Определение характерных точек на изображении

Determination of characteristic points in the image

Акименко Т.А.
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
e-mail: tantan72@mail.ru

Akimenko T.A.
Tula State University
e-mail: tantan72@mail.ru

Ларкин Е.В.
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
e-mail: elarkin@mail.ru

Larkin E.V.
Tula State University
e-mail: elarkin@mail.ru

Звонарев Д.А.
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
e-mail: zvonarev@cz71.ru

Zvonarev D.A.
Tula State University
e-mail: zvonarev@cz71.ru

Аннотация
Предложено применить метод согласованной (оптимальной) двумерной фильтрации для определения координат идентичных особых точек в задаче определения дальности, показано, что в качестве эталонного сигнала при фильтрации изображения с левой (правой) ТВ-камеры может быть использовано изображение с правой (левой) ТВ-камеры. Разработана методика поиска особых точек на левом и правом изображениях.
Ключевые слова: фильтрация, особые точки, передаточная функция, фильтр.

Abstract
It is proposed to apply the method of coordinated (optimal) two-dimensional filtering to determine the coordinates of identical singular points in the problem of determining the range, it is shown that as a reference signal when filtering the image from the left (right) TV camera, the image from the right (left) TV camera can be used. A technique has been developed for the search for singular points on the left and right images.
Keywords: filtering, singular points, transfer function, filter.

Одним из факторов, влияющих на точность определения расстояния до препятствия, является точность нахождения характерных точек на изображении. При этом требования, предъявляемые к особым точкам, – наличие неоднородности в сигнале, в частности, точки должны быть достаточно контрастными по отношению к другим точкам. Найденные неоднородности должны быть одинаковыми на изображениях, получаемых с левой и правой ТВ-камер. Характерные особенности сигналов заключаются в том, что в особых точках полезный сигнал модулирован отлично от модуляции сигнала фона, а, следовательно, задача сводится к поиску локальных участков сигнала со специфической модуляцией. Для решения задачи поиска участков с особой модуляцией применяется вейвлет-преобразование, которое позволяет выделять участки сигнала с заданным частотным спектром.

Поиск особых точек сводится к обнаружению в сигнале $b'(Y,Z)$ участка с известной функцией модуляции $u(Y,Z)$. Однако, в изображении, получаемом с ТВ-камеры, на сигнал $u(Y,Z)$ накладывается аддитивный шум $v(Y,Z)$. Таким образом, на обработку поступает сигнал вида

$$b'(Y,Z) = u(Y,Z) + v(Y,Z) \quad (1),$$

где $u(Y,Z)$ – детерминированная функция с известной формой, неизвестным коэффициентом масштаба и неизвестными координатами, определяющими ее положение в пространстве $YO''Z$; $v(Y,Z)$ – аддитивный белый шум, который дополняет изображение до $b'(Y,Z)$.

Любая обработка изображения сводится к его фильтрации, которая по соответствующей модели может быть выполнена или в виде свертки пространственно-сигнальной модели сигнала с импульсным откликом фильтра

$$B(Y,Z) = b'(Y,Z) * G(Y,Z) = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} b'(\tilde{Y},\tilde{Z})G[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})]d\tilde{Y}d\tilde{Z} \quad (2)$$

или в виде произведения спектральной плотности сигнала на пространственную передаточную функцию фильтра:

$$B(\omega_Y,\omega_Z) = b'(\omega_Y,\omega_Z)\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) \quad (3),$$

где $G(Y,Z)$ – импульсный отклик фильтра, обрабатывающего сигнал $b'(Y,Z)$; $G(\omega_Z,\omega_Z)$ – пространственная передаточная функция фильтра.

Рассмотрим модель обработки, основанную на пространственной передаточной функции фильтра:

$$\begin{gathered} b'(\omega_Y,\omega_Z)\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) = \Im[u(Y,Z)+v(Y,Z)]\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) = \\ = \Im[u(Y,Z)] + \Im[v(Y,Z)]\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) = \Im[u(Y,Z)]\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) + \Im[v(Y,Z)]\cdot G(\omega_Y,\omega_Z) = \\ = B_u(\omega_Y,\omega_Z) + B_v(\omega_Y,\omega_Z) \end{gathered} \quad (4),$$

где $B_u(\omega_Y,\omega_Z)$ – пространственная спектральная плотность полезной составляющей сигнала после фильтрации; $B_v(\omega_Y,\omega_Z)$ – пространственная спектральная плотность шума после фильтрации.

В общем случае и $B_u(\omega_Y,\omega_Z)$ и $B_v(\omega_Y,\omega_Z)$ имеют область ненулевых значений спектральной плотности, определяемую неравенствами $-\infty < \omega_Y < \infty$; $-\infty < \omega_Z < \infty$, поэтому в каждой точке пространства частот ω_Y, ω_Z часть величины $B(\omega_Y,\omega_Z)$ создается сигналом $B_u(\omega_Y,\omega_Z)$, а часть – сигналом $B_v(\omega_Y,\omega_Z)$. Сигнал $u(Y,Z)$ может быть смещен по осям Y и Z, на величины a_Y и a_Z, соответственно. В соответствии с теоремой о смещении

$$\Im[u(Y-a_Y, Z-a_Z)] = u(\omega_Y,\omega_Z)\cdot exp[-i[\omega_Y a_Y + \omega_Z a_Z]] \quad (5).$$

Таким образом, значение спектральной плотности функции зависит от величины смещения, которую необходимо определить. Текущая реализация шума является случайным процессом. Из этого следует, что из (4) зависимости с помощью фильтрации изображения в пространственно-частотной области невозможно определить смещение a_Y и a_Z функции $u(Y,Z)$ по осям Y и Z (одно из проявлений принципа неопределенности Гейзенберга). Таким образом, для локализации сигнала $u(Y-a_Y, Z-a_Z)$ должна быть использована другая модель, в качестве которой может быть использована фильтрация в сигнальной области вида (2).

Импульсный отклик фильтра $G(Y,Z)$ должен быть подобран таким образом, чтобы минимизировать ошибку

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{(Y_{max}-Y_{min})(Z_{max}-Z_{min})}\int\limits_{Z_{min}}^{Z_{max}}\int\limits_{Y_{min}}^{Y_{max}}[B(Y,Z)-u(Y,Z)]^2 dYdZ \qquad (6),$$

где $(Y_{max}-Y_{min}),(Z_{max}-Z_{min})$ – интервал наблюдения сигнала.

Очевидно, что зависимость (6) будет выполняться, если после фильтрации (2) в сигнале $B(Y,Z)$ будет обеспечиваться максимальное соотношение сигнал / шум.

Пусть фильтр с импульсным откликом $G(Y,Z)$ и сигнал $b'(Y,Z)$ определены на интервале $0 \le t \le \infty$. Если с помощью фильтра $G(Y,Z)$ обрабатывается белый шум $v(Y,Z)$, то мощность шума после обработки определяется зависимостью

$$N_\nu = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} G^2(Y,Z)dYdZ \qquad (7).$$

В результате обработки (1) в сигнальной области, полезный сигнал искажается, и отношение сигнал / шум, формируемое после обработки вейвлетом, определяется как

$$E = \frac{\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} u(\tilde{Y},\tilde{Z})G[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})]d\tilde{Y}d\tilde{Z}\right]^2}{\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} G^2(Y,Z)dYdZ} \qquad (8),$$

где $\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} u(\tilde{Y},\tilde{Z})G[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})]d\tilde{Y}d\tilde{Z}\right]^2$ – мощность полезного сигнала после обработки фильтром.

Применим к (8) неравенство Шварца-Буняковского, согласно которому $\left[\int\limits_{t_1}^{t_2}\xi(t)\zeta(t)dt\right]^2 \le \int\limits_{t_1}^{t_2}\xi^2(t)dt\int\limits_{t_1}^{t_2}\zeta^2(t)dt$, причем равенство имеет место тогда и только тогда, когда $\xi(t) = \kappa_\zeta\zeta(t)$ и κ_ζ есть некоторая постоянная величина, не зависящая от *t*. В результате получим:

$$\frac{\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} u(\tilde{Y},\tilde{Z})G[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})]d\tilde{Y}d\tilde{Z}\right]^2}{\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} G^2(Y,Z)dYdZ} \le \frac{\left[\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} u^2(\tilde{Y},\tilde{Z})d\tilde{Y}d\tilde{Z}\cdot\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} G^2[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})]d\tilde{Y}d\tilde{Z}\right]^2}{\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} G^2(Y,Z)dYdZ} \qquad (9).$$

В соответствии с неравенством Шварца-Буняковского (9) будет иметь максимальное значение, и нестрогое неравенство обращается в равенство, если

$$u(\tilde{Y},\tilde{Z}) = \kappa_G G[(Y-\tilde{Y}),(Z-\tilde{Z})] \qquad (10),$$

где κ_G – выравнивающий коэффициент.

Положим, что фильтр является несмещенным, и в (10) Y = 0, Z = 0. Тогда из (10) следует, что

$$u(\tilde{Y},\tilde{Z}) = \kappa_G G[(-\tilde{Y}),(-\tilde{Z})],$$

или

$$G^*(Y,Z) = \frac{1}{\kappa_G}u[(-Y),(-Z)] \qquad (11),$$

где $G^*(Y,Z)$ – согласованный фильтр, обеспечивающий оптимальное соотношение сигнал /

шум после обработки изображения.

Отметим, что требуемый пространственный импульсный отклик фильтра $G^*(Y,Z)$ имеет форму полезного сигнала, построенного в обратных координатах, -*Y*, -*Z*. Смещение фильтра в процессе вычисления интеграла свертки является переменной величиной, и поэтому можно утверждать, что максимального значения выходной сигнал $B(Y,Z)$ достигает, когда у фильтра $Y-a_Y=0, Z-a_Z=0$, т.е. пространственные координаты фильтра совпадают с пространственными координатами сигнала (рис. 1).

Применим к операции свертки (2) правило коммутативности и подставим в указанную зависимость вместо фильтра $G(Y,Z)$ его оптимальное значение (11), равное $\frac{1}{\kappa_G}u[(-Y),(-Z)]$.

После подстановки (2) принимает вид:

$$B^*(Y,Z)=\frac{1}{\kappa_G}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}b'\left[\left(Y-\tilde{Y}\right),\left(Z-\tilde{Z}\right)\right]u\left[\left(-\tilde{Y}\right),\left(-\tilde{Z}\right)\right]d\tilde{Y}d\tilde{Z} \quad (12).$$

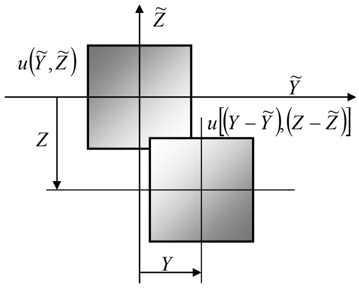

Рис. 1. К построению оптимального фильтра

Заменим в (12) $\tilde{Y}-Y=\hat{Y}$, $\tilde{Z}-Z=\hat{Z}$, откуда $d\tilde{Y}=d\hat{Y}$; $d\tilde{Z}=d\hat{Z}$. В этом случае (12) принимает вид:

$$B^*(Y,Z)=\frac{1}{\kappa_G}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}b'\left[\left(-\hat{Y}\right),\left(-\hat{Z}\right)\right]u\left[\left(-Y-\hat{Y}\right),\left(-Z-\hat{Z}\right)\right]d\hat{Y}d\hat{Z} \quad (13).$$

Очевидно, что значение интеграла не изменится, если в перемножаемых подынтегральных функциях изменить аргументы на их обратное значение, т.е.

$$B^*(Y,Z)=\frac{1}{\kappa_G}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}b'\left(\hat{Y},\hat{Z}\right)u\left[\left(Y+\hat{Y}\right),\left(Z+\hat{Z}\right)\right]d\hat{Y}d\hat{Z} \quad (14).$$

Зависимость (14) представляет собой корреляцию сигналов $b'\left(\hat{Y},\hat{Z}\right)$ и $u\left[\left(\hat{Y}\right),\left(\hat{Z}\right)\right]$. Корреляция достигает максимума, если $Y=0$, $Z=0$. Это свойство согласованного фильтра может быть использовано для поиска идентичных особых точек в задаче определения дальности.

Пусть в системе бинокулярного зрения обрабатывается левое изображение $b'_l\left(Y_l, Z_l\right)$, а форма сигнала берется с правого изображения $u_r\left(Y_r, Z_r\right)$. Тогда в качестве особой точки для определения дальности может использоваться центр полезного сигнала правого изображения $u_r\left(Y_r, Z_r\right)$. На левом изображении особая точка будет определяться по зависимости:

$$\left(Y_l^*, Z_l^*\right)=arg\,max\left\{\frac{1}{\kappa_G}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}b'_l\left(\hat{Y}_l,\hat{Z}_l\right)u_r\left[\left(Y_l+\hat{Y}_l\right),\left(Z_l+\hat{Z}_l\right)\right]d\hat{Y}_l d\hat{Z}_l\right\} \quad (15).$$

И, наоборот, если в системе бинокулярного зрения обрабатывается правое изображение $b'_r\left(Y_r, Z_r\right)$, а форма сигнала берется с левого изображения $u_l\left(Y_l, Z_l\right)$, то в качестве особой точки для определения дальности может использоваться центр полезного сигнала левого изображения $u_l\left(Y_l, Z_l\right)$, а на левом изображении особая точка будет определяться по зависимости:

$$\left(Y_r^*, Z_r^*\right) = arg\,max\left\{\frac{1}{\kappa_G}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} b'_r\left(\hat{Y}_r, \hat{Z}_r\right) u_l\left[\left(Y_r + \hat{Y}_r\right), \left(Z_r + \hat{Z}_r\right)\right] d\hat{Y}_r d\hat{Z}_r\right\} \quad (16).$$

Из приведенных выкладок следует методика для поиска идентичных точек на левом и правом изображениях.

Методика. Поиск особых точек на левом и правом изображениях.

1. Выделение на правом изображении области $Y_{r\,min} \le Y_r \le Y_{r\,max}$, $Z_{r\,min} \le Z_r \le Z_{r\,max}$ и нахождение центра области по зависимости:

$$Y_r^\circ = \frac{Y_{r\min} + Y_{r\max}}{2}; \quad (17).$$

$$Z_r^\circ = \frac{Z_{r\min} + Z_{r\max}}{2}$$

2. Определение части изображения сцены в указанной области как эталонного:

$$u_r\left(Y_r, Z_r\right) = \begin{cases} b'_r\left(Y_r, Z_r\right) \text{ при } Y_{r\,min} \le Y_r \le Y_{r\,max}, Z_{r\,min} \le Z_r \le Z_{r\,max}; \\ 0 \text{ во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (18).$$

3. Поиск центра $\left(Y_l^*, Z_l^*\right)$ образа, идентичного (18) на левом изображении по зависимости (15).

4. Определение границ образа, идентичного (18) на левом изображении по зависимости

$$Y_{l\,min} = Y_l^* - \frac{Y_{r\,max} - Y_{r\,min}}{2};$$

$$Y_{l\,max} = Y_l^* + \frac{Y_{r\,max} - Y_{r\,min}}{2}. \quad (19).$$

$$Z_{l\,min} = Z_l^* - \frac{Z_{r\,max} - Z_{r\,min}}{2};$$

$$Z_{l\,max} = Z_l^* + \frac{Z_{r\,max} - Z_{r\,min}}{2}$$

5. Определение части изображения сцены в области $Y_{l\,min} \le Y_l \le Y_{j\,max}$, $Z_{l\,min} \le Z_l \le Z_{l\,max}$ как эталонного:

$$u_l\left(Y_l, Z_l\right) = \begin{cases} b'_l\left(Y_l, Z_l\right) \text{ при } Y_{l\,min} \le Y_l \le Y_{l\,max}, Z_{l\,min} \le Z_l \le Z_{l\,max}; \\ 0 \text{ во всех остальных случаях.} \end{cases} \quad (20).$$

6. Поиск центра $\left(Y_r^*, Z_r^*\right)$ образа, идентичного (20) на правом изображении по зависимости (16).

7. Определение ошибки идентификации

$$\varepsilon_{Yr} = \left|Y_r^\circ - Y_r^*\right|; \ \varepsilon_{Zr} = \left|Z_r^\circ - Z_r^*\right| \quad (21).$$

Если ошибка хотя бы по одной координате, больше заданной, повторить поиск с другим исходным центром $\left(Y_r^\circ, Z_r^\circ\right)$.

8. Выдача информации: координаты особой точки на левом и правом изображении $\left(Y_r^\circ, Z_r^\circ\right)$, $\left(Y_l^*, Z_l^*\right)$.

Литература

1. *Абузова И.В., Игнатьев В.М., Ларкин Е.В.* Сканирующие системы с повышенным разрешением. – Тула: ТулГУ, 1996. – 88 с.
2. *Акаев А.А., Майоров С.А*. Оптические методы обработки информации. - М.: Высшая школа, 1988. - 432с.
3. *Андриянов А.В., Шпак И.И.* Цифровая обработка информации в измерительных приборах и системах. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 176 с.
4. *Ларкин Е.В., Первак И.Е*. Отображение графической информации. – Тула: ТулГУ, 2000. – 109 с.