являются частным случаем асферических поверхностей первого типа. При выводе формул учитывалось правило знаков, принятое в вычислительной оптике [2].

Расчет выполняется по следующему алгоритму:

1) вычисляются z, l, M, M_x, M_y по формулам (2) и (3);

2) определяется t по итерационным соотношениям (6), (7), если кривая задана формулой (5), или по уравнению (10), если поверхность имеет вид (9);

3) вычисляются координаты точки встречи луча по соотношению (4);

4) находится вектор нормали τ по формулам (8), если поверхность 1-го типа (5), или по (11), если асферика 2-го типа (9);

5) по результатам пп. 1—4 и формулам (12)—(14) с помощью (15) определяется направление преломленного луча.

Алгоритм, приведенный в настоящей работе, был реализован в программе на ЕС 1033 и применен для расчета голограмм для оптических систем с асферическими поверхностями, количество которых менялось от *2* до *14*. Если по известным до сих пор алгоритмам даже для простейших систем (голограмма для одиночной линзы) требовалось 4—5 ч машинного времени ЕС 1033 (или подобной) [3, 4], то для тех же расчетов по формулам настоящей работы нужно всего несколько минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Feder D. P.** Optical calculations with automatic computing machinery // JOSA.— 1951.— V. 41, N 9.— P. 630—635.
2. **Слюсарев Г. Г.** Методы расчета оптических систем.— Л.: Машиностроение, 1969.
3. **ОСТ 3-4731—80.** Алгоритмы расчета синтезированной голограммы.
4. **Canlfield H. J., Mueller P., Dvore P., Epstein A.** Computer holograms for optical testing // Proc. Photo-opt. Instrum. Eng.— 1982.— P. 306.

Поступило в редакцию 16 июня 1986 г.

УДК 519.219

А. Г. БУЙМОВ

(*Томск*)

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ШАГЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

В работе [1] показано, что дисперсия σ^2 ошибок совмещения изображений в отсутствие угловых и масштабных рассогласований приближенно соответствует формуле

$$\sigma^2 = \frac{\mu}{\psi}\,\frac{l_0^4}{T^2}\,d(z), \tag{1}$$

где $d(z) = 4z^2(1+2z)(1+z)^{-4}$, $z = t_0/l_0$; T — сторона изображения; ψ — дисперсия его яркости; l_0 — дифференциальный радиус корреляции изображения; μ — дисперсия аддитивного шума; t_0 — его интегральный радиус корреляции. Эти результаты получены в предположении равенства радиусов корреляции по обеим осям декартовых координат, факторизуемости корреляционных функций по этим координатам и выполнения условий $T \gg t_0$, l_0.

При дискретизации изображения с шагом Δ параметры l_0 и t_0 определяются по формулам [1]

$$l_0 = \Delta\sqrt{2}/\sqrt{1-\varphi(2\Delta)}; \tag{2}$$

$$t_0 = \frac{\Delta}{2}\sum_{k=-(n-1)}^{n-1}\left(1-\frac{|k|}{n}\right)\rho(k\Delta), \tag{3}$$

где $\varphi(\tau)$ и $\rho(\tau)$ — функции корреляции изображения и шума; $n = T/\Delta$. Если исходное изображение и шум имеют радиусы корреляции $\lambda_0 = 1\Big/\sqrt{-\ddot{\varphi}(0)}$; $\tau_0 = \frac{1}{2}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\rho(\tau)\,d\tau$, то в соответствии с (2) и (3)

$$l_0 \simeq \begin{cases}\lambda_0 & \text{при}\quad \Delta \ll \lambda_0;\\ \Delta\sqrt{2} & \text{при}\quad \Delta \gg \lambda_0;\end{cases}$$

$$t_0 \simeq \begin{cases}\tau_0 & \text{при}\quad \Delta \ll \tau_0;\\ \Delta/2 & \text{при}\quad \Delta \gg \tau_0.\end{cases}$$

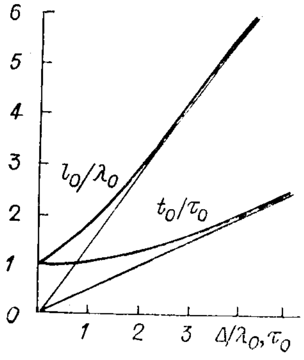

Рис. 1

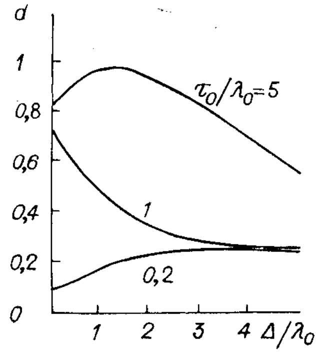

Рис. 2

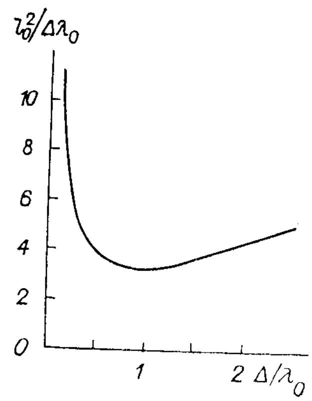

Рис. 3

В качестве примера на рис. 1 изображены зависимости

$$l_0 = \frac{\Delta\sqrt{2}}{\sqrt{1 - \left(1 + \frac{2\Delta}{\lambda_0}\right)e^{-2\Delta/\lambda_0}}}; \quad t_0 = \frac{\Delta}{2}\,\frac{1 + e^{-\Delta/\tau_0}}{1 - e^{-\Delta/\tau_0}}, \tag{4}$$

полученные при условиях $\varphi(\tau) = (1 + |\tau|/\lambda_0)\,e^{-|\tau|/\lambda_0}$, $\rho(\tau) = e^{-|\tau|/\tau_0}$, $T \gg \tau_0$. Прямыми показаны асимптоты для области больших Δ.

На рис. 2 приведены зависимости множителя $d(z)$ в формуле (1) как функции аргумента Δ/λ_0 при различных отношениях τ_0/λ_0. Из сравнения рис. 1 и 2 видно, что l_0 с увеличением Δ изменяется быстрее, чем $d(z)$. В связи с этим при постоянных μ, ψ, T дисперсия (1) с увеличением Δ монотонно возрастает, т. е. в этом случае увеличение дискрета приводит к потери информации и уменьшению точности совмещения изображений.

Теперь рассмотрим ситуацию, когда постоянны μ, ψ, n, т. е. когда с увеличением Δ увеличивается размер изображения $T = n\Delta$. В этом случае дисперсию (1) удобно представить в виде

$$\frac{\sigma^2}{\lambda_0^2} = \frac{\mu}{\psi n^2}\,\varkappa_1, \tag{5}$$

где

$$\varkappa_1 = \left(\frac{l_0^2}{\Delta\lambda_0}\right)^2 d(z). \tag{6}$$

На рис. 3 показана зависимость множителя $l_0^2/\Delta\lambda_0$ формулы (6) от Δ/λ_0 для случая (4). Экстремальный характер этой зависимости объясняется тем фактом, что с увеличением Δ, с одной стороны, теряется информация об изображении из-за потери высокочастотных составляющих пространственного спектра, а с другой — приобретается новая информация из-за увеличения T. Рассматриваемый множитель минимален при $\Delta = \lambda_0$. В силу того, что изменение Δ преобразует и мешающее действие шумового фактора, минимум результирующей зависимости (6) дисперсии σ^2 от Δ может иметь место при $\Delta \neq \lambda_0$. Как видно из рис. 4, оптимальное значение шага дискретизации при значительном отклонении отношения τ_0/λ_0 от единицы уменьшается. Дело в том, что при $\tau_0 \sim \lambda_0$ контуры изображения подвержены наибольшим шумовым деформациям и получение информации о высокочастотных составляющих пространственного спектра изображения за счет уменьшения Δ становится невозможным. При $\tau_0/\lambda_0 \ll 1$ и $\tau_0/\lambda_0 \gg 1$ высокочастотные составляющие искажаются незначительно и уменьшение Δ целесообразно.

Если в качестве критерия оптимальности шага дискретизации выбрать относительную дисперсию σ^2/T^2, пропорциональную дисперсии угловых и масштабных ошибок совмещения изображений, то оптимальное Δ будет соответствовать минимуму функции

$$\varkappa_2 = (\lambda_0/\Delta)^2\varkappa_1. \tag{7}$$

Естественно, при этом оптимальные Δ будут значительно больше, чем в случае (6).

На рис. 5 приведены кривые, которые обращаются в минимум одновременно с определителем ковариационной матрицы ошибок совмещения изображений по двум осям декартовых координат, углу и масштабу. При этом оптимальные Δ соответствуют минимуму функции $\varkappa_1\varkappa_2$ и занимают промежуточное положение между соответствующими значениями в случаях (6) и (7).

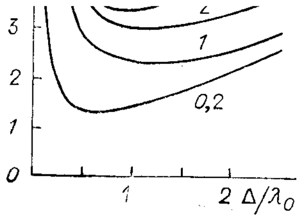

Рис. 4

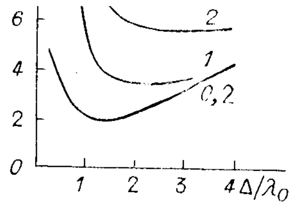

Рис. 5

Квазиоптимальная величина дискрета. Использование результатов по оптимальной дискретизации сопряжено с трудностью получения информации о конкретных значениях радиусов корреляции шума τ_0. Однако на основе анализа функции (6) при $\tau_0/\lambda_0 < 0{,}2$ и $\tau_0/\lambda_0 > 5$ и рис. 4 можно сделать вывод, что при всех $\tau_0/\lambda_0 > 0{,}2$ значение $\varkappa_1$ в точке $\Delta = \lambda_0$ мало отличается от минимального. В случае $\tau_0 \ll \lambda_0$ функция $\varkappa_1$ достигает своего наименьшего значения $\varkappa_1 = 1$. Если при этом выбрать $\Delta = \lambda_0$, можно по $\varkappa_1$ проиграть вдвое. В данной ситуации целесообразна предварительная расфокусировка сравниваемых изображений фильтром нижних частот.

На основе данных работы [2] можно показать, что при использовании расфокусирующего окна со стороной $\lambda_0/2$ и прямоугольной весовой функцией новое значение отношения радиусов корреляции шума и изображения лежит в области $\tau_0/\lambda_0 > 0{,}2$ и, следовательно, допускает выбор $\Delta = \lambda_0$, а новое отношение шум/сигнал $\sqrt{\mu/\psi}$ может по сравнению с начальным уменьшиться в $\sim 0{,}25\ \lambda_0/\tau_0$ раз (при начальном $\tau_0/\lambda_0 \ll 1$).

При минимизации функции $\varkappa_1\varkappa_2$ в качестве квазиоптимальной величины дискрета можно принять $\Delta = 2\lambda_0$. Это следует из рис. 5.

Интересно отметить, что в работах [3, 4] вывод о целесообразности сглаживания процессов перед дискретизацией получен из других соображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антипин В. В., Буймов А. Г.** Статистический анализ ошибок совмещения изображений по методу наименьших квадратов в условиях окрашенного шума // Автометрия.— 1985.— № 3.
2. **Буймов А. Г., Буймова Н. А.** Статистика расфокусированных изображений // КЭС управления.— Томск: Изд-во ТГУ, 1981.
3. **Красильников Н. Н.** Статистическая теория передачи изображений.— М.: Связь, 1976.
4. **Рабинер Л., Гоулд Б.** Теория и применение цифровой обработки сигналов.— М.: Мир, 1978.

Поступило в редакцию 24 октября 1984 г.

УДК 681.301

А. П. МАКАРОВСКИЙ, А. С. ОСТРОВСКИЙ, В. Н. ПАСЛЕН, В. С. СЛАВГОРОДСКИЙ

(*Киев*)

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОВ

Одна из важнейших задач современной робототехники — создание эффективных систем технического зрения. При ее решении одинаково важными являются как разработка технических средств, так и поиск перспективных методов обработки информации. В целом систему технического зрения роботов можно рассматривать как автоматизированное устройство распознавания и классификации изображений, удовлетворяющее ряду специфических требований, определяемых характером производственного процесса. Естественно, что для этой цели используется цифровая вычислительная техника и в первую очередь микропроцессоры [1]. Однако обработка изображений с помощью ЭВМ приводит к необходимости анализа больших