

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, СИГНАЛОВ И РЕЧИ

УДК 004.93, 004.932

П.В. Лукашевич, Б.А. Залесский

ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕНЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ
С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗА ГИСТОГРАММ

Предлагаются алгоритмы автоматического выделения теней на полутоновых и цветных изображениях, основанные на анализе формы локальных гистограмм яркостей изображений. Алгоритмы устойчивы к сдвигам и растяжениям гистограмм. Они, в частности, позволяют получить удовлетворительные решения задачи выделения теней на аэрофотоснимках и космических изображениях, в том числе на тех, цветовые или яркостные характеристики которых различны в разных областях.

Введение

Задача выделения теней хорошо известна в области обработки изображений, так как тени не только играют большую роль в понимании графической информации, но и позволяют вычислять характеристики объектов, например высоту зданий, размеры и форму крыш и т. д. Часто тени являются помехой – сегментация теней производится для последующей коррекции их влияния.

Алгоритмы выделения теней появились во время зарождения области обработки изображений. В настоящее время известно большое число различных подходов к решению данной задачи. Упомянем лишь те из них, которые предназначены для выделения теней на отдельных изображениях городских ландшафтов, аэрофотоснимках и космических изображениях (с обширной библиографией по теме можно ознакомиться на сайте [1]).

Первыми, по-видимому, были предложены пороговые алгоритмы [2, 3]. Несмотря на свою простоту, алгоритмы данного типа позволяют во многих случаях удовлетворительно выделять тени на изображениях. Недостатком этих алгоритмов является трудность автоматического подбора наилучшего порога бинаризации изображений.

Среди других типов алгоритмов выделения теней упомянем группу алгоритмов, основанных на классификации изображений (см., например, [2, 4]). Для выделения теней в них используются различные методы классификации, начиная от метода k -средних и дискриминантного анализа до современного метода опорных векторов (SVM).

Используются также алгоритмы, основанные на наращивании областей [2, 5]. Их недостатком является зависимость результата сегментации тени от выбора начальных точек роста области.

Большая группа алгоритмов выделения теней на цветных и мультиспектральных изображениях использует специально разработанные для этого цветовые пространства [4, 6]. Известны также алгоритмы выделения теней, основанные на уравнениях в частных производных [7], методах математической морфологии [8], 3D-моделировании [9, 10].

В статье предлагается алгоритм автоматического выделения теней на полутоновых и цветных изображениях, в том числе на изображениях городских ландшафтов, аэрофотоснимках и космических изображениях, основанный на анализе формы оконных гистограмм яркостей. Алгоритм использует существенное различие освещенности между затененной и соседствующей с ней освещенной областью, приводящее в подавляющем большинстве случаев к возникновению выраженного максимума в области малых значений яркостей оконных гистограмм (рис. 1). Подобный подход был предложен Р.М. Даге в [3] для выделения теней на космических изображениях. Однако Р.М. Даге использовал лишь одну гистограмму всего изображения и осуществлял сегментацию вручную.

Проведенные исследования показали преимущество использования оконных гистограмм, а также возможность автоматического определения порога бинаризации для выделения теней.

Описан также вариант сегментации тени по углу наклона кривой оконной гистограммы в точке начала ее сильного роста.

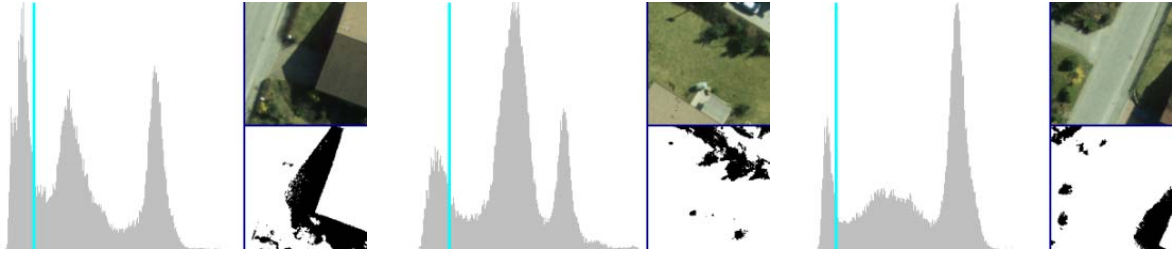


Рис. 1. Примеры участков аэрофотоснимков, соответствующих им оконных гистограмм и результатов оптимальной ручной сегментации. Выбранный порог для сегментации тени отмечен светлой вертикальной линией. В случае наличия в окне тени гистограмма имеет ярко выраженный максимум в нижней части, который отсутствует в незатененных областях изображений

В обоих случаях суть алгоритма состоит в выделении области гистограммы, соответствующей яркости затененных пикселей в окне. Если такая область обнаружена, центральный пиксел окна классифицируется в зависимости от принадлежности его яркости к затененной или освещенной области гистограммы. В случае отсутствия в окне распознанной затененной области пиксел классифицируется как освещенный.

Следует заметить, что современные методы вычисления оконных характеристик (см., например, использование интегрального изображения [11–13]) позволяют существенно уменьшить число операций, нужных для нахождения локальных гистограмм, так, что большая часть времени затрачивается не на их вычисление, а на анализ.

1. Алгоритм выделения теней на основе анализа локальных гистограмм

Вычисление гистограмм. Пусть $S = \{0, 1, \dots, M-1\} \times \{0, 1, \dots, N-1\}$, $\mathbf{j} = (j_1, j_2) \in S$ – множество пикселей изображения размером $M \times N$. Значения пикселей цветного RGB-изображения $\mathbf{I}_{rgb} = (\mathbf{I}_r, \mathbf{I}_g, \mathbf{I}_b)$ представляют собой матрицу $M \times N$ с элементами-векторами $I_{rgb,j} = (I_{r,j}, I_{g,j}, I_{b,j}) \in \{0, 1, \dots, 255\}^3$. Значения пикселей полутонового изображения \mathbf{I} формируют матрицу размером $M \times N$ со значениями яркостей $I_j \in \{0, 1, \dots, 255\}$.

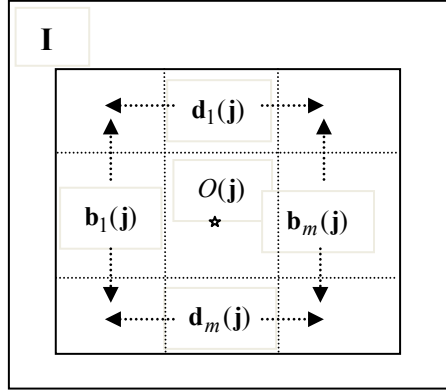
Для произвольных положительных нечетных чисел $m \leq M$, $n \leq N$ обозначим через $O(\mathbf{j}) \subset S$ прямоугольник размера $m \times n$ с центром в пикселе \mathbf{j} .

Обозначим через $\mathbf{h}(\mathbf{j}, \mathbf{I})$ оконную гистограмму яркостей полутонового изображения \mathbf{I} в окне $O(\mathbf{j})$, представляющую собой вектор с координатами

$$h_i(\mathbf{j}, \mathbf{I}) = \sum_{\mathbf{k} \in O(\mathbf{j})} \mathbf{1}_{(I_{\mathbf{k}}=i)}, \quad i = 0 \div 255, \quad (1)$$

для индикаторной функции $\mathbf{1}_{(\cdot)}$. В случае когда зависимость от изображения понятна, для краткости будем использовать обозначения $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ и $h_i(\mathbf{j})$.

Непосредственное вычисление гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{j}, \mathbf{I})$ по формуле (1) для каждого пиксела \mathbf{j} большого изображения \mathbf{I} (или одного из каналов $\mathbf{I}_r, \mathbf{I}_g, \mathbf{I}_b$ цветного изображения \mathbf{I}_{rgb}) занимает довольно продолжительное время, поэтому опишем кратко способ быстрого вычисления оконных гистограмм методом «бегущей строки» [11] для окон, имеющих размер $m, n \leq 255$. Для этого нам понадобятся столбцы пикселей в окне $O(\mathbf{j})$, которые будут обозначаться $\mathbf{b}_1(\mathbf{j}), \dots, \mathbf{b}_m(\mathbf{j})$, и строки, которые будут обозначаться $\mathbf{d}_1(\mathbf{j}), \dots, \mathbf{d}_n(\mathbf{j})$ (рис. 2).


 Рис. 2. Расположение столбцов в окне $O(\mathbf{j})$

Алгоритм быстрого вычисления оконных гистограмм методом «бегающей строки»:

Шаг 1. Вычисляем и запоминаем оконную гистограмму $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ для крайнего левого верхнего пиксела $\mathbf{j} = ([m/2], [n/2])$ изображения \mathbf{I} .

Шаг 2. Сдвигаемся на один пиксел по строке: $\mathbf{j}_{new} = \mathbf{j} + (1, 0)$. Если $j_{1,new} > M - [m/2]$, переходим на шаг 3, иначе вычисляем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$ следующим образом: полагаем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new}) = \mathbf{h}(\mathbf{j})$, просматриваем столбец $\mathbf{b}_1(\mathbf{j})$, пиксели которого не входят в $O(\mathbf{j}_{new})$, и вычитаем значения яркостей изображения, соответствующие этим пикселям из $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$, затем просматриваем пиксели из столбца $\mathbf{b}_m(\mathbf{j}_{new})$ и прибавляем яркости изображения, соответствующие значениям этих пикселей, к гистограмме $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$. Формально для каждого $i = 1 \div n$ полагаем $\ell = I_{b_{i,1}(\mathbf{j})}$ и вычисляем

$$h_{\ell}(\mathbf{j}_{new}) := h_{\ell}(\mathbf{j}_{new}) - 1, \quad (2)$$

затем для каждого $i = 1 \div n$ полагаем $\ell = I_{b_{i,m}(\mathbf{j}_{new})}$ и вычисляем

$$h_{\ell}(\mathbf{j}_{new}) := h_{\ell}(\mathbf{j}_{new}) + 1. \quad (3)$$

Запоминаем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$, полагаем $\mathbf{j} = \mathbf{j}_{new}$, идем на начало шага 2.

Шаг 3. Снова полагаем $\mathbf{j} = ([m/2], [n/2])$.

Шаг 4. Присваиваем $\mathbf{j}_{new} = \mathbf{j} + (0, 1)$. Если $j_{2,new} > N - [n/2]$, то STOP.

Шаг 5. Вычисляем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$ следующим образом: полагаем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new}) = \mathbf{h}(\mathbf{j})$, просматриваем строку $\mathbf{d}_1(\mathbf{j})$, пиксели которого не входят в $O(\mathbf{j}_{new})$, и вычитаем значения яркостей изображения, соответствующие этим пикселям из $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$, затем просматриваем пиксели из столбца $\mathbf{d}_n(\mathbf{j}_{new})$ и прибавляем яркости изображения, соответствующие значениям этих пикселей к гистограмме $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$ (вычисления, аналогичные (2), (3)). Запоминаем $\mathbf{h}(\mathbf{j}_{new})$, полагаем $\mathbf{j} = \mathbf{j}_{new}$.

Шаг 6. Сдвигаемся на один пиксел по строке: $\mathbf{j}_{new} = \mathbf{j} + (1, 0)$. Если $j_{1,new} > M - [m/2]$, переходим на шаг 4, иначе на шаг 5:

1. $\mathbf{j} \leftarrow (j_1, j_2) \leftarrow ([m/2], [n/2])$
2. $\mathbf{H}_{j_1, j_2} \leftarrow \mathbf{H}_{tmp} \leftarrow \mathbf{h}(\mathbf{j})$
3. **for** $j_1 \leftarrow [m/2]$ **to** $M - [m/2]$
4. **do for** $j_2 \leftarrow [n/2]$ **to** $N - [n/2]$
5. **do** $\mathbf{H}_{j_1, j_2} \leftarrow \mathbf{H}_{tmp} \leftarrow \mathbf{H}_{tmp} - \mathbf{b}_1(\mathbf{j}) + \mathbf{b}_m(\mathbf{j})$

В случае когда размеры окна гистограммы m и n больше 255, эффективнее использовать незначительную модификацию описанного алгоритма, в которой, например, сначала вычисляются гистограммы строк изображения методом «бегущей строки», а затем – оконные гистограммы тоже методом «бегущей строки» с использованием вычисленных гистограмм строк.

Анализ оконных гистограмм для выделения тени. При разработке алгоритма в основном были использованы полутоновые и цветные космические изображения и аэрофотоснимки городских ландшафтов. Экспериментальные исследования показали, что для цветных спутниковых изображений или аэрофотоснимков, представленных в RGB-формате, наиболее точное выделение теней предлагаемым методом получается при использовании одного цветового канала изображения \mathbf{I}_{rgb} . Это связано с тем, что вычисление яркости точки по всем RGB-каналам приводит к заметному «размытию» формы гистограммы в области, соответствующей затененным пикселям. Для выбранных нами тестовых данных наиболее качественные результаты были получены при использовании только красного цветового канала. Использование других каналов и даже различных цветовых пространств для предложенного алгоритма не привело к более точным результатам. Поэтому в дальнейшем будем считать, что в случае цветных изображений $\mathbf{I} = \mathbf{I}_r$.

Как упоминалось выше, алгоритм основан на анализе формы оконных гистограмм, а именно на выделении первого слева глубокого максимума, образованного яркостями затененных пикселей.

Основными подтвержденными практическими исследованиями предпосылками для поиска теней на изображении являются:

- низкая яркость теневых участков в окнах $O(\mathbf{j})$ (в солнечный день область тени действительно обладает наименьшей яркостью среди всех точек окна);
- малая вариация яркости пикселей внутри теневого участка (независимо от текстуры и цвета затененного участка все его пиксели отличаются по яркости существенно меньше, чем пиксели освещенных участков);
- существенная доля затененного участка в окне поиска $O(\mathbf{j})$ (при правильном выборе размера окна поиска $O(\mathbf{j})$, который обычно выбирается равным размеру объекта, отбрасывающего тень, например здания, в нем присутствует более 20 % затененных пикселей).

Итак, для принятия решения о принадлежности пикселя \mathbf{j} изображения \mathbf{I} тени (напомним, что в случае цветного изображения $\mathbf{I} = \mathbf{I}_r$) рассматривается оконная гистограмма $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ для окна $O(\mathbf{j})$. Пиксел \mathbf{j} считается затененным, если оконная гистограмма $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ имеет не менее двух глубоких максимумов, один из которых расположен в ее нижней части, и если яркость I_j лежит в области первого слева максимума. В противном случае пиксел считается освещенным.

При принятии решения были использованы методы, основанные на сглаживании гистограммы скользящим средним, кусочно-линейной регрессии, кусочно-ломаной регрессии, кусочно-квадратичной регрессии, взвешенных аппроксимирующих кубических сплайнах. Независимо от способа сглаживания гистограммы предложенный алгоритм обнаружения тени на основе анализа локальной гистограммы состоит из следующих шагов. Для каждого пикселя \mathbf{j} , принадлежащего изображению вместе с окном $O(\mathbf{j})$, выполняются:

Шаг 1. Вычисление оконной гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{j})$.

Шаг 2. Сглаживание $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ или ее аппроксимация одним из указанных выше методов.

Шаг 3. Определение i_{beg} – области начала существенного роста $\mathbf{h}(\mathbf{j})$, которое может выполняться различными способами. Например, для наперед заданного τ (равного 0,05, 0,1 или 0,2) вычисляется

$$i_{beg} = \min_i \left\{ i : 0 \leq i \leq 255, \frac{\sum_{\ell=0}^i h_{\ell}(\mathbf{I})}{\sum_{\ell=0}^{255} h_{\ell}(\mathbf{I})} \geq \tau \right\}$$

или анализируется сглаженная гистограмма $\mathbf{h}_{approx}(\mathbf{j})$.

Шаг 4. Нахождение $i_{\max}(1)$ – положения первого значимого локального максимума сглаженной или аппроксимированной гистограммы $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$ на интервале $[i_{\text{beg}}, 255]$. Значимость может задаваться порогом или просто с помощью анализа $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$ на основе поведения ее производной. Если значимого локального максимума нет, перейти к классификации следующего пиксела.

Шаг 5. Нахождение $i_{\max}(2)$ – положения второго значимого локального максимума сглаженной или аппроксимированной гистограммы $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$ на интервале $[i_{\max}(1), 255]$. Если значимого локального максимума нет, перейти к классификации следующего пиксела.

Шаг 6. Вычисление порога $\rho = 2 \cdot i_{\max}(1) - i_{\text{beg}}$ для пиксела \mathbf{j} .

Шаг 7. Классификация изображения в текущем пикселе \mathbf{j} . Если $I_{\mathbf{j}} \leq \rho$, пиксел \mathbf{j} считается принадлежащим тени, в противном случае – принадлежащим освещенной части изображения.

Можно применять другие способы вычисления порога ρ , например использовать вместо шага 6

Шаг 6'. Найти наименьшую точку локального минимума $i_{\min}(1)$ сглаженной гистограммы $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$ на интервале $[i_{\max}(1), 255]$. Вычислить порог $\tilde{\rho} = \min(2 \cdot i_{\max}(1) - i_{\text{beg}}, i_{\min}(1))$.

На рис. 3, а–в показаны результаты работы алгоритма при использовании сглаживания гистограммы скользящим средним, аппроксимации простым и взвешенным кубическим сплайнами (напомним, что в каждом случае порог выбирается автоматически).

2. Алгоритм выделения теней на основе анализа скорости роста гистограммы

Анализ результатов практического применения описанного выше алгоритма показал, что, несмотря на высокую надежность его работы, число неправильно классифицированных пикселов в отдельных случаях может быть достаточно большим. Ошибки классификации могут быть вызваны: наличием в окне освещенных пикселов, имеющих низкую яркость $I_{\mathbf{j}}$; отсутствием первого существенного максимума на сглаженной гистограмме $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$, а также наличием в нижней части гистограммы $\mathbf{h}_{\text{approx}}(\mathbf{j})$, соответствующей тени, нескольких острых пиков.

Для преодоления таких ошибок может быть использован *алгоритм выделения тени по углу наклона левого края локальной гистограммы*, состоящий из следующих этапов:

Шаг 1. Вычисление оконной гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{j})$.

Шаг 2. Сглаживание $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ или ее аппроксимация одним из указанных в разд. 1 методов.

Шаг 3. Определение i_{beg} – области начала существенного роста $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ – так же, как в первом алгоритме.

Шаг 4. Вычисление величины среднего колебания ω оконной гистограммы $\mathbf{h}(\mathbf{j})$ по формуле

$$\omega(\mathbf{h}(\mathbf{j})) = \frac{1}{255 - i_{\text{beg}}} \sum_{i=i_{\text{beg}}}^{254} |h_{i+1}(\mathbf{j}) - h_i(\mathbf{j})|.$$

Шаг 5. Начало вычисления локального порога уровня тени для пиксела \mathbf{j} :

$$\delta = \operatorname{argmin} \{ i : i \geq i_{\text{beg}}, |h_{i+1}(\mathbf{j}) - h_i(\mathbf{j})| \leq \omega(\mathbf{h}(\mathbf{j})) \}.$$

Шаг 6. Продолжение вычисления порога тени для пиксела \mathbf{j} :

$$i_{30\%} = \operatorname{argmin} \left\{ i : i \geq i_{\text{beg}}, \sum_{\ell=i_{\text{beg}}}^i h_{\ell}(\mathbf{j}) / \sum_{\ell=i_{\text{beg}}}^{255} h_{\ell}(\mathbf{j}) \geq 0,3 \right\}.$$

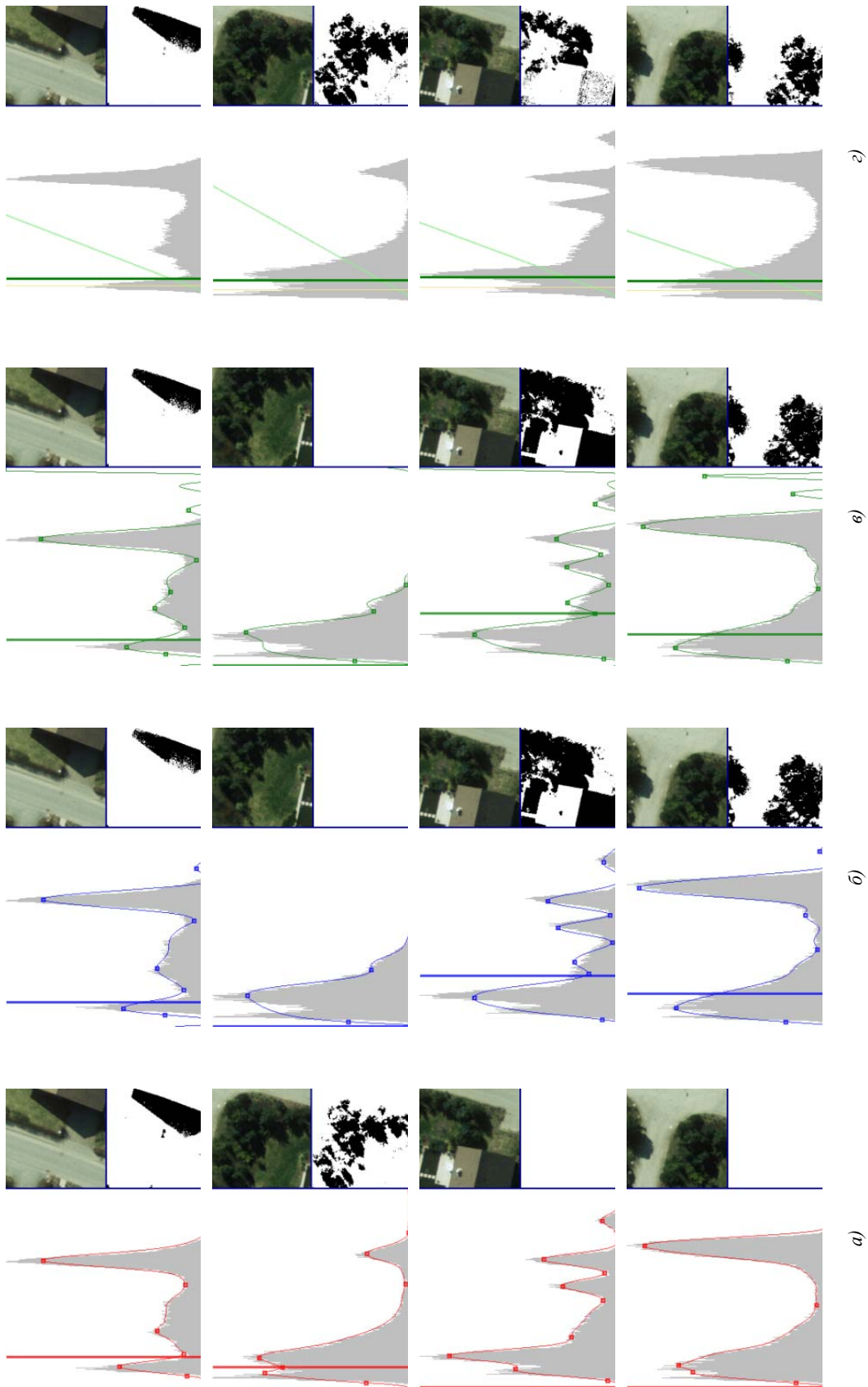


Рис. 3. Результаты автоматического выбора уровня яркости (порога) для сегментации тени (толстая вертикальная линия) алгоритмом: *а)* для сглаженной гистограммы; *б)* аппроксимированных кубических сплайнов; *в)* взвешенных кубических сплайнов, аппроксимированных с большей точностью значения гистограммы малой яркости; *г)* выделения теней по углу наклона гистограммы, наклонной линией показана вычисленная оценка минимально допустимой скорости роста гистограммы в области тени, тонкой вертикальной линией – точка конца сильного роста гистограммы

Шаг 7. Завершение вычисления порога для выделения тени τ для пиксела \mathbf{j} . Если $\delta \leq i_{30\%}$, положить порог $\tau = 2\delta - i_{beg}$, в противном случае $\tau = i_{beg}$.

Шаг 8. Классифицировать изображение в текущем пикселе \mathbf{j} . Если $I_j \leq \tau$, пиксел \mathbf{j} считается принадлежащим тени, в противном случае – принадлежащим освещенной части изображения. Условие $\delta \leq i_{30\%}$ при выполнении *шага 7* позволяет избежать завышения порога τ на однородных областях (рис. 4). Его можно исключить из алгоритма и выполнить вместо него

Шаг 7'. Положить порог $\tau = 2\delta - i_{beg}$.

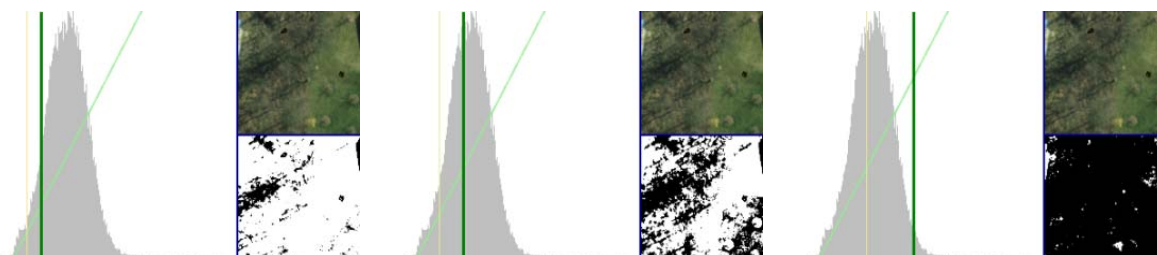


Рис. 4. Примеры работы алгоритма на однородных участках с порогами отсечения по количеству пикселей 10, 30 % и без отсечения соответственно

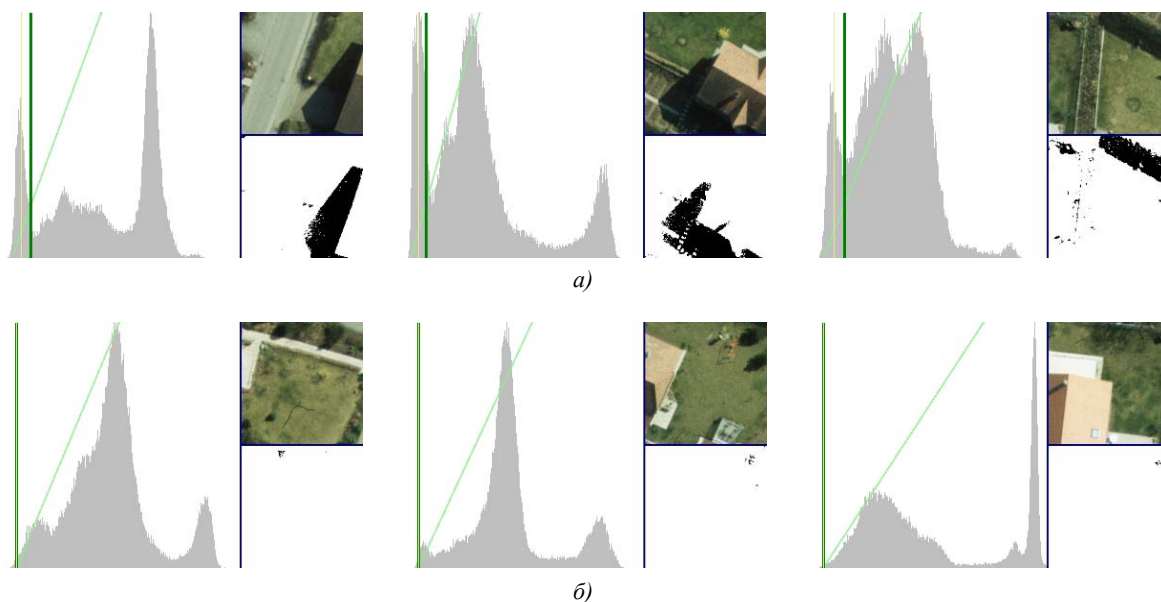


Рис. 5. Примеры работы алгоритма и вид локальных гистограмм на участках изображения: *а)* с тенью; *б)* без тени

На рис. 5, *а* при наличии тени явно видна часть гистограммы, возвышающаяся над прямой с углом наклона, равным среднему колебанию гистограммы $\omega(\mathbf{h}(\mathbf{j}))$. При отсутствии тени (рис. 5, *б*) левая часть гистограммы лежит под этой прямой. Сравнительные результаты качества работы алгоритма также показаны на рис. 3, *з* и 6, *з*.

3. Результаты практического использования алгоритмов

Предложенные алгоритмы были протестированы на полутоновых и цветных аэрофотоснимках и космических изображениях городских сцен. Как упоминалось выше, тестирование алгоритмов показало, что наилучший результат для цветных изображений, сохраненных в различных цветовых пространствах, дало применение алгоритмов для R-канала классического RGB-представления.

Для подсчета локальных гистограмм был использован алгоритм «бегущей строки», который позволил во много раз сократить время их вычисления. Вычислительные затраты, требуемые для полного выделения теней, приведены в таблице. Основная часть времени при работе алгоритмов затрачивается на анализ локальных гистограмм.

Скорость работы алгоритма на CPU Intel Core 2 Quad Q6600, 2.4 GHz (ч:мин:с)

Параметры обработки \ Алгоритм	Сглаженная гистограмма	Аппроксимация кубическими сплайнами	Аппроксимация взвешенными кубическими сплайнами	Выделение теней по углу наклона гистограммы
Изображение 3600 × 3600, окно гистограммы 250 × 250, окно сглаживания 13	00:10:19	11:06:33	11:25:30	00:01:42
Изображение 1800 × 1800, окно гистограммы 250 × 250, окно сглаживания 13	00:02:34	02:46:46	02:51:39	00:00:24
Изображение 900 × 900, окно гистограммы 125 × 125, окно сглаживания 13	00:00:40	00:41:40	00:41:48	00:00:04

Результаты работы предложенных алгоритмов для цветных изображений показаны на рис. 6. В левом верхнем углу рисунка расположено синтетическое изображение, составленное из четырех копий одного оригинала с различными преобразованиями яркости и контраста.

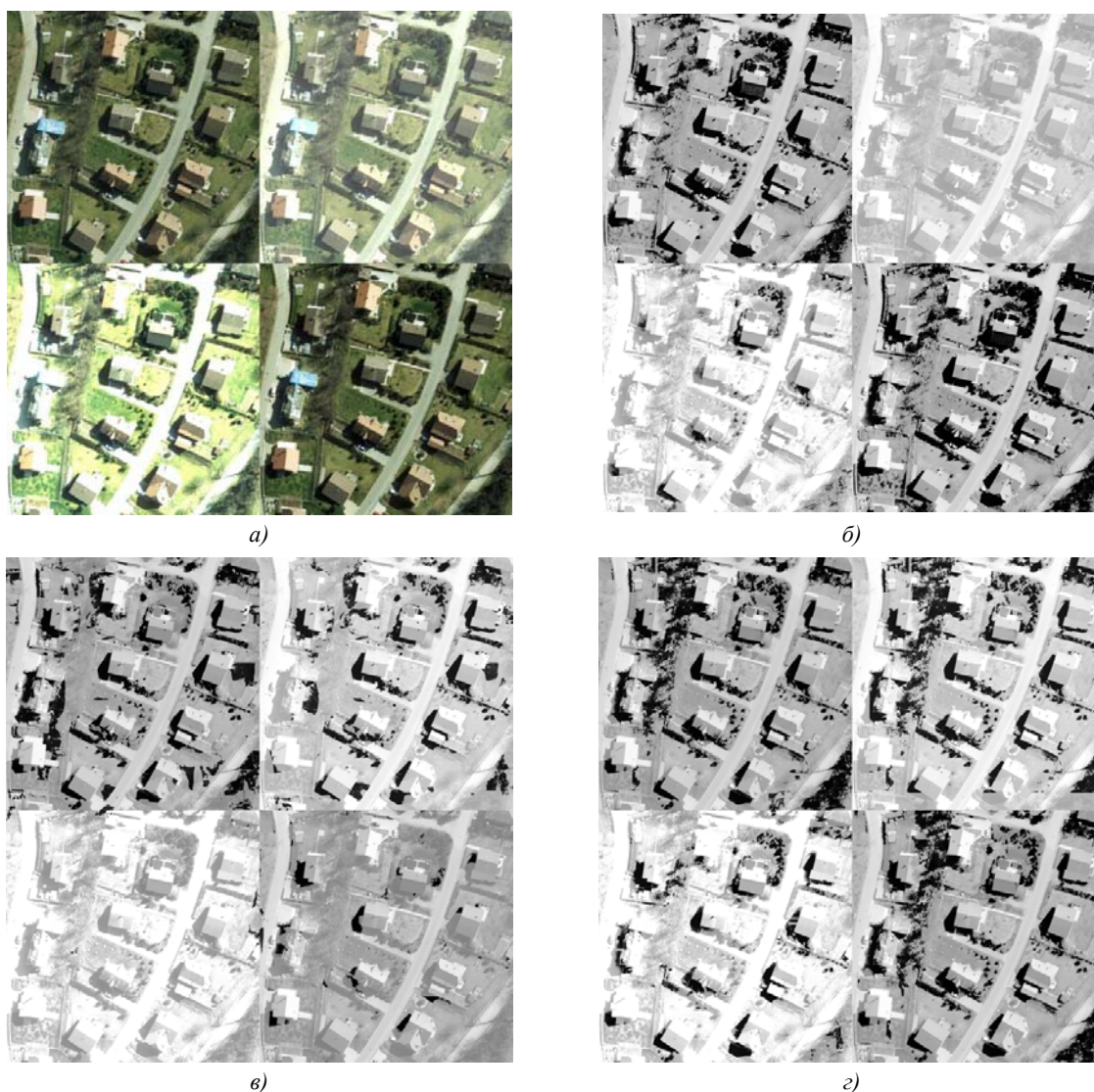


Рис. 6. Тестирование алгоритма: а) цветное аэрокосмическое изображение, подготовленное для тестирования; б) результат сегментации тени вручную по порогу; в) результат автоматической сегментации тени по сглаженной гистограмме для окна 250 × 250 пикселей; г) результат автоматической сегментации тени по углу наклона гистограммы для окна 250 × 250 пикселей

Заключение

В статье предложен алгоритм автоматического выделения теней на основе анализа формы оконных гистограмм яркостей изображений. Рассмотрено несколько способов нахождения максимума оконной гистограммы, соответствующего значениям яркостей затененной области: на основе скользящего среднего, кусочно-линейной и кусочно-квадратичной аппроксимаций, взвешенных кубических сплайнов. Также приведен вариант сегментации тени по углу наклона кривой оконной гистограммы.

Предлагаемые модификации алгоритма автоматического выделения теней были программно реализованы и протестированы на полутоновых и цветных изображениях городских ландшафтов, аэрофотоснимках и космических изображениях. Испытания показали хорошие результаты сегментации (см. рис. 6 и таблицу).

Предложенный алгоритм прост для понимания и реализации, легко поддается доработке. Метод также может быть легко модифицирован и для выделения наиболее ярких объектов, например крыш зданий.

Список литературы

1. Computer Vision Information Pages. Cloud Detection, Shadow Detection and Extraction [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.visionbib.com/bibliography/segment343.html>. – Date of access : 01.07.2010.
2. Nagao, M. Region extraction and shape analysis in aerial photos / M. Nagao, T. Matsuyama, Y. Ikeda // Computer Graphics and Image Processing. – 1979. – Vol. 10, iss. 3. – P. 195–223.
3. Dare, P.M. Shadow analysis in high-resolution satellite imagery of urban areas / P.M. Dare // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2005. – Vol. 71. – P. 169–177.
4. Renno, J.-P.R. Evaluation of shadow classification techniques for object detection and tracking / J.-P.R. Renno, J. Orwell, G.A. Jones // International Conference on Image Processing. – Singapore, 2004. – Vol. 1. – P.143–146.
5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. Chen, B. Shadow Detection Based on RGB Color Model // B. Chen, D. Chen / Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – 2006. – Vol. 345. – P. 1068–1074.
7. Wang, Y. Shadow detection of urban color aerial images based on partial differential equations / Y. Wang, S. Wang // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Vol. 37, Part B2. – P. 325–328.
8. Antonio da Silva, E. Shadows and clouds detection in high resolution images / E. Antonio da Silva, T. Statella // The Future of Land Imaging. – 2008. – Vol. 17. – P. 138–147.
9. Giles, P. Remote sensing and cast shadows in mountainous terrain / P. Giles // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2001. – Vol. 67 (7). – P. 833–839.
10. Rau, J.-Y. True orthophoto generation of built-up areas using multi-view images / J.-Y. Rau, N.-Y. Chen, L.-C. Chen // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2002. – Vol. 68 (6). – P. 581–588.
11. Porikli, F. Integral Histogram: A Fast Way To Extract Histograms in Cartesian Spaces / F. Porikli // Proc. of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – San Diego, CA, USA, 2005. – Vol. 1. – P. 829–836.
12. Juang, C. Object detection by color histogram-based fuzzy classifier with support vector learning / C. Juang, W. Sun, G. Chen // Neurocomput. – 2009. – Vol. 72. – P. 2464–2476.
13. Rapid and precise object detection based on color histograms and adaptive bandwidth mean shift / X. Chen [et al.] // Proc. of the 2009 IEEE/RSJ intern. conf. on intelligent Robots and Systems. – St. Louis, MO, USA, 2009. – P. 4281–4286.

Поступила 17.08.10

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси,
Минск, Сурганова, 6
e-mail: {Pavel.Lukashevich, zalesky}@newman.bas-net.by*

P.V. Lukashevich, B.A. Zalessky

HISTOGRAM-BASED SHADOW DETECTION ON IMAGES

Algorithms for automatic shadow detection on grayscale and color images based on the analysis of shape of local histograms are presented. The proposed algorithms are robust against the shifting and stretching of histograms. They provide satisfactory quality of shadow detection on aerial photographs and satellite images including images with unstable color and brightness characteristics in different areas. Numerous tests demonstrated applicability of the algorithms for practical shadow detection.