

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОТОНИКИ

УДК 621.391

П. А. Бакут, М. В. Кузнецов, К. Р. Лозин, А. Д. Ряхин

(Москва)

### ПОСТРОЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ ЯРКОСТНОЙ КАРТИНКИ, ОБУСЛОВЛЕННОМУ ВРАЩЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Рассмотрены понятие оптического потока и метод его определения по двум изображениям. Предложены метод построения трехмерной формы гладкого тела по оптическому потоку яркостной картинки, обусловленному вращением этого тела, а также метод восстановления формы поверхности по трем изображениям, полученным при вращении одного тела вокруг различных осей.

Разработанные к настоящему времени алгоритмы построения трехмерной формы объекта по производным интенсивности изображения движущегося объекта по времени и пространственным координатам (оптическому потоку) [1] обладают рядом недостатков, основным из которых является неустойчивость в областях равномерной окраски поверхности движущегося тела.

В данной статье предложено решение задачи построения трехмерной формы объекта по оптическому потоку, устойчивое для гладких областей с равномерной окраской поверхности.

Кратко рассмотрим сущность метода оптического потока. Пусть  $E(x, y, t)$  — яркость изображения в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ . Можно ожидать, что яркость будет той же самой в точке  $(x + \delta x, y + \delta y)$  в момент времени  $t + \delta t$ . Тогда

$$E(x, y, t) = E(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t).$$

Если яркость изменяется гладко, то правую часть можно разложить в ряд Тейлора:

$$E(x, y, t) = E(x, y, t) + (\partial E / \partial x) \delta x + (\partial E / \partial y) \delta y + (\partial E / \partial t) \delta t + e,$$

где  $e$  — члены высших порядков малости по  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta t$ , или, переходя к пределу, при  $t \rightarrow 0$  получим

$$\partial E / \partial x (\partial x / \partial t) + \partial E / \partial y (\partial y / \partial t) + \partial E / \partial t = 0.$$

Вводя  $U = dx/dt$ ,  $V = dy/dt$  — координаты вектора оптического потока, получим

$$(\partial E / \partial x) U + (\partial E / \partial y) V + \partial E / \partial t = 0. \quad (1)$$

Это выражение называют уравнением оптического потока. Для получения однозначности решения необходимо ввести дополнительное ограничение на компоненты  $U$  и  $V$ . Таким ограничением логично предположить гладкость оптического потока.

Для решения уравнения оптического потока (1) при условии его гладкости предлагается найти минимум функционала

$$\iint [(\partial U / \partial x)^2 + (\partial U / \partial y)^2 + (\partial V / \partial x)^2 + (\partial V / \partial y)^2 +$$

$$+ \lambda((\partial E/\partial x)U + (\partial E/\partial y)V + \partial E/\partial t)^2] dx dy, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — параметр, задающий вес отклонения от уравнения движения по отношению к отклонению от гладкости ( $\lambda$  выбирается в зависимости от точности изменения яркости).

Такая задача — стандартная задача вариационного исчисления, и ее решение подробно описано, например, в [1]. Все эти положения общие для любого движения яркостной картинки. Понятно, что оптический поток не обязательно гладок на всем изображении. Однако нахождение оптического потока в случае разрывов является сложной задачей, строгое решение которой в настоящее время не найдено. В данной статье рассматривается вращение гладкого твердого тела, поэтому ограничение гладкости оптического потока в этом случае вполне удовлетворимо.

Итак, рассмотрим случай, когда движение яркостной картинка происходит из-за вращения наблюдаемого гладкого твердого тела с угловой скоростью  $\omega = \omega(\alpha, \beta, \gamma)$  вокруг оси, проходящей через начало координат.

Пусть изображение объекта соответствует ортогональной проекции объекта на плоскость изображения, т. е. точка  $Q(x, y, z)$  объекта соответствует точке  $Q'(x', y')$  изображения, причем  $x' = x, y' = y$ .

Так как изменение яркостной картинка со временем происходит благодаря вращению объекта, то карта отражательной способности поверхности объекта  $R(p, q)$ , где  $p = \partial z/\partial x, q = \partial z/\partial y$ , постоянна во времени. Следовательно, оптический поток в этом случае соответствует скорости движения точки пространства градиентов  $G(p, q)$  в плоскости  $XY$ .

Рассмотрим точку объекта  $Q(x, y, z)$  с ориентацией поверхности в этой точке  $n(n_x, n_y, n_z)$ , где  $|n| = 1$ . Из вышеизложенного следует:

$$\begin{aligned} \partial n_x/\partial t + \partial n_x/\partial x U + \partial n_x/\partial y V &= 0, \\ \partial n_y/\partial t + \partial n_y/\partial x U + \partial n_y/\partial y V &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $(U, V)$  — координаты вектора оптического потока в точке  $Q(x, y)$ -изображения. Однако для точки поверхности объекта, вращающегося вокруг оси, проходящей через начало координат, с угловой скоростью  $\omega(\alpha, \beta, \gamma)$ , можно написать:

$$\begin{aligned} \partial n_x/\partial t + \partial n_x/\partial x(dx/dt) + \partial n_x/\partial y(dy/dt) &= \beta n_z - \gamma n_y, \\ \partial n_y/\partial t + \partial n_y/\partial x(dx/dt) + \partial n_y/\partial y(dy/dt) &= \gamma n_x - \alpha n_z, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $dx/dt = \beta z - \gamma y$  и  $dy/dt = \gamma x - \alpha z$ .

Исключая из уравнений (3) и (4) частные производные по времени  $\partial n_x/\partial t$  и  $\partial n_y/\partial t$ , получим

$$\begin{aligned} \partial n_x/\partial x(dx/dt - U) + \partial n_x/\partial y(dy/dt - V) &= \beta n_z - \gamma n_y, \\ \partial n_y/\partial x(dx/dt - U) + \partial n_y/\partial y(dy/dt - V) &= \gamma n_x - \alpha n_z \end{aligned}$$

или, обозначая  $U' = dx/dt - U$  и  $V' = dy/dt - V$ , имеем

$$\begin{aligned} (\partial n_x/\partial x)U' + (\partial n_x/\partial y)V' &= \beta n_z - \gamma n_y, \\ (\partial n_y/\partial x)U' + (\partial n_y/\partial y)V' &= \gamma n_x - \alpha n_z. \end{aligned}$$

В левой части этих уравнений стоят производные по направлению  $\partial n_x/\partial \xi$  и  $\partial n_y/\partial \xi$ . Они образуют угол  $\Theta_0$  с осью  $X$  такой, что  $\cos \Theta_0 = U'/\sqrt{U'^2 + V'^2}$ ,  $\sin \Theta_0 = V'/\sqrt{U'^2 + V'^2}$ . Выберем в этом направлении некоторый шаг  $\delta \xi$ , тогда приращения по  $x$  и  $y$  будут иметь вид  $\delta x = (U'/\sqrt{U'^2 + V'^2})\delta \xi$ ,  $\delta y = (V'/\sqrt{U'^2 + V'^2})\delta \xi$ . Для упрощения, взяв шаг длиной  $\delta x\sqrt{U'^2 + V'^2}$ , по-

лучим  $\delta x = U' \delta \xi$ ,  $\delta y = V' \delta \xi$ . Для вектора  $\mathbf{p}(n_x, n_y, n_z)$  можно написать:  $\delta n_x = (\beta n_z - \gamma n_y) \delta \xi$ ,  $\delta n_y = (\gamma n_x - \alpha n_z) \delta \xi$ ,  $n_z = \sqrt{1 - n_x^2 - n_y^2}$ . Для  $z$  имеем  $\delta z = (-(n_x/n_z)U' - (n_y/n_z)V') \delta \xi$ . Переходя к пределу при  $\delta \xi \rightarrow 0$ , получим систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x} = U', \\ \dot{y} = V', \\ \dot{z} = -(n_x/n_z)U' - (n_y/n_z)V', \\ \dot{n}_x = \gamma n_y - \beta n_z, \\ \dot{n}_y = \alpha n_z - \gamma n_x, \\ \dot{n}_z = \sqrt{1 - n_x^2 - n_y^2}, \end{cases} \quad (5)$$

где точка обозначает дифференцирование по  $\xi$ .

Если нам известны координаты некоторой точки поверхности объекта  $Q(x, y, z)$  и ориентация поверхности  $\mathbf{p}(n_x, n_y, n_z)$  в этой точке, то систему уравнений (5) можно решить численно. Результатом решения этой системы является характеристическая полоса, т. е. кривая в пространстве, вдоль которой известна ориентация поверхности. Для получения полной поверхности необходимо «сшить» характеристические полосы. Каждая из них должна иметь точку, где заданы начальные значения. Проблема «сшивки» отпадает, если для восстановления формы поверхности использовать три изображения одного объекта, повернутого вокруг различных осей. Тогда характеристическая полоса, найденная по первой паре изображений, будет базовой для определения формы по второй паре изображений. В этом случае необходимо знать координату и ориентацию единственной точки поверхности. Такой точкой, например, может быть точка зеркального отражения, в которой известна ориентация поверхности. Для нахождения координаты в начальной точке необходимы дополнительные условия, например условия на границе объекта.

На рис. 1 приведено изображение эллипсоида размером  $128 \times 128$  пиксел, смоделированное на ЭВМ РС/АТ. Для восстановления использовались три изображения, два из которых получены при повороте эллипсоида вокруг осей  $X$  и  $Y$  на угол  $0,1$  рад. На рис. 2 приведен оптический поток, обусловленный вращением эллипсоида вокруг оси  $Y$ , рассчитанный по формуле (2) при  $\lambda = 10$ . Расчет производился итерационным методом по 200 итерациям. Для простоты параметры эллипсоида выбраны так, что оптический поток, обусловленный вращением эллипсоида вокруг оси  $X$ , равен 0.

На рис. 3 показана поверхность, полученная при восстановлении численным методом по системе (5). Начальной точкой служила точка максимальной яркости, в которой  $\partial z / \partial x = 0$  и  $\partial z / \partial y = 0$ , так как вектор подсвета при формировании изображений был направлен по оси  $Z$ . Координата  $z$  выбиралась из условия, что на границе эллипсоида  $n_z = 0$ . Среднеквадратичная погрешность восстановления поверхности равна 0,174. В основном ошибка обусловлена тем, что выбранное нами условие гладкости при решении уравнения оптического потока имеет тенденцию к чрезмерному приближению координат

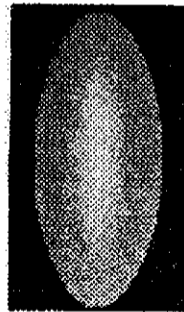


Рис. 1

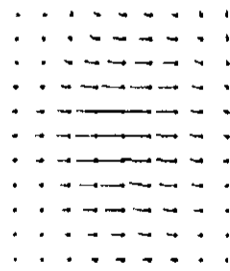


Рис. 2

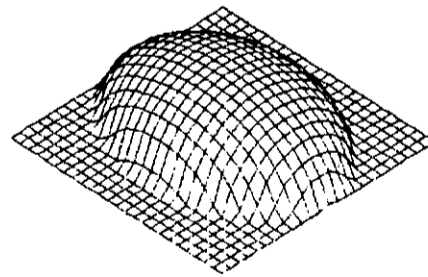


Рис. 3

вектора оптического потока к плоскости, что в итоге приводит к приближению восстановленной формы к шару. Этого можно избежать при точном измерении интенсивности, увеличивая  $\lambda$  (однако это приводит к увеличению числа необходимых итераций) или же выбрав для меры отклонения от гладкости частные производные второго и более высоких порядков.

Из этих результатов видно, что данный алгоритм дает хорошие результаты, если исходные изображения получены с высоким отношением сигнал/шум. Алгоритм работает только с гладкими равномерно окрашенными объектами. Если поверхность имеет изломы, можно применять данный алгоритм, сгладив предварительно исходные изображения гауссовым фильтром.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорн Б. К. П. Зрение роботов. — М.: Мир, 1989.
2. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. — М.: Радио и связь, 1987.

Поступила в редакцию 30 апреля 1991 г.

УДК 535.4 : 519.28

А. Г. Полещук

(Новосибирск)

#### ИЗГОТОВЛЕНИЕ РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫХ СТРУКТУР С НЕПРЕРЫВНЫМ И МНОГОУРОВНЕВЫМ ПРОФИЛЕМ ДЛЯ ДИФРАКЦИОННОЙ ОПТИКИ

Приводятся результаты исследования нового фотолитографического метода создания высокоэффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), не требующего в отличие от широкоизвестного многоуровневого метода изготовления комплекта фотошаблонов и их совмещения. Показано, что использование техники бинаризации полутоновых изображений позволяет с помощью единственного растрованного фотошаблона и проекционной оптической системы фотолитографической установки, используемой как фильтр высоких пространственных частот, изготавливать ДОЭ с непрерывным фазовым профилем и высокой дифракционной эффективностью. Сравнение растрового и многоуровневого методов показало, что предлагаемый метод предпочтителен при изготовлении ДОЭ с размером зон менее 10 мкм. С использованием алгоритма широтно-импульсной модуляции изготовлены экспериментальные образцы ДОЭ — корректоры аберраций и матрицы киноформных линз с числовой апертурой  $NA = 0,1$ . Дифракционная эффективность этих элементов, изготовленных на стандартном фотолитографическом оборудовании, составила свыше 80 %.

**Введение.** Дифракционные оптические элементы являются одними из важнейших компонентов оптических систем, таких, как лазерные считывающие головки, датчики, принтеры, соединители ВОЛС и т. д. Однако наиболее широкое применение их ожидается в области межсоединений СБИС и оптических вычислителей [1, 2]. Интерес к ДОЭ обусловлен тем, что они изготавливаются методами фотолитографии на тонких подложках в одном технологическом цикле и на том же оборудовании, что и СБИС. Этими методами достаточно просто изготовить ДОЭ с бинарным фазовым профилем. Дифракционная эффективность (ДЭ) таких элементов ограничена 40 %, а применение за редким исключением — научными исследованиями. Используя комплект из 3—4 фотошаблонов, можно изготовить многоуровневые ( $M = 8—16$ ,  $M$  — количество уровней) ДОЭ с ДЭ более 90 % и хорошим отношением сигнал/шум (ОСШ) [3, 4]. По своим параметрам эти ДОЭ вполне могут конкурировать с элементами классической оптики.

Однако возможности традиционной фотолитографической технологии ограничены при изготовлении ДОЭ с малым периодом зон —  $T$ . Это обусловлено тем, что размер элементарной ступеньки составляет  $T/M = 0,5—1$  мкм