

УДК 681.586.57

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

¹Кудаев А.Н., ¹Бондарев В.Г., ²Бобров В.Н.

¹ФГВКОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина Министерства обороны Российской Федерации», Воронеж, e-mail: major_75@list.ru;

²ФКОУ ВО «Воронежский институт ФСИН России», Воронеж, e-mail: vifsin@mail.ru

В статье проведен краткий анализ средств измерения параметров пространственного положения точечных объектов посредством системы технического зрения (СТЗ). Они совмещают в себе уникальную многофункциональность зрения человека и высокие метрологические характеристики технических измерительных систем. Улучшением возможностей СТЗ является совместное использование оптического и инфракрасного диапазонов спектра. При этом система может быть даже эффективней человеческого зрения в условиях недостаточной видимости и в темное время суток. Возникает вопрос о погрешностях СТЗ транспортных средств. В статье предложена математическая модель погрешностей СТЗ, учитывающая несовершенство установки фотокамер относительно друг друга, разнофокусность их объективов, а также дискретизации изображений. Показано, что некоторые виды погрешностей неизменны по мере удаления изображения особенной точки от оси симметрии вдоль вертикальной оси и растут по мере удаления к левой и правой границам фотоматрицы.

Ключевые слова: система технического зрения, цифровая фотокамера, фотообъектив, фотоматрица, погрешности измерений

MATHEMATICAL MODEL OF ERRORS OF ELECTRONIC VISION SYSTEM

¹Kudaev A.N., ¹Bondarev V.G., ²Bobrov V.N.

¹Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education «Military Educational and Scientific Center of the Air Forces N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, e-mail: major_75@list.ru;

²Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, e-mail: vifsin@mail.ru

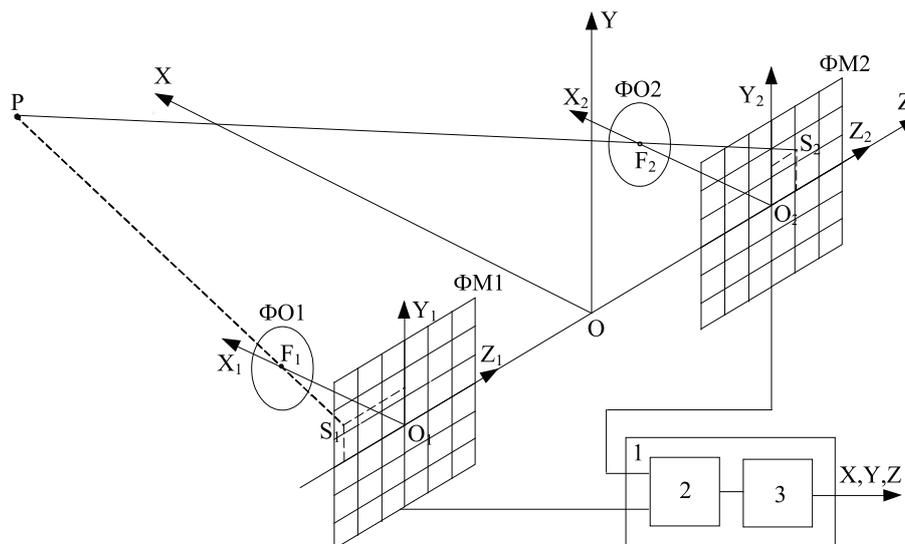
The article gives a brief analysis of the means of measurement parameters of the spatial position of point objects by vision system. They combine the unique versatility of the human and technical high metrological characteristics of measuring systems. Systems of technical sight is improved features combined optical and infrared ranges. The system can even be more effective than human vision in poor visibility conditions and at night. The question arises of errors systems of technical sight vehicles. In the article the mathematical model of systems of technical sight errors, taking into account the imperfection of the installation of cameras relative to each other, *raznofokusnost* their lenses, as well as sample images. It has been shown that certain types of errors are constant with distance from the image point of special symmetry axis along the vertical axis, and grows as the distance to the left and right borders of photomatrix.

Keywords: vision system, digital camera, camera lens, photo matrix, measurement error

Анализ информативных и метрологических возможностей датчиков информации современных систем активной безопасности транспортных средств показывает, что они не удовлетворяют требованиям обеспечения безопасности движения. Поэтому актуальна разработка таких датчиков, позволяющих создать многофункциональные системы, совмещающие в себе перечень технических характеристик [3] и экономическую целесообразность [2]. Такими качествами обладают системы технического зрения (СТЗ), совмещающие в себе многофункциональность зрения человека и высокие метрологические характеристики технических измерительных систем. Такая измерительная система представляет собой инструмент как для решения задач мониторинга местоположения, так и авто-

матического управления движением транспортных средств, в различных условиях их применения.

Однако СТЗ, широко используемые в промышленности, для контроля и управления технологическими процессами имеют улучшенные условия применения [5]. Объект контроля, как правило, хорошо освещен и расположен непосредственно перед объективами СТЗ, поэтому вопрос о точности измерений практически не возникал. Применяя СТЗ для обеспечения движения транспортных средств, приходится работать в условиях освещения, меняющегося в широких пределах, значительной скорости и удаленности объектов. Вопрос о погрешностях СТЗ транспортных средств становится чрезвычайно актуальным и требует значительных исследовательских усилий.



СТЗ с параллельными оптическими осями

СТЗ представляет собой оптико-электронную систему на основе нескольких разнесенных фотокамер, связанных с производительным вычислителем, который обеспечивает обработку изображений с целью нахождения особых точек. Такая система в общем случае «видит» объемно, поскольку декартовы координаты всех особых точек определяются с точностью недоступной для радиолокационных датчиков. Важным улучшением возможностей такой системы является совместное использование как оптического, так и инфракрасного диапазонов спектра. В этом случае система может быть даже эффективней человеческого зрения при плохой видимости вследствие факторов ухудшающих видимость. Система контроля за дорожной (воздушной, водной) ситуацией может быть использована для автоматизации управления транспортными средствами в целях повышения безопасности движения, а также снижения психофизической нагрузки на водителя.

На рисунке представлена СТЗ с двумя разнесенными цифровыми фотокамерами.

Здесь ΦM_1 , ΦM_2 – фоточувствительная матрица первой и второй фотокамеры; ΦO_1 , ΦO_2 – фотообъектив первой и второй фотокамеры; 1 – вычислитель; 2 – модуль программной обработки изображений; 3 – модуль вычисления координат точки P (x, y, z).

Цифровой вычислитель (1) обеспечивает программную обработку изображений объекта и вычисление координат объекта по координатам изображений точек S_1 и S_2 на фотоматрицах первой и второй фотока-

мер. Программная обработка изображения осуществляется с применением методов использующих оконтуривание изображения и дальнейшее выделение в нем точек излома или срединной точки контура [4].

Для идеальной СТЗ процесс определения координат точечного объекта заключается в расчете по формулам

$$X = F \left(\frac{B}{Z_2 - Z_1} + 1 \right), \quad (1)$$

$$Y = Y_1 \left(\frac{B}{Z_1 - Z_2} \right), \quad (2)$$

$$Z = B / 2 \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2}, \quad (3)$$

где $Y_1 = Y_2$, Z_1, Z_2 – координаты изображений точки на первой и второй фотоматрицах; X, Y, Z – координаты точечного объекта в системе OXYZ; $F_1 = F_2 = F$ – фокусное расстояние объективов фотокамер.

Математическая модель погрешностей СТЗ

Поскольку идеальную систему создать невозможно, возникает вопрос о связи погрешности измерений с технологическим несовершенством СТЗ. Рассмотрим процесс измерения координат объекта посредством двух разнесенных фотокамер, оптические оси которых незначительно отклонены от идеального положения в пространстве, в отличие от СТЗ с параллельными осями [1].

Соотношения, обеспечивающие измерения для СТЗ, имеющей малые линейные и угловые дефекты установки фотокамер, а также некоторое различие в фокусировке их объективов, имеют следующий вид

$$X = F + F \frac{FB + (r_z - \psi F)F + B(\Delta F + \nu Y_2 - \psi Z_2) + (\Delta F + r_x)Z_2}{F(Z_2 - Z_1 - \psi F + \gamma Y_2) - Z_1(\Delta F + \nu Y_2 - \psi Z_2)}, \quad (4)$$

$$Y = \nu F + r_y + \frac{(X - F)(\gamma Z_2 - \nu F - Y_2) + (\Delta F + r_x)Y_2}{F + \Delta F + \nu Y_2 - \psi Z_2}, \quad (5)$$

$$Z = \frac{2Z_1(F - X) - BF}{2F}, \quad (6)$$

где γ, ψ, ν – малые углы поворота правой фотокамеры относительно левой вокруг осей X, Y, Z ; r_x, r_y, r_z – координаты вектора смещения правой камеры от идеального положения с координатами $(0, 0, B/2)$, $\Delta F = F_2 - F_1$ – отклонение фокусного расстояния правой фотокамеры от фокусного расстояния левой.

Выражения для определения координат точечного объекта являются функциями координат изображений точки на фотоматрицах Y_1, Z_1 , и Y_2, Z_2 , а также величин, $\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F$. Разложим в ряд Маклорена [1] по переменным $\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F$, причем учтем члены не выше первого порядка малости.

$$X(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx X(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + \frac{\partial X}{\partial \gamma} \gamma + \frac{\partial X}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial X}{\partial \nu} \nu + \frac{\partial X}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial X}{\partial r_y} r_y + \frac{\partial X}{\partial r_z} r_z + \frac{\partial X}{\partial \Delta F} \Delta F, \quad (7)$$

$$Y(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx Y(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + \frac{\partial Y}{\partial \gamma} \gamma + \frac{\partial Y}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial Y}{\partial \nu} \nu + \frac{\partial Y}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial Y}{\partial r_y} r_y + \frac{\partial Y}{\partial r_z} r_z + \frac{\partial Y}{\partial \Delta F} \Delta F, \quad (8)$$

$$Z(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx Z(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0) + \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \gamma + \frac{\partial Z}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial Z}{\partial \nu} \nu + \frac{\partial Z}{\partial r_x} r_x + \frac{\partial Z}{\partial r_y} r_y + \frac{\partial Z}{\partial r_z} r_z + \frac{\partial Z}{\partial \Delta F} \Delta F. \quad (9)$$

Перепишем соотношения (7), (8), (9) в более компактной матричной форме

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + (W) (\gamma \ \psi \ \nu \ r_x \ r_y \ r_z \ \Delta F)^T, \quad (10)$$

где $X = X(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F)$, $Y = Y(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F)$, $Z = Z(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F)$ – измеряемые координаты точечного объекта; начальные значения координат для СТЗ без дефектов $X_0 = X(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $Y_0 = Y(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$, $Z_0 = Z(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$;

$$(W) = \begin{pmatrix} \frac{\partial X}{\partial \gamma} & \frac{\partial X}{\partial \psi} & \frac{\partial X}{\partial \nu} & \frac{\partial X}{\partial r_x} & \frac{\partial X}{\partial r_y} & \frac{\partial X}{\partial r_z} & \frac{\partial X}{\partial \Delta F} \\ \frac{\partial Y}{\partial \gamma} & \frac{\partial Y}{\partial \psi} & \frac{\partial Y}{\partial \nu} & \frac{\partial Y}{\partial r_x} & \frac{\partial Y}{\partial r_y} & \frac{\partial Y}{\partial r_z} & \frac{\partial Y}{\partial \Delta F} \\ \frac{\partial Z}{\partial \gamma} & \frac{\partial Z}{\partial \psi} & \frac{\partial Z}{\partial \nu} & \frac{\partial Z}{\partial r_x} & \frac{\partial Z}{\partial r_y} & \frac{\partial Z}{\partial r_z} & \frac{\partial Z}{\partial \Delta F} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

С учетом выражений, полученных для производных, запишем искомые разложения в ряд.

Первые слагаемые представляют собой координаты X_0, Y_0, Z_0 , измеренные идеальной СТЗ. Остальные слагаемые описывают влияние соответствующих дефектов на результат измерения координаты.

$$X(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx F \left(\frac{B}{Z_2 - Z_1} + 1 \right) - \frac{Y_2 F B}{(Z_2 - Z_1)^2} \gamma + \frac{F^2 (Z_1 - Z_2 + B) - B Z_2^2}{(Z_2 - Z_1)^2} \psi + \\ + \frac{B Y_2 Z_2}{(Z_2 - Z_1)^2} \nu + \frac{Z_2}{Z_2 - Z_1} r_x + \frac{F}{Z_2 - Z_1} r_z + \frac{Z_2 (Z_2 - Z_1 + B)}{(Z_2 - Z_1)^2} \Delta F, \quad (12)$$

$$Y(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx \frac{Y_1 B}{Z_1 - Z_2} + \left(\frac{Y_2^2 B}{(Z_2 - Z_1)^2} + \frac{B Z_2}{(Z_2 - Z_1)} \right) \gamma + \\ + \left(\frac{B Z_2^2 + F^2 (Z_2 - Z_1 - B)}{F (Z_2 - Z_1)^2} Y_2 - \frac{B Z_2 Y_2}{F (Z_2 - Z_1)} \right) \psi + \left(F - \frac{B Y_2^2 Z_2}{F (Z_2 - Z_1)^2} + \frac{B (Y_2^2 - F^2)}{F (Z_2 - Z_1)} \right) \nu + \\ + \frac{Z_1 Y_2}{F (Z_1 - Z_2)} r_x + r_y + \frac{Y_2}{Z_1 - Z_2} r_z + Y_2 \frac{Z_1 (Z_1 - Z_2) - B Z_1}{F (Z_2 - Z_1)^2} \Delta F, \quad (13)$$

$$Z(\gamma, \psi, \nu, r_x, r_y, r_z, \Delta F) \approx \frac{B (Z_1 + Z_2)}{2 (Z_1 - Z_2)} - \frac{Y_2 Z_1 B}{(Z_2 - Z_1)^2} \gamma - Z_1 \frac{B Z_2^2 + F^2 (Z_2 - Z_1 - B)}{F (Z_2 - Z_1)^2} \psi + \\ + \frac{B Y_2 Z_1 Z_2}{F (Z_2 - Z_1)^2} \nu + \frac{Z_1 Z_2}{F (Z_1 - Z_2)} r_x + \frac{Z_1}{Z_1 - Z_2} r_z + \frac{Z_1 Z_2 (Z_1 - Z_2 - B)}{F (Z_2 - Z_1)^2} \Delta F. \quad (14)$$

Выражения (12), (13), (14) могут быть использованы как для алгоритмической компенсации ошибок измерения, так и для исследования влияния дефектов изготовления СТЗ на ее точностные характеристики.

Погрешности СТЗ, обусловленные асинхронной фотоэкспозицией фотокамер

Пусть выполняется асинхронное фотоэкспонирование точечного объекта, а время между экспозициями левой и правой фотокамер обозначим Δt . При пространственном перемещении СТЗ за промежуток времени правая камера совершит следующее перемещение

$$\begin{pmatrix} \gamma & \psi & \nu \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{pmatrix}^T \cdot \Delta t, \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} r_x & r_y & r_z \end{pmatrix}^T = \begin{pmatrix} V_x & V_y & V_z \end{pmatrix}^T \cdot \Delta t. \quad (16)$$

Тогда к моменту фотоэкспозиции правой камеры вектор, характеризующий несовершенство СТЗ, будет равен

$$\begin{pmatrix} \gamma & \psi & \nu & r_x & r_y & r_z & \Delta F \end{pmatrix}^T = \\ = \begin{pmatrix} \gamma_0 + \omega_x \cdot \Delta t & \psi_0 + \omega_y \cdot \Delta t & \nu_0 + \omega_z \cdot \Delta t & r_{x0} + V_x \cdot \Delta t & r_{y0} + V_y \cdot \Delta t & r_{z0} + V_z \cdot \Delta t & \Delta F \end{pmatrix}^T, \quad (17)$$

а вектор измеренных координат будет равен

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + (W) \begin{pmatrix} \gamma_0 + \omega_x \cdot \Delta t \\ \psi_0 + \omega_y \cdot \Delta t \\ \nu_0 + \omega_z \cdot \Delta t \\ r_x + V_x \cdot \Delta t \\ r_y + V_y \cdot \Delta t \\ r_z + V_z \cdot \Delta t \\ \Delta F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + (W) \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \psi_0 \\ \nu_0 \\ r_{x0} \\ r_{y0} \\ r_{z0} \\ \Delta F \end{pmatrix} + (W) \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ V_x \\ V_y \\ V_z \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta t, \quad (18)$$

где второе слагаемое обусловлено статическим несовершенством установки правой камеры относительно левой, а третье слагаемое обусловлено асинхронизмом фотоэкспозиции фотокамер и проявляется при угловом и линейном движении СТЗ.

Погрешности СТЗ, обусловленные дискретностью фотоматрицы

Для получения соотношений, описывающих эти погрешности, воспользуемся выражениями координат без учета несовершенства установки фотокамеры, то есть $r_x = r_y = r_z = \psi = \gamma = \nu = D = 0$.

$$X = F \left(\frac{B}{Z_2 - Z_1} + 1 \right), \quad Y = Y_1 \frac{B}{Z_1 - Z_2}, \quad Z = B / 2 \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1 - Z_2}. \tag{19}$$

Получим выражения для полного дифференциала координат X, Y, Z

$$\Delta X = \frac{\partial X}{\partial Y_1} \Delta Y_1 + \frac{\partial X}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial X}{\partial Z_2} \Delta Z_2 = \frac{F \cdot B}{(Z_2 - Z_1)^2} (\Delta Z_1 - \Delta Z_2), \tag{20}$$

$$\Delta Y = \frac{\partial Y}{\partial Y_1} \Delta Y_1 + \frac{\partial Y}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial Y}{\partial Z_2} \Delta Z_2 = \frac{B}{Z_1 - Z_2} \Delta Y_1 + Y_1 \frac{B}{(Z_1 - Z_2)^2} (\Delta Z_2 - \Delta Z_1), \tag{21}$$

$$\Delta Z = \frac{\partial Z}{\partial Y_1} \Delta Y_1 + \frac{\partial Z}{\partial Z_1} \Delta Z_1 + \frac{\partial Z}{\partial Z_2} \Delta Z_2 = \frac{B}{(Z_1 - Z_2)^2} (Z_1 \Delta Z_2 - Z_2 \Delta Z_1). \tag{22}$$

Вычислим предел абсолютной допускаемой погрешности измерения координат X, Y, Z.

$$\Delta X^* = \frac{F \cdot B}{(Z_1 - Z_2)^2} \sqrt{(\Delta Z_1^*)^2 + (\Delta Z_2^*)^2}, \tag{23}$$

$$\Delta Y^* = \frac{B}{(Z_1 - Z_2)^2} \sqrt{(Z_1 - Z_2)^2 (\Delta Y_1^*)^2 + Y_1^2 (\Delta Z_1^*)^2 + Y_1^2 (\Delta Z_2^*)^2}, \tag{24}$$

$$\Delta Z^* = \frac{B}{(Z_1 - Z_2)^2} \sqrt{(Z_2 \cdot \Delta Z_1^*)^2 + (Z_1 \cdot \Delta Z_2^*)^2}, \tag{25}$$

где пределы абсолютных допускаемых погрешностей измерения координат ΔY_1^* , ΔZ_1^* , ΔZ_2^* .

Погрешности дискретизации измерения координат точечного объекта растут по квадратичному закону с увеличением дальности.

Погрешности СТЗ, обусловленные шумами фотоматриц

Оценка таких погрешностей должна производиться с учетом технологии обработки изображения. Рассмотрим подход к обработке изображений, основанный на нахождении центра «тяжести» области изображения.

Центр яркости изображения особой точки

Найдем границу изображения особой точки, причем в качестве порогового значения выберем величину близкую к половине наибольшего значения яркости $R_{\text{пор}} = 130$ ($\approx 255/2$). Пусть средняя часть изображения маяка удовлетворяет условию $R_{ij} \geq R_{\text{пор}}$ (где i и j – номера пикселей в строке и столбце соответственно для области K).

Координаты центра яркости изображения особой точки вычислим по формулам

$$X_o = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} \cdot r \cdot (j-1/2)}{r \cdot R} = \frac{\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} R_{ij} \cdot (j-1/2)}{R}, \tag{26}$$

$$Y_o = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} \cdot r \cdot (i-1/2)}{r \cdot R} = \frac{\sum_{j \in K} \sum_{i \in K} R_{ij} \cdot (i-1/2)}{R}, \tag{27}$$

где r – размер пиксела, R_{ij} – яркость красного пиксела в зависимости от номера строки (i) и столбца (j), K – область изображения, удовлетворяющая условию $R_{ij} \geq R_{\text{пор}}$, $R = \sum_{i,j \in K} R_{ij}$ – мощность излучения области K .

Оценка математического ожидания случайной величины вычисляется по формуле

$$\tilde{m}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \tag{28}$$

где n – объем выборки случайной величины.

Так как величина представляет собой сумму n независимых одинаково распределенных случайных величин ξ_i , а выборка измерений – совокупность реализаций этих случайных величин, то согласно центральной предельной теореме при достаточно большом n ее закон распределения близок к нормальному с математическим ожиданием m_x и среднеквадратическим отклонением σ_x .

$$\sigma_{\bar{m}_x} = \sqrt{\frac{D}{n}} = \frac{\sigma_{\xi}}{\sqrt{n}}, \quad (29)$$

где σ_{ξ} – среднеквадратическое отклонение генеральной совокупности.

Последнее соотношение показывает, что «групповая» обработка изображения, основанная на суммировании (26), (27), уменьшает влияние шумов фотоматрицы на результат определения координат особой точки.

Таким образом, СТЗ является хорошим измерительным средством на малой дистанции от измеряемого объекта.

Погрешности измерений, обусловленные дискретизацией изображения, растут пропорционально квадрату расстояния, поэтому для измерений на больших дистанциях необходима субпиксельная обработка изображений. Аналогичный по-

ложительный эффект дает «групповая» обработка изображения, основанная на определении центра яркости окрестности особой точки.

Математическая модель погрешностей СТЗ, обусловленных технологическим несовершенством установки фотокамер, позволяет не только оценивать погрешности на этапе конструирования СТЗ, но и реализовать алгоритмическую компенсацию ошибок.

Список литературы

1. Бондарев В.Г. Системы технического зрения транспортных средств: Монография. – Ставрополь: ГОУ ВПО «СТИС», 2010. – 180 с.
2. Гришин В.А. Системы технического зрения в решении задач управления беспилотными летательными аппаратами / В.А. Гришин // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С. 46–52.
3. Визильтер Ю.В. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах [Текст] / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов // Авиационно-космические приложения систем технического зрения. – Москва: ФГУП «ГосНИИАС», 2008. – С. 1–43.
4. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: курс лекций и практических занятий [Текст] / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
5. Якушников Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: учебник для ВУЗов [Текст] / Ю. Г. Якушников. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Лотос, 2012. – 568 с.