, удовлетворяющее следующему условию:

$$SD(f, g) = \{x \in X \mid |f'(x) - g(x)| > T \text{ или } |f(x) - g'(x)| > T\},$$

где T — некоторое пороговое значение, f' и g' определены формулами:

$$f' = \arg \min(\|h - g\|^2 + \omega(h; f) \mid h \in \Phi),$$

$$g' = \arg \min(\|h - f\|^2 + \omega(h; g) \mid h \in \Phi).$$

4.1. Модель структурного различия 2

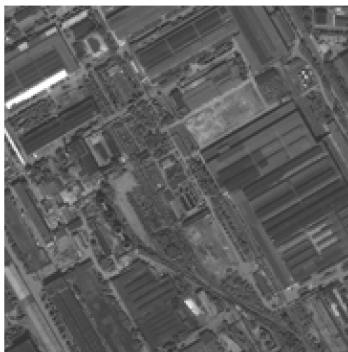


Фрагменты модельных изображений городской застройки и их ручная разметка.

4.2. Схема проведения эксперимента

- ❶ По спутниковому снимку создается пара синтезированных изображений с различиями требуемых типов и масштаба, а также их ручная разметка.
- ❷ К построенным изображениям добавляется шум с известным распределением и применяется алгоритм поиска структурных различий с определенными параметрами функции преобразования яркости. Данная процедура повторяется несколько раз, и результаты усредняются.
- ❸ Перебирая все возможные параметры алгоритма, определяются их оптимальные значения (кроме порога).
- ❹ Берется пара спутниковых снимков, для которых строится ручная разметка. К ним применяется алгоритм с выбранными в п. 3 оптимальными параметрами и находится значение порога, при котором вероятность ложной тревоги составляет примерно 0.1.
- ❺ Для найденного значения порога определяется вероятность верного обнаружения, значение которой используется для сравнения качества работы алгоритмов.

4.3. Космоснимки для сравнения алгоритмов



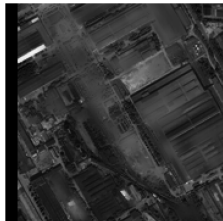
4.4. Выравнивание яркостей



Исходное изображение



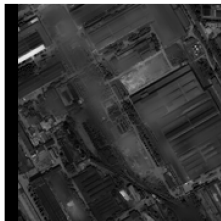
1 Рег. морфологический проектор



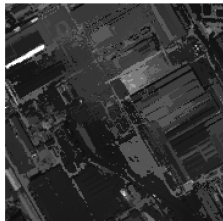
2 Квадратичная функция



3 Морфологический проектор

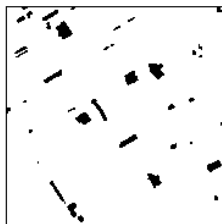


4 Линейная функция

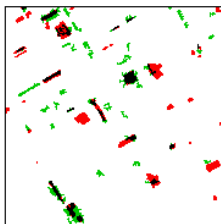


5 Глобальная оптимизация

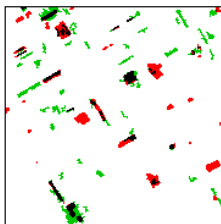
4.5. Найденные структурные различия



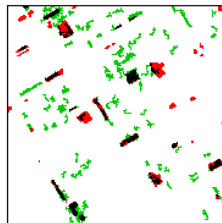
Ручная разметка



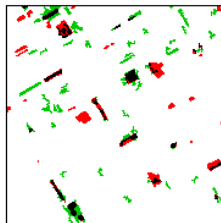
1 Рег. морфологический проектор



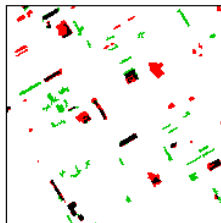
2 Квадратичная функция



3 Морфологический проектор



4 Линейная функция



5 Глобальная оптимизация

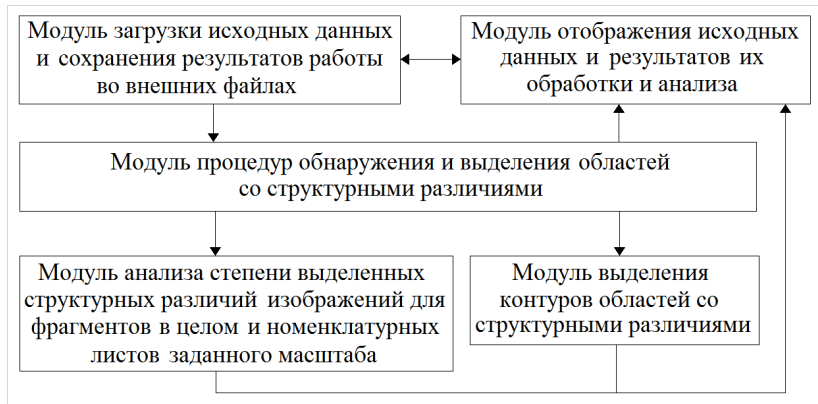
4.6. Результаты эксперимента

Максимальные значения верного обнаружения TP при зафиксированном уровне $FP = 0.1$ для алгоритмов поиска структурных различий, и оптимальные параметры, при которых они получены:

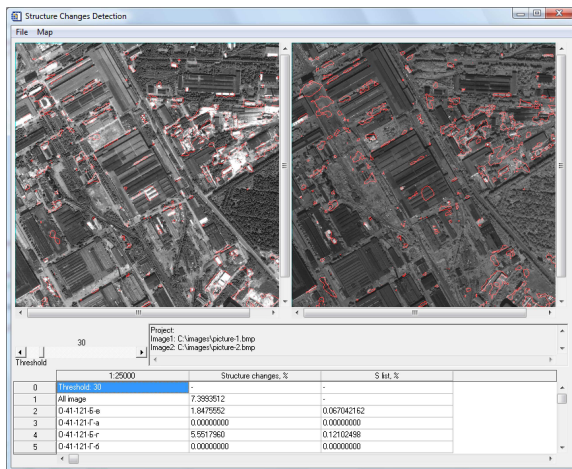
Алгоритм	TP_{max}	Параметры
1. Рег. морфологический проектор	0.892091	$d = 29, \sigma_c = 2$
2. Квадратичная функция	0.890949	$d = 23$
3. Морфологический проектор	0.885229	$d = 27$
4. Линейная функция	0.884299	$d = 23$
5. Глобальная оптимизация	0.80634	$d = 19, \lambda = 1816, \alpha = 5$

4.7. Пакет программ “Детектор структурных различий”

Общая схема



4.8. Пакет программ “Детектор структурных различий” Рабочий стол



Заключение

1. Предложена формализация задачи поиска структурных различий изображений, включающая определение структурного различия и его математическую модель.
2. В рамках формализации получена формула распределения вероятности яркостей пикселей изображения, представляющего собой разность исходного изображения и его морфологической проекции.
3. Предложена формула обобщенной яркостной коррекции изображений, на основе которой разработан ряд алгоритмов, решающих поставленную задачу поиска структурных различий изображений.
4. Предложена модель и схема проведения вычислительного эксперимента, позволяющего определить оптимальные параметры алгоритмов и сравнивать качество их работы между собой.
5. Разработан программный комплекс, решающий задачу поиска структурных различий для разновременных космических снимков.

Публикации

- ▶ Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С. Задача обнаружения структурных различий изображений // Алгоритмы и програм. средства парал. вычислений: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. Вып. 11. С. 37–56.
 - ▶ Корнилов Ф.А. Алгоритм поиска структурных различий на основе Марковских случайных полей // Современные проблемы математики. Тез. международной (43-й всероссийской) молодежной шк.-конф. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2012. С. 311–313.
 - ▶ Корнилов Ф.А., Перевалов Д.С. О применении регуляризации морфологического проектора в задаче поиска структурных различий // Сб. тр. научно-технической конференции "Техническое зрение в системах управления – 2012". М.: ИКИ РАН, 2012. С. 265–271.
 - ▶ Корнилов Ф.А. Поиск структурных различий изображений: алгоритмы и методика исследования // Машинное обучение и анализ данных, 2014. Т. 1. № 7. С.902–919.
-  Корнилов Ф.А. Исследование алгоритма поиска структурных различий изображений // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. Екатеринбург: ИММ УрО РАН, 2013. Т. 19, № 1. С. 144–159.
-  Корнилов Ф.А., Бровко Е.А., Кандоба И.Н., Перевалов Д.С. Оперативный мониторинг структурных изменений изображений объектов на космических снимках земной поверхности // Программные продукты и системы, 2015. № 1 (109). С. 79–86.
-  Корнилов Ф.А. Сравнительный анализ алгоритмов поиска структурных различий изображений // Pattern Recognition and Image Analysis: Advances in Mathematical Theory and Applications. Москва, 2015. Vol. 25, №. 4. В печати.

Апробация работы

Основные результаты докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях:

- межвузовской научной конференции по проблемам информатики СПИСОК–2009 (Екатеринбург, 2009 г.);
- региональной научно-технической конференции “Данные дистанционного зондирования Земли для решения практических задач развития территорий” (Екатеринбург, 2009 г.);
- всероссийских и международных молодежных школах–конференциях “Проблемы теоретической и прикладной математики” (Екатеринбург, 2010 — 2013 гг.);
- научно-технической конференции–семинаре “Техническое зрение в системах управления мобильными объектами” (Таруса, 2010 г.);
- научно-технических конференциях “Техническое зрение в системах управления” (Москва, 2012, 2013 гг.);
- десятой международной конференции “Интеллектуализация обработки информации–2014” (о.Крит, Греция, 2014 г.);
- на семинаре физического факультета МГУ “Морфологический анализ данных” (Москва, 2013 г.);
- на семинарах кафедры геоинформатики и информационной безопасности СГАУ (Самара, 2014, 2015 гг.);
- научных семинарах отдела прикладных проблем управления и отдела математического программирования ИММ УрО РАН (Екатеринбург).