

Т. В. Захарова, Э. А. Шагиров (Москва, МГУ). Оптимизация метода цветовой фильтрации для решения задач аэродинамики.

В данной работе проведена оптимизация алгоритма цветовой фильтрации, предложенного ранее в статьях [1–3]. Алгоритм был построен для решения задачи по определению плотности аэродинамического потока обтекания модели обдува на дозвуковой скорости. При этом использовалась простейшая линейная аппроксимация для эталонной кривой цветности, что не давало нужной точности в обработке отдельных экспериментальных измерений.

В работе нами предлагается новый алгоритм, основанный на более высоком порядке аппроксимации. Данная методика позволила получить более высокую точность измерений в широкой шумовой полосе помех. Ранее подобные результаты достигались только с использованием высокоточной и дорогой аппаратуры на основе интерферометрического принципа измерения. Метод устойчиво работает также и на экспериментальных данных, полученных со значительной погрешностью.

Как известно, в аэродинамическом эксперименте визуальная картина обтекания модели воздушным потоком зачастую является единственной решающей информацией при выборе той или иной геометрической конфигурации тела обдува (типа крыла самолета или формы снаряда).

Как правило, цветные теневые методы в эксперименте в основном используются только для качественной визуализации. Применение их для количественных оценок параметров газового потока наталкивается на большие технические и технологические трудности [1, 2]. В работе [2] приведен алгоритм, позволяющий локализовать области с заданным свойством и выделять их четкие границы. Как правило, более простым и надежным способом для измерительных целей считается применение интерферометра или простых датчиков давления. Однако, датчики всегда вносят возмущение в окрестности контролируемой точки пространства, а интерферометры не всегда работают устойчиво из-за сильных вибраций во время эксперимента. Новый алгоритм цветовой фильтрации позволяет провести не только качественный, но и количественный анализ.

Для определения параметров аэродинамического потока исследовались цветные изображения потока, полученные видеокамерой. Примеры таких изображений приведены на рис. 1.

Полученные снимки переводились в графический формат. Каждый пиксель графического файла является точкой в цветовой системе координат RGB, где в качестве осей координат принята триада цветов: красный, зеленый, синий. Координаты R,G,B изменяются в диапазоне от 0 до 255 единиц.

Пусть α, β, γ — углы вектора (R,G,B) с осями координат R,G,B. При переходе к сферической системе координат $(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$, каждый пиксель отображается на единичную сферу.

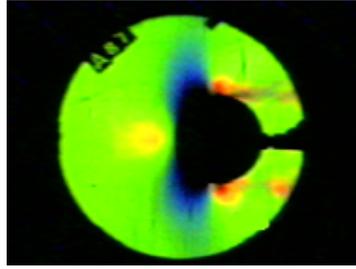


Рис. 1. Картина обтекания цилиндра

Цвета делятся на природные физические (эталонные) и иллюзорные. Природные цвета образуют некоторую кривую на сфере. Эта кривая называется эталонной кривой цветности. Каждой точке эталонной кривой поставлен в соответствие индекс цветности, изменяющийся в диапазоне от -70 до $+65$ единиц. На снимке (рис. 2) представлено спектральное разложение света в аэродинамической трубе до начала обдувки.

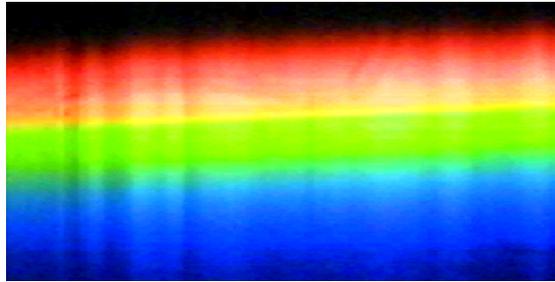


Рис. 2. Природный спектр света

Интегральная плотность в точке потока связана простой зависимостью с индексом цветности этой точки. Поэтому задача сводится к определению цветности точки потока. Но в ходе эксперимента изображения снимаются с искажением эталонного цвета. Тем самым возникает задача по восстановлению истинного индекса цветности.

Опытным путем были получены графические изображения цветов точек эталонной кривой с шагом разбиения 5 по индексу цветности. По ним были определены эталонные классы H_i (рис. 3).



Рис. 3. Эталонные классы цветности

Для каждого эталонного класса H_i была получена оценка выборочного среднего, выборочной дисперсии и определен центр $z_i = (z_{i1}, z_{i2}, z_{i3})$. Координаты центра это среднее арифметическое по каждой цветовой сферической координате точек соответствующего эталонного класса.

Чтобы показать насколько близко расположены центры соседних классов ниже приведена таблица соответствия центров классов индексам цветности X или таблица [1]. Отметим также, что некоторые эталонные классы пересекаются. Применим метод дискриминантного анализа. Введем дискриминантные функции $d_i(v) = \sqrt{a_{i1}(v_1 - z_{i1})^2 + a_{i2}(v_2 - z_{i2})^2 + a_{i3}(v_3 - z_{i3})^2}$, где $v = (v_1, v_2, v_3)$ — произвольный вектор цветового пространства,

$$a_{ik} = (\min_{j \neq i} |z_{ik} - z_{jk}|) / D_{ik}, \text{ для } k=1,2,3, \quad D_{ik} \text{ — выборочная дисперсия } v_k \text{ на } H_i.$$

По функциям d_i проведено разбиение пространства возможных значений цветового вектора $v(\cos \alpha, \cos \beta, \cos \gamma)$. Считается, что $v \in H_i$, если $d_i(v) = \min_j d_j(v)$. Видно, что функции d_i определяют метрику и поэтому можно сказать, что H_i это

ближайший эталонный класс для вектора v . Затем для вектора v определяется второй ближайший класс, расстояние до центра которого определяется по метрике d_i . Пусть индексы цветности этих классов равны X_1 и X_2 соответственно, а расстояние до центров каждого из них ρ_1 и ρ_2 .

Таблица. Эталонные классы цветности

$\cos \alpha$	$\cos \beta$	$\cos \gamma$	X	$\cos \alpha$	$\cos \beta$	$\cos \gamma$	X
0,030	0,181	0,983	-70	0,536	0,844	0,010	0
0,055	0,185	0,981	-65	0,543	0,839	0,026	5
0,079	0,238	0,968	-60	0,589	0,807	0,047	10
0,091	0,266	0,960	-55	0,700	0,700	0,137	15
0,131	0,293	0,947	-50	0,754	0,618	0,225	20
0,149	0,338	0,929	-45	0,766	0,565	0,306	25
0,177	0,359	0,916	-40	0,778	0,534	0,330	30
0,187	0,442	0,877	-35	0,799	0,470	0,376	35
0,243	0,540	0,806	-30	0,883	0,378	0,277	40
0,280	0,654	0,703	-25	0,947	0,282	0,156	45
0,330	0,754	0,569	-20	0,987	0,153	0,044	50
0,385	0,846	0,368	-15	0,997	0,078	0,000	55
0,456	0,875	0,165	-10	0,997	0,076	0,000	60
0,528	0,846	0,073	-5	0,997	0,075	0,000	65

Тогда цветность X вектора v вычисляется по следующему алгоритму. Эталонная кривая определяется эмпирически в узлах заданных таблицей. На сфере выберем первые три узла кривой цветности и построим по ним параболическую аппроксимацию кривой, далее, двигаясь по кривой, добавим следующий узел и по трем последним узлам определяем параболическую функцию, кривую цветности аппроксимируем только звеном параболы между последними двумя узлами и так далее. В результате получается аппроксимация истинной кривой цветности кусочно-параболической непрерывной функцией. Пусть L — длина построенной кривой в пространстве между узлами X_1 и X_2 . L легко вычисляется при наличии параметризации (параметром x в данном случае является цветность). Элемент длины кривой $dl(x)$ имеет вид $dl(x) = \sqrt{r'^2(x) + g'^2(x) + b'^2(x)} dx$, где через (r, g, b) обозначены координаты вектора v . Тогда определим X по формуле $X = X_1 + \rho_1/(\rho_1 + \rho_2) \cdot L$.

Расчет индекса цветности по предложенной методике имеет высокую точность измерений. Погрешность имеет порядок не ниже, чем 10^{-5} единицы измерения цветности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zakharova T. V., Berezenцев M. U.* About a method of supervision classification in the decision of aerodynamic problems. — In: Transactions of the XXIV International Seminar on Stability Problems for Stochastic Models. Riga: ТТИ, 2004, p. 353–356.
2. *Захарова Т. В.* Метод распознавания для восстановления изображений цветных теневых картин. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2005, т. 12, в. 4, с. 967–968.
3. *Захарова Т. В., Березенцев М. Ю.* Статистический метод классификации наблюдений для измерения цветности аэродинамических картин обтекания. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2004, т. 11, в. 2, с. 339.