УДК 51-74

Влацкая И.В.[1], Баранов Д.А.[1], Сенчишак Т.И.[2], Травкин С.А.[2]
[1]Оренбургский государственный университет
[2]Оренбургский филиал ФГБУ ВНИИПО МЧС России
E-mail: oren.vniipo@.mail.ru; travkin_1975@mail.ru; mois@mail.osu.ru, demon.asgard@gmail.com

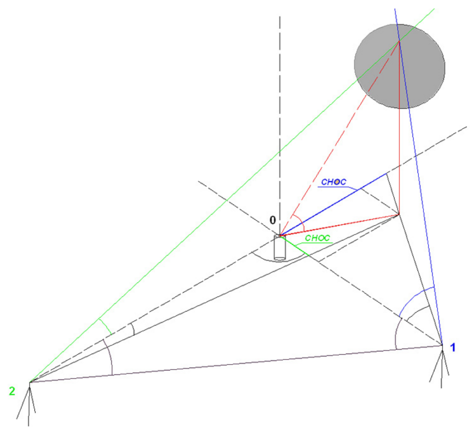
АППРОКСИМАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ ОГНЕННОГО ШАРА СФЕРОЙ НА ОСНОВЕ ДВУХ ФОТОГРАФИЙ

Данная статья посвящена автоматизированной обработке экспериментальных данных, полученных при исследовании взрывов горючих жидкостей с образованием огненных шаров. Предложены алгоритмы выделения огненных шаров на снимке с помощью нечеткой кластеризации и построение сферы, аппроксимирующей поверхность огненного шара по двум снимкам.

Ключевые слова: огненный шар, аппроксимация, распознавание, кластеризация, цифровые изображения.

Определение геометрических параметров «Огненных шаров» необходимо для исследования их поражающих факторов, а также для разработки мероприятий и методов защиты от них. Геометрические параметры тесно связаны с энергетическими характеристиками поражающих факторов огненных шаров. Измерения данных параметров обычно производятся с кадров фото или видеосъемок. Определением пространственного положения и размеров измеряемого объекта посредством обработки кадров фотоизображений занимается фотограмметрия. Основным достоинством данного метода при измерении геометрических параметров огненных шаров является бесконтактность процесса измерения, что очень важно, учитывая особую опасность процесса. При ручном выполнении данных работ на качество измерений сильно влияет погрешность измерительных инструментов и аппаратуры и человеческий фактор, который значительно возрастает при больших объемах обработки фотоматериала. Большое количество кадров, приходится обрабатывать при проведении исследований огненных шаров, когда съемка производится с нескольких точек. После фотограмметрической обработки изображений, полученные плоскостные значения геометрических параметров необходимо использовать дальше для объемного расчета геометрических параметров изучаемого тела. На сегодняшний день существуют и разрабатываются программные продукты, которые ускоряют и удешевляют процессы измерений объектов по кадрам цифровой съемки. Данные системы кроме преимуществ имеют и свои недостатки, необходимо участие высококвалифицированных операторов с глубокими познаниями в разных отраслях науки. Кроме того, данные продукты, как правило, разрабатываются для обработки статических или малоподвижных объектов. Особенно это проявляется при исследовании геометрических параметров огненных шаров, когда необходимо отследить перемещение поверхности огненного шара, которая меняет свою форму на протяжении всего времени существования. Так же со временем меняется цвет огненного шара, траектория движения и многие другие параметры. Поэтому создание автоматизированной системы для определения геометрических параметров огненных шаров на основе кадров фотоизображений, учитывающей многофакторность процесса и минимизирующей участие человека, на сегодняшний день является актуальной задачей.

При написании этой статьи использовались результаты экспериментов (снимки огненных шаров), которые проводились по схеме, приведенной на рисунке 1.



где 0 — испытательная установка; 1 — первая камера; 2 — вторая камера

Рисунок 1. Схема испытательной установки

Выделение огненного шара на фотографии является частным случаем сегментации — разделения изображения на несколько сегментов по определенному признаку [1].

На рисунке 2 приведен пример исследуемого изображения.

Как видно, огненный шар хорошо выделяется на фоне неба, земли и других объектов, поэтому для его автоматического распознавания удобно применять кластеризацию по некоторому цветовому признаку. Для выбора этого признака были рассмотрены представления исследуемого изображения в различных цветовых пространствах: RGB, YUV, HSV, CMYK [1,2].

В качестве алгоритма кластеризации был выбран алгоритм C-means из-за возможности влиять на работу алгоритма посредством параметра m и получения результата в виде нечеткого множества. Алгоритм нечеткой кластеризации C-means основывается на минимизации целевой функции $J=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{C}u_{ij}^{m}\left\|x_i-c_j\right\|^2$,

где m — параметр, $m\in R, m>1$, u_{ij} — степень принадлежности x_i кластеру c_j, $\|*\|$ — норма, характеризующая близость элемента к центру кластера. Процесс оптимизации целевой функции заключается в итеративном пересчете степеней u_{ij} и центров кластеров c_j:

$$u_{ij}=\frac{1}{\sum_{k=1}^{C}\left(\frac{\left\|x_i-c_j\right\|}{\left\|x_i-c_k\right\|}\right)^{2/m-1}}$$

$$c_j=\frac{\sum_{i=1}^{N}u_{ij}^{m}x_i}{\sum_{i=1}^{N}u_{ij}^{m}}$$

Условие окончания итерации: $max_{ij}\left(\left|u_{ij}^{(k+1)}-u_{ij}^{(k)}\right|\right)<\varepsilon$, где ε — заданный критерий между 0 и 1.

В итоге, наилучший результат был получен при кластеризации по красному цветохроматическому компоненту пространства YUV.

На рисунке 3 приведен результат работы алгоритма C-means с параметром m=1.5 по красному цветохроматическому компоненту на исследуемом изображении.

Несложно заметить, что полученный результат отлично подходит для построения аппроксимирующей окружности, за исключением небольшого шума, образовавшегося из-за отдельных искр и горящего топлива рядом с испытательной установкой.

Для удаления шума используется модификация алгоритма заливки (построчного заполнения с затравкой) [3], удаляющая все области

Рисунок 2. Пример исследуемого изображения

исследуемого кластера, кроме самой большой. Рассмотрим алгоритм подробнее:

1. Изображение обходится слева-направо сверху-вниз.

2. При нахождении точки из исследуемого кластера она помещается в стек и выполняется переход к шагу 3.

3. Извлекается точка с вершины стека, если она уже закрашена, извлекается следующая, пока стек не опустеет.

4. Если стек пуст, а незакрашенной точки не найдено, выполняется переход к шагу 8.

5. Выполняется смещение влево до первой незакрашенной точки.

6. Выполняется проход вправо до последней закрашенной точки с закрашиванием всех пройденных (и сохранением их в отдельном множестве) и помещением в стек любых незакрашенных точек сверху и снизу от текущей точки.

7. Выполняется переход к шагу 3.

8. Сохраняется множество закрашенных точек под номером закрашенной области;

9. Переход к шагу 1;

10. После обхода всего изображения будет получен набор закрашенных областей, из которых выбирается наибольшая, остальные отбрасываются.

На выходе алгоритма получается наибольшая область связанных точек, образующих проекцию огненного шара на снимке.

Для упрощения алгоритма используется отдельная матрица, хранящая номер кластера для каждой точки изображения. Точка, номер кластера которой совпадает с кластером шара (который должен быть установлен до начала работы алгоритма) считается незакрашенной.

Теперь задача аппроксимации проекции шара сводится к построению минимальной окружности, описывающей область (множество точек), полученную в результате работы описанных выше алгоритмов. В данном случае подразумевается, что минимизируется отношение количества точек, не относящихся к шару, к количеству точек шара.

Алгоритм построения такой окружности выглядит следующим образом: в качестве центра выбирается среднее арифметическое точек кластера шара, затем производится поиск максимального расстояния от каждой точки кластера шара до центра, это расстояние будет радиусом. На рисунке 4 можно увидеть результат работы этого алгоритма на рассмотренном выше примере.

На основе имеющихся экспериментальных данных, в частности, расположении камер и испытательной установки (в трехмерном пространстве), можно восстановить трехмерные координаты точки в проецируемой области двух камер по снимкам с этих камер, проведя через эту точку и камеры лучи. Пересечение лучей (точнее, середина кратчайшего отрезка между этими

Рисунок 3. Пример результата работы алгоритма нечеткой кластеризации

лучами, учитывая неизбежную погрешность) и будет приблизительной позицией искомой точки. Схема алгоритм изображена на рисунке 5.

Рассмотрим задачу поиска середины кратчайшего отрезка между двумя лучами в пространстве подробнее (точка C на рисунке 5).

Два луча, заданные в параметрической форме: $R^{(1)} = R_0^{(1)} + L^{(1)} s^{(1)}$ и $R^{(2)} = R_0^{(2)} + L^{(2)} s^{(2)}$, где $R_0^{(i)}$ — начальная точка i-го луча (совпадает с положением i-ой камеры), $\vec{L}^{(i)}$ — направляющий вектор луча (совпадает с оптической осью i-ой камеры), $\left|\vec{L}^{(i)}\right| = 1, i = 1,2$, $s^{(i)}$ — параметр i-го луча, $s^{(i)} \ge 0, R^{(i)}$ — множество точек i-го луча. Нужно найти Z — центр кратчайшего отрезка, соединяющего лучи 1 и 2.

Для решения этой задачи используется следующий алгоритм: Строится плоскость P, проходящая через луч 1 и перпендикулярная лучу 2: $P = P_0 + \vec{A}t_1 + \vec{B}t_2$, где P_0 — начальная точка плоскости, $\vec{A}$ — первый направляющий вектор плоскости, $\vec{B}$ — второй направляющий вектор плоскости, t_1, t_2 — параметры плоскости, $t_1, t_2 \in R$, P — множество точек плоскости. Чтобы плоскость проходила через луч 1 и была перпендикулярна лучу 2, направляющие вектора должны быть заданы следующим образом:

$$\vec{A} = \vec{L}^{(1)},\ \vec{B} = \frac{\vec{L}^{(1)} \times \vec{L}^{(2)}}{\left|\vec{L}^{(1)} \times \vec{L}^{(2)}\right|},$$

где $\vec{L}^{(1)} \times \vec{L}^{(2)}$ — векторное произведение направляющих векторов лучей 1 и 2. Поскольку плоскость проходит через луч 1, ее начальная точка может совпадать с начальной точкой этого луча:

$$P_0 = R_0^{(1)}$$

Далее находится пересечение луча 2 с плоскостью, для этого приравниваются правые части их параметрических уравнений [4]:

$$R_0^{(2)} + \vec{L}^{(2)} s^{(2)} = P_0 + \vec{A} t_1 + \vec{B} t_2$$

Полученное уравнение можно представить в координатной форме:

$$\begin{cases} R_{0x}^{(2)} + L_x^{(2)} s^{(2)} = P_{0x} + A_x t_1 + B_x t_2 \\ R_{0y}^{(2)} + L_y^{(2)} s^{(2)} = P_{0y} + A_y t_1 + B_y t_2 \\ R_{0z}^{(2)} + L_z^{(2)} s^{(2)} = P_{0z} + A_z t_1 + B_z t_2 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} L_x^{(2)} s^{(2)} - A_x t_1 - B_x t_2 = P_{0x} - R_{0x}^{(2)} \\ L_y^{(2)} s^{(2)} - A_y t_1 - B_y t_2 = P_{0y} - R_{0y}^{(2)} \\ L_z^{(2)} s^{(2)} - A_z t_1 - B_z t_2 = P_{0z} - R_{0z}^{(2)} \end{cases}$$

Решением полученной СЛАУ находятся значения параметров s', t_1', t_2', при которых плоскость пересекается с лучом 2. Если $s' < 0$, то луч параллелен плоскости. Обозначим точку пересечения луча 2 с плоскостью M, $M = R_0^{(2)} + L^{(2)} s'$. Далее из точки M опускается перпендикуляр на луч 1. Обозначим точку пересечения этого перпендикуляра с 1 лучом че-

Рисунок 4. Описанная окружность по среднему арифметическому

рез N. Так как $R_0^{(1)} = P_0$, $\vec{A} = \vec{L}^{(1)}$, $\vec{B} \perp \vec{L}^{(1)}$, $\vec{B} \perp \vec{L}^{(2)}$, точка N будет находиться следующим образом:

$$N = R_0^{(1)} + \vec{A}t'_1.$$

Как видно из рисунка 5, $M = B$, $N = A$, следовательно $C = \dfrac{M+N}{2}$ — искомая точка.

Из-за отсутствия точных характеристик оптической системы фотоаппарата, например, эффективного фокусного расстояния, используется упрощенная геометрическая модель этой системы для нахождения луча, проходящего сквозь произвольную точку на снимке [5]. Схема этой модели изображена на рисунке 6.

На чертеже используются следующие обозначения:

1. OO_1 — оптическая ось фотоаппарата;
2. MC — сечение матрицы, на которой формируется изображение;
3. L — расстояние от камеры до линейки;
4. D — основание линейки.

Из чертежа видно, что зная угол α можно найти угол между лучом, проходящим через любую точку на изображении (матрице) и оптической осью, а следовательно, и направляющий вектор луча. Начальной точкой луча будет точка O (координаты камеры). Угол α можно найти, зная длину OO_1:

$$tg\,\wp = \frac{O_1D}{OO_1} = \frac{AB}{OA}$$

$$tg\alpha = \frac{AC}{OA}$$

$$\frac{tg\,\wp}{tg\alpha} = \frac{AB}{AC} \Rightarrow tg\alpha = \frac{ACtg\,\wp}{AB} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow tg\alpha = \frac{AC\dfrac{O_1D}{OO_1}}{AB} \Rightarrow \alpha = arctg\frac{AC\dfrac{O_1D}{OO_1}}{AB}$$

Из тех же самых соображений, угол α для произвольной точки B выражается следующим образом:

$$\wp = arctg\frac{ABtg\alpha}{AC}$$

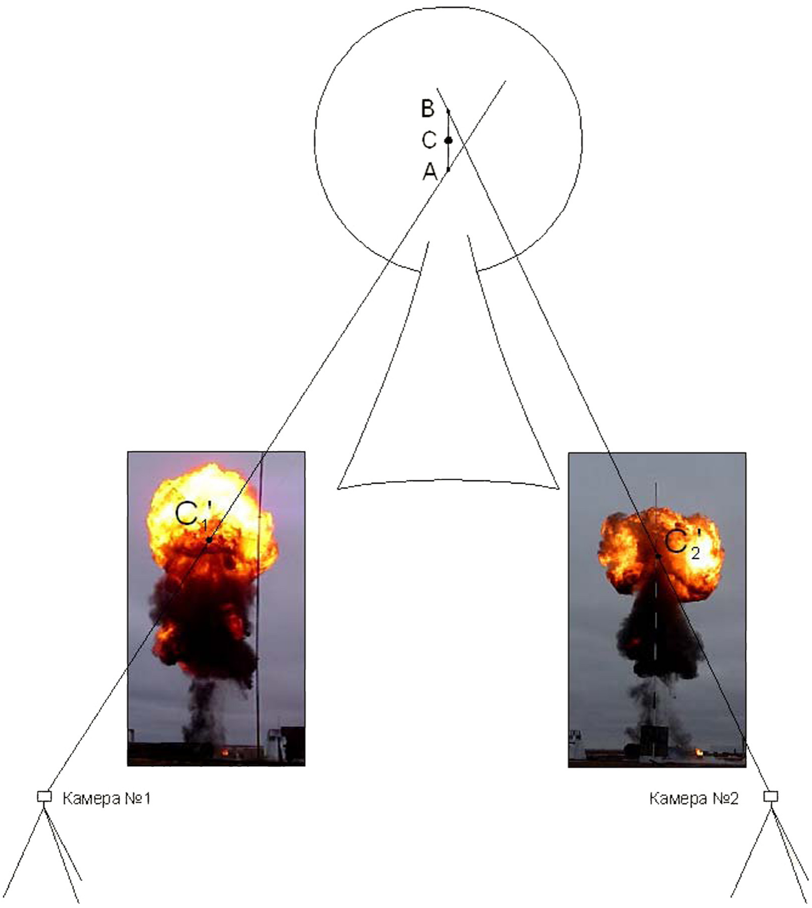


Рисунок 5. Схема восстановления пространственных координат точки по двум снимкам

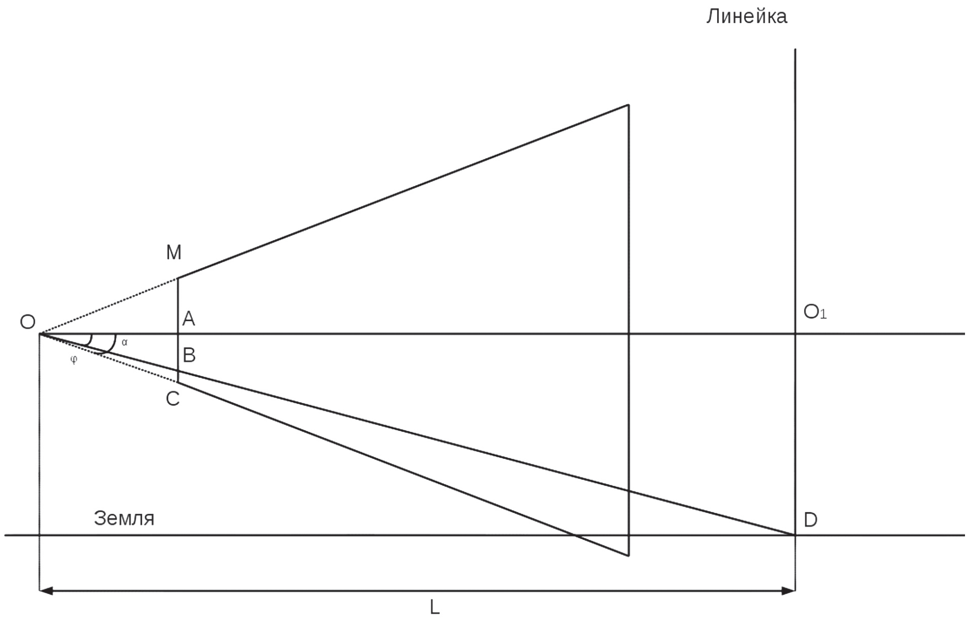


Рисунок 6. Упрощенная геометрическая модель оптической системы

Замечание: AB и AC точно не известны, т. к. не известны размеры матрицы фотоаппарата, однако, необходимо только их отношение, а для этого достаточно разрешение изображения и расстояние (в точках) от центра снимка до точки B (длину перпендикуляра, опущенного на ось, проходящую через центр, т. к. рассматривается сечение трехмерной системы) [6].

На чертеже, приведенном на рисунке 6, оптическая ось параллельна земле, поэтому $OO_1 = L$, что на практике происходит далеко не всегда. В более общем случае, когда оптическая ось находится под ненулевым углом к земле, задача аналогична частному случаю, однако, O_1 в данном случае неизвестна. Но, поскольку камера не двигается в течении серии снимков, можно найти ее с помощью пользователя: на одном из снимков проводится горизонтальная линия, пересекающая оптическую ось (проходящую через центр снимка) и пользователю предлагается найти высоту линейки в точке, где она пересекается с проведенной линией.

Используя вышеописанные методы, можно найти координаты центра сферы, описывающей огненный шар. Для нахождения центра следует провести лучи из камер через центры описывающих окружностей на снимках и найти середину кратчайшего отрезка, соединяющего их.

Выводы

1. Найден способ автоматического выделения огненного шара на снимке;

2. Предложен метод нахождения пространственных координат точки по двум снимкам;

3. Описанные методы в совокупности позволяют в автоматическом режиме обрабатывать результаты экспериментов (вычислять геометрические параметры огненных шаров), значительно упрощая ручную работу и минимизируя погрешность, вносимую человеком.

14.01.2012

Список литературы:
1. Востриков, А. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах // НГТУ, 2002.
2. Божко, А. Н. Компьютерная графика // МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.
3. Яне, Б. Цифровая обработка изображений // Москва, Техносфера, 2007.
4. Александров, П. С. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры // Москва, Наука, 1979.
5. Чекмарев, А. А. Начертательная геометрия и черчение // Москва, Владос, 2002.
6. Бегунов, Б. Н. Геометрическая оптика // Издательство Московского Университета, 1966.

Сведения об авторах:
Влацкая Ирина Валерьевна, заведующий кафедрой математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент, e-mail: mois@mail.osu.ru
Баранов Дмитрий Александрович, аспирант кафедры математического обеспечения информационных систем Оренбургского государственного университета, e-mail: demon.asgard@gmail.com
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13
Сенчишак Тарас Иосафатович, начальник Оренбургского филиала ФГБУ ВНИИПО МЧС России, кандидат технических наук, доцент, полковник внутренней службы, e-mail: oren.vniipo@.mail.ru
Травкин Станислав Анатольевич, старший научный сотрудник специального научно-исследовательского отдела Оренбургского филиала ФГБУ ВНИИПО МЧС России, майор внутренней службы
460006, г. Оренбург, ул. Сухарева, 40, e-mail: travkin_1975@mail.ru

UDC 51-74
Baranov D.A., Vlatskaya I.V., Senchishak T.I., Travkin S.A.
SPHERICAL APPROXIMATION OF THE FIREBALL BASED ON TWO SHOTS

This article focuses on the automated processing of experimental data obtained in the study of flammable liquids explosions with the formation of fireballs. The algorithms of fireballs allocation in a picture using fuzzy clustering and construction of the sphere, which approximates the surface of the fireball based on two shots were proposed.

Key words: fireball, approximation, recognition, clusterization, digital images.

Bibliography:
1. Vostrikow, A. S. Digital image processing in information systems // Novosibirsk, NGTY, 2002.
2. Bojko, A. N., Computer graphics // Moscow, Bayman MGTU.
3. Jane, B. Digital image processing // Moscow, Technosphere, 2007.
4. Aleksandorw, P. S. The course of analytical geometry and linear algebra // Moscow, Science, 1979.
5. Checkmarev A. A. Descriptive geometry and drawing // Moscow, Vlados, 2002.
6. Begynov B. N. Geometrical optics / Moscow University Publishing, 1966.