

УДК 004.94; 623.4.023.43

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛАЗЕРНОГО ТРИАНГУЛЯЦИОННОГО ДАЛЬНОМЕРА СО СТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОДСВЕТКОЙ И КАМЕРОЙ НИЗКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Штрунова Е.С., к.т.н., доцент кафедры радиотехнических систем Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, г. Рязань; e-mail: shtrunova.e.s@rsreu.ru

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A LASER TRIANGULATION RANGEFINDER WITH A STRUCTURED LIGHT AND A LOW-RESOLUTION CAMERA

Shtrunova E.S.

The problem of modifying the mathematical model of a laser triangulation rangefinder with a structured multi-beam dot laser light is considered. The model of the author, in contrast to the well-known one, which also provides sub-pixel accuracy in the forming of illumination centers of laser markers and takes into account the law of brightness distribution when projecting structured light rays onto an object at different angles, additionally allows taking into account the parameters of the camera optical system and the change in the angular dimensions of the markers observed by it with a change in range. It is shown that taking into account these parameters in the model, for example, even for a non-wide-angle camera with low (0.3 MP) resolution and angular dimensions of the field of view of about 40°×30°, it is possible to reduce the root-mean-square error of the image centers of illumination markers to 40 %, and the absolute error – up to 1.9 times.

Key words: triangulation laser rangefinder, structured multi-beam laser light, photogrammetry camera calibration, sub-pixel accuracy, distortion.

Ключевые слова: лазерный триангуляционный дальномер, структурированная многолучевая лазерная подсветка, фотограмметрическая калибровка камеры, субпиксельная точность, дисторсия.

Введение

Оценка формы и угловой ориентации трехмерных объектов с помощью систем стереозрения либо лазерных дальномеров является актуальной прикладной задачей бесконтактных измерений [1, 2]. Помимо задач неразрушающего контроля, подобные системы также находят применение в системах датчиков малой высоты летательных аппаратов с вертикальным взлётом [3, 4]. Поскольку важным этапом проектирования любых измерительных устройств является построение их имитационной модели, то применительно к лазерным триангуляционным дальномерам (ЛТД) актуальна задача разработки математической модели отражений лазерных лучей от объектов наблюдаемой сцены, принимаемых фоточувствительным элементом дальномера. В этом случае еще до этапа полунатурных либо натурных испытаний имеется возможность производить отладку алгоритмов обработки оптических сигналов с помощью имитаторов [5, 6].

Целью работы является усовершенствование ранее представленной в [7] математической модели ЛТД со структурированной подсветкой.

Известные технические решения

Детальность проработки имитационной модели оптико-электронной системы зависит от специфики решаемой задачи. Так, при измерении нижней границы облачности в [8] основное внимание уделяют зависимости осыпания мощности лазерных отражений вдоль трассы

Рассмотрена задача модификации математической модели лазерного триангуляционного дальномера со структурированной многолучевой точечной подсветкой. Модель автора, в отличие от известной, также обеспечивающей субпиксельную точность формирования центров свечения маркеров подсвета и учитывающей закон распределения яркости при проецировании лучей структурированного освещения на объект под различными углами, дополнительно позволяет учесть параметры оптической системы регистрирующей камеры и изменение угловых размеров наблюдаемых ею маркеров при изменении дальности. Показано, что учет данных параметров в модели, например, даже для камеры низкого разрешения (0,3 Мп) с угловыми размерами поля зрения около 40°×30°, позволяет снизить среднеквадратическую ошибку положения центров изображений маркеров подсвета до 40 %, а абсолютную ошибку – до 1,9 раза.

распространения и закону распределения интенсивности лазерного излучения. В работе [9], посвященной исследованию функциональных характеристик обзорно-поисковой информационно-измерительной системы, основное внимание уделяется модели её оптической системы, а именно – объектива переменного фокусного расстояния. Авторы [10], исследующие алгоритм совмещения двумерных изображений, полученных при последовательном сканировании внутренней поверхности помещений, ограничиваются математической моделью представления пиксельных координат.

Как справедливо отмечают авторы [6], в публикациях по тематике систем технического зрения с внешним источником структурированного освещения в большинстве случаев используют непосредственно полунатурные и натурные эксперименты, а не результаты компьютерного моделирования. В самой работе [6] моделирование отражений от лучей лазерного подсвета, фик-

сируемых матричным фотоприемным устройством (МФПУ) триангуляционного дальномера, основано на применении алгоритма Брезенхэма [11]. Положенное в основу такой модели техническое решение наряду с высокой скоростью имитации кадров имеет и явный недостаток: координаты центров маркеров подсвета на изображении с МФПУ являются исключительно целочисленными. При этом моделирование кадров при изменении дальности до объекта на величину $\Delta D < D\delta\phi$, где D – расстояние до объекта наблюдения, $\delta\phi$ – разрешающая способность МФПУ по углу, является частично корректным, поскольку пиксельные координаты центров изображений части точек подсвета при изменении дальности до объектов сцены в принципе не меняются.

Отмеченный недостаток [6] ранее был устранен в работе [7], в которой применение математической модели проективной камеры [12] позволило обеспечить субпиксельную точность формирования центров изображений маркеров подсвета на имитируемом кадре с МФПУ регистрирующей камеры ЛТД. В модель [7] также заложен закон косинусов Ламберта, что позволяет оценить общую интенсивность отражений от лучей лазерного подсвета и её пространственное распределение для каждого луча подсвета при изменении ракурса сканирования объекта интереса. В то же время при расчете интенсивности отражений в [7] не учитывается дальность до объекта измерений, а также не приводится сопоставления результатов моделирования и натурного либо полунатурного эксперимента для оценки степени соответствия сымитированных моделью изображений точек подсвета кадрам с реального МФПУ ЛТД.

Геометрическая постановка задачи

В качестве модели регистрирующей камеры ЛТД (рис. 1), как и в [7], принята модель проективной камеры, согласно которой пиксельные координаты изображения \mathbf{m}_i i -й опорной точки с пространственными координатами \mathbf{M}_i определяются формулой:

$$d_i \mathbf{m}_i = \mathbf{P} \mathbf{M}_i, \quad (1)$$

где \mathbf{P} – матрица проекции камеры, \mathbf{M}_i – пространственные однородные координаты подсвечиваемой лучом ЛТД точки $\mathbf{M}_i = [X_i, Y_i, Z_i, 1]^T$, а $\mathbf{m}_i = [m_{xi}, m_{yi}, 1]^T$ – соответствующие однородные пиксельные координаты центра отметки от неё на МФПУ. Направления строительных осей систем координат устройства лазерного подсвета и регистрирующей камеры ЛТД приведены на рис. 1.

Известно [12], что при априори известных внешних и внутренних параметрах камеры матрица проекции \mathbf{P} может быть вычислена по формуле:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} | \mathbf{t}], \quad (2)$$

где \mathbf{K} – матрица внутренних параметров, \mathbf{R} – матрица поворота системы координат камеры $O_k X_k Y_k Z_k$ относительно системы координат устройства лазерного подсвета $O_l X_l Y_l Z_l$, $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ – вектор параллельного переноса (трансляции), «|» – оператор аугментации, т.е. пристыковки столбца \mathbf{t} к матрице \mathbf{R} справа. При известном положении оптического центра камеры

$\mathbf{C} = [C_x, C_y, C_z]^T$ в системе координат устройства подсвета справедливо равенство $\mathbf{t} = -\mathbf{RC}$.

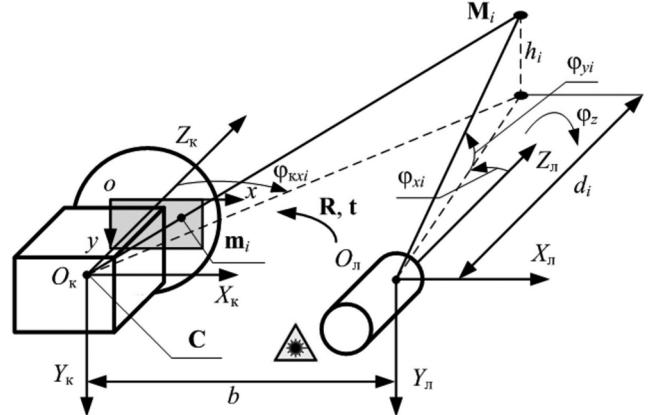


Рис. 1. Геометрическая постановка задачи моделирования

При разработке модели ЛТД по аналогии с [3] принимается гипотеза о том, что растр структурированной подсветки формируется с помощью установленной перед источником лазерного излучения дифракционной решетки [13], повернутой относительно оси $O_l Z_l$ на некоторый угол φ_z раstra.

Аналитические выражения для модели ЛТД

С учетом геометрической постановки задачи (рис. 1) получим аналитические выражения для пиксельных координат центров маркеров устройства многолучевого лазерного структурированного подсвета, растр которого состоит из $N_l = N_x \times N_y$ лучей и имеет угловые размеры по горизонтали и вертикали $\Delta\varphi_x \times \Delta\varphi_y$, где N_x, N_y – количество лучей раstra подсвета, причем N_x и N_y – нечетные натуральные числа. Определим направляющие векторы \mathbf{v}_{ij} , $i = 1, 2, \dots, N_x$, $j = 1, 2, \dots, N_y$, для лучей лазерного подсвета:

$$\mathbf{v}_{ij} = [v_{xij}, v_{yij}, v_{zij}]^T = \mathbf{R}_z(\varphi_{zi}) \mathbf{R}_x(\varphi_{xi}) \mathbf{R}_y(\varphi_{yi}) [0, 0, 1]^T, \quad (3)$$

и матрицы поворота вокруг соответствующих координатных осей на вектор углов Эйлера $[\varphi_{xi}, \varphi_{yi}, \varphi_{zi}]^T$:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_x(\varphi_{xi}) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{xi} & -\sin \varphi_{xi} \\ 0 & \sin \varphi_{xi} & \cos \varphi_{xi} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_y(\varphi_{yi}) &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_{yi} & 0 & \sin \varphi_{yi} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_{yi} & 0 & \cos \varphi_{yi} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{R}_z(\varphi_{zi}) &= \begin{bmatrix} \cos \varphi_{zi} & -\sin \varphi_{zi} & 0 \\ \sin \varphi_{zi} & \cos \varphi_{zi} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

При этом углы поворота лучей вокруг осей системы координат $O_l X_l Y_l Z_l$ устройства структурированного лазерного подсвета ЛТД:

$$\begin{aligned} \varphi_{xi} &= -0,5\Delta\varphi_x + (i-1)\Delta\varphi_x/(N_x-1), \\ \varphi_{yi} &= -0,5\Delta\varphi_y + (j-1)\Delta\varphi_y/(N_y-1). \end{aligned} \quad (4)$$

Если объектом интереса является, например, модель подстилающей поверхности, для которой выполнена триангуляция [14], то пространственные координаты её точек \mathbf{M}_{ij} , на которые проецируются лучи (3),

представляют собой точки пересечения проходящих через точку O_d с пространственными координатами $\mathbf{O}_d = [0, 0, 0]^T$ прямых (см. геометрическую постановку задачи на рис. 1) с направляющими векторами \mathbf{v}_{ij} с триангуляционными плоскостями. Для плоскости, заданной каноническим уравнением,

$$n_x x + n_y y + n_z z + d = [n_x, n_y, n_z, d][x, y, z, 1]^T = 0,$$

где $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]^T$ – вектор нормали к плоскости, искомые однородные пространственные координаты $\mathbf{M}_{ij} = [M_{xij}, M_{yij}, M_{zij}, 1]^T$ точек пересечения прямой и плоскости вычисляются по формуле

$$\mathbf{M}_{ij} = [D\mathbf{v}_{xij}, D\mathbf{v}_{yij}, D\mathbf{v}_{zij}, 1]^T, \quad (5)$$

где D – длина луча с направляющим вектором \mathbf{v}_{ij} от точки O_d до данной плоскости в направлении оси O_dZ_d :

$$D = -d/[\mathbf{n}^T \mathbf{v}_{ij}].$$

Выбор ближайшей к устройству подсвета ЛТД триангуляционной плоскости реализуется, например, с помощью метода трассировки лучей [15].

Подстановка пространственных координат \mathbf{M}_{ij} из (5) в (1) позволяет вычислить пиксельные координаты центра изображения маркера структурированной подсветки на МФПУ ЛТД с субпиксельной точностью. Полученные пиксельные координаты далее учитываются как математические ожидания μ_x и μ_y двумерного распределения интенсивности отражений от точки подсвета соответственно по координатам x и y в плоскости МФПУ. Для этого, как и в [7], вводится гипотеза о том, что двумерная функция плотности распределения яркости маркера при удалении от его центра в плоскости кадра определяется выражением:

$$f(D, k_d, x, y, \mu, \sigma, \rho) = \frac{I_0 k_d \cos \theta}{2\pi \sigma_x \sigma_y \sqrt{1-\rho^2}} \times \quad (6)$$

$$\times \exp \left\{ \frac{-1}{2\sqrt{1-\rho^2}} \left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x k(D)} \right)^2 - 2\rho \frac{x-\mu_x}{\sigma_x k(D)} \frac{y-\mu_y}{\sigma_y k(D)} + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y k(D)} \right)^2 \right] \right\},$$

где $\mu = [\mu_x, \mu_y]^T$ – вектор математических ожиданий, $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y]^T$ – вектор среднеквадратических отклонений яркости вдоль осей x и y системы координат МФПУ соответственно при дальности до объекта съёмки $D_1 = 1$ м, ρ – коэффициент корреляции между величинами x и y . Коэффициент $k(D)$ в (6) учитывает изменение углового размера маркера при изменении расстояния D от ЛТД до наблюдаемого объекта:

$$k(D) = D_1/D. \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо при принятии гипотезы об отсутствии угловой расходимости лазерного луча ЛТД, а также при линейных размерах маркера подсвета многое меньше D .

В (6) также учтено, что для модели диффузного отражения справедлив закон косинусов Ламберта [16], т.е. интенсивность отражения $I_{\text{отр}}$:

$$I_{\text{отр}} = I_0 k_d \cos \theta, \quad (8)$$

где I_0 – интенсивность падающего на объект излучения, k_d – коэффициент диффузного отражения, $0 < k_d \leq 1$, θ – угол между нормалью к поверхности \mathbf{n} и направлением \mathbf{v} падающего на объект излучения:

$$\cos \theta = \mathbf{v} \cdot \mathbf{n},$$

где $\cdot \cdot \cdot$ – оператор скалярного произведения векторов.

Аналитическое решение для моделирования отражений от ориентированной не строго перпендикулярно к направлениям падения лучей подсвета ЛТД поверхности в общем случае приводит к уравнениям конических сечений и поиску корней полиномов 4-й степени [17, 18]. В связи с этим для упрощения модели предлагается корректировать в (6) значения параметров σ_x , σ_y и ρ , определяющих соответственно скорость убывания яркости и угловую ориентацию изображения маркера подсвета. Для этого вводятся вспомогательные параметры:

$$\begin{aligned} t_x &= \text{sign}[\mathbf{n}(\mathbf{M})_x] [1 - \mathbf{n}(\mathbf{M})_x^2]^{0.5}, \\ t_y &= \text{sign}[\mathbf{n}(\mathbf{M})_y] [1 - \mathbf{n}(\mathbf{M})_y^2]^{0.5}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\text{sign}[\cdot]$ – функция знака, $\mathbf{n}(\mathbf{M})$ – нормаль к облучаемой устройством подсвета поверхности в точке с пространственными координатами \mathbf{M} , а скорректированные значения σ_x^* , σ_y^* и ρ^* определяются выражениями:

$$\rho = -|\cos \theta|,$$

$$\sigma_x^* = t_x \sigma_x, \sigma_y^* = t_y \sigma_y, \rho^* = \rho, \text{ если } t_x \neq 0 \text{ и } t_y \neq 0,$$

$$\sigma_x^* = 0, \sigma_y^* = \sigma_y, \rho^* = 0, \text{ если } t_x = 0 \text{ и } t_y \neq 0, \quad (10)$$

$$\sigma_x^* = \sigma_x, \sigma_y^* = 0, \rho^* = 0, \text{ если } t_x \neq 0 \text{ и } t_y = 0,$$

$$\sigma_x^* = \sigma_x, \sigma_y^* = \sigma_y, \rho^* = 0, \text{ если } t_x = 0 \text{ и } t_y = 0.$$

Для регистрирующей камеры ЛТД с широким полем зрения следует учитывать вносимые ее оптической системой искажения. Для общепринятой в литературных источниках по фотограмметрии ближней зоны [12] модели дисторсии Брауна – Конради [19] справедливы выражения:

$$\begin{aligned} m_{x_{\text{нд}}} &= m_{x_h} [1 + k_1 r_h^2 + k_2 r_h^4 + k_3 r_h^6] + \\ &+ [p_1(r_h^2 + 2m_{x_h}^2) + 2p_2 m_{x_h} m_{y_h}]; \\ m_{y_{\text{нд}}} &= m_{y_h} [1 + k_1 r_h^2 + k_2 r_h^4 + k_3 r_h^6] + \\ &+ [2p_1 m_{x_h} m_{y_h} + p_2(r_h^2 + 2m_{y_h}^2)]; \\ r_h &= (m_{x_h}^2 + m_{y_h}^2)^{1/2}, \mathbf{m}_h = [m_{x_h}, m_{y_h}, 1]^T = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{m}. \end{aligned} \quad (11)$$

В (11) приняты следующие обозначения: $\mathbf{k}_d = [k_1, k_2, k_3, p_1, p_2]^T$ – вектор коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии, в котором элементы k_t , $t = 1 \dots 3$, – коэффициенты радиальной дисторсии, а элементы p_t , $t = 1, 2$, – коэффициенты тангенциальной дисторсии, $(m_{x_{\text{нд}}}, m_{y_{\text{нд}}})$ и (m_{x_h}, m_{y_h}) – соответственно нормированные пиксельные координаты центров изображений маркеров лазерного подсвета для камеры с дисторсией и без, r_h – нормированное расстояние от пикселя до главной точки камеры ЛТД.

Однородные пиксельные координаты с учетом дисторсии:

$$\mathbf{m}_d = \mathbf{K}[m_{x_{\text{нд}}}, m_{y_{\text{нд}}}, 1]^T. \quad (12)$$

Таким образом, рассмотренная выше математическая модель ЛТД, в отличие от ранее известной модели [7], дополнительно учитывает:

– коэффициент изменения углового размера наблюдаемого маркера подсвета согласно (7) в зависимости от величины глубины D до него;

– дисторсию оптической системы регистрирующей камеры ЛТД согласно (11) и (12).

Алгоритм моделирования изображений регистрирующей камеры ЛТД со структурированной многолучевой точечной подсветкой

Алгоритм автора предполагает выполнение следующих действий:

- 1) задание начальных условий: аналитических выражений для наблюдаемых дальномером поверхности и объектов на ней, характеристик отражения от их участков, параметров устройства многолучевого лазерного структурированного подсвета, внешних и внутренних параметров регистрирующей камеры;

- 2) расчет направляющих векторов лучей подсвета \mathbf{v}_{ij} по (3);

- 3) поиск пространственных координат \mathbf{M}_{ij} точек пересечения лучей подсветы ЛТД с наблюдаемыми поверхностью и объектами;

- 4) вычисление пиксельных координат изображений маркеров подсвета \mathbf{m}_{ij} в системе координат МФПУ по (1);

- 5) учет дисторсии объектива камеры ЛТД по (11) и (12);

- 6) формирование изображений наблюдаемой сцены с точками подсвета по (6)–(10).

Результаты полнатурных экспериментов

Для исследования степени соответствия разработанной модели реальным данным был собран макетный образец ЛТД с многолучевым подсветом, состоящий из регистрирующей веб-камеры Defender C-2525HD (видеопоток – 640×480@30Гц) и лазерного прожектора непрерывного излучения на длине волны $\lambda = 630$ нм с дифракционной решёткой, обеспечивающей формирование лучей подсвета с угловым шагом $\Delta\varphi_x = \Delta\varphi_y = 6,55^\circ$, креном раstra φ_z растр = $18,17^\circ$ и блендой, обеспечивающей выделение только $N_{\text{л}} = 9$ центральных лучей после дифракционной решётки, т.е. $N_x = N_y = 3$. В качестве облучаемого объекта с диффузным характером отражений использовалось плоское полотно из плотной ткани. По результатам фотограмметрической калибровки регистрирующей камеры ЛТД с помощью тест-объекта типа «шахматное поле» (9×6 клеток размером 30×30 мм) согласно методике [20] в программном средстве [21] по 15-и снятым с различных ракурсов изображениям, а также взаимной калибровки камеры и устройства многолучевого подсвета согласно [22], были получены следующие внутренние и внешние параметры для макетного образца ЛТД:



a)



б)



в)

Рис. 2. Изображения маркеров ЛТД: а – с камеры Defender C-2525HD, б – согласно модели [7], в – согласно модели автора

– матрица внутренних параметров камеры,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 921,869 & 0 & 294,014 \\ 0 & 920,499 & 182,239 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

– угловые размеры поля зрения камеры: $38,26^\circ \times 29,13^\circ$;

– вектор углов для задания матрицы поворота \mathbf{R} поворота системы координат камеры $O_{\text{k}}X_{\text{k}}Y_{\text{k}}Z_{\text{k}}$ относительно системы координат устройства лазерного подсвета $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$: $\Phi_{\text{k}} = [\Phi_{\text{kx}}, \Phi_{\text{ky}}, \Phi_{\text{kz}}]^T = [2,3^\circ, 0,14^\circ, -0,21^\circ]^T$;

– пространственные координаты оптического центра камеры \mathbf{C} в системе координат $O_{\text{л}}X_{\text{л}}Y_{\text{л}}Z_{\text{л}}$ устройства лазерного подсвета ЛТД: $\mathbf{C} = [-208,3, -2,1, -34,9]^T$ (все размеры – в мм);

– вектор коэффициентов дисторсии оптической системы камеры для модели Брауна – Конради [19]: $\mathbf{k}_d = [0,1878, -0,6955, 0, 0, -0,012]^T$.

На рис. 2 для плоскости, ориентированной перпендикулярно центральному лучу устройства многолучевого структурированного подсвета ЛТД и расположенной на дальности 900 мм (контролировалась с помощью внешнего лазерного дальномера SNDWAY SW-S100 с паспортной погрешностью измерения в 2 мм), приведены соответственно кадр с регистрирующей камеры ЛТД, результат моделирования согласно модели [7] и результат моделирования согласно рассмотренному алгоритму. При моделировании были заданы следующие численные значения параметров для (6): $\sigma_x = \sigma_y = 4,5$, $k_d = 1$.

На рис. 3 дополнительно проиллюстрировано, как влияет учет параметров дисторсии на изменение положения центра тяжести симметризованных изображений с отражениями от маркеров для рассмотренного алгоритма (обозначены +) по сравнению с алгоритмом из работы [7] (обозначены ×) при сопоставлении с центрами маркеров с реальной камеры ЛТД (обозначены о). Учет дисторсии согласно (11) и (12) в данном эксперименте позволил уменьшить среднеквадратическую ошибку (СКО) определения положения центров изображений маркеров подсвета с $\sigma_{\text{ош1}} = 3,4$ пикселей до $\sigma_{\text{ош2}} = 2,43$ пикселей, т.е. в 1,4 раз, а максимальную абсолютную ошибку – с $\Delta_{\text{ош1}} = 4,27$ пикселей до $\Delta_{\text{ош2}} = 2,26$ пикселей, т.е. в 1,89 раз.

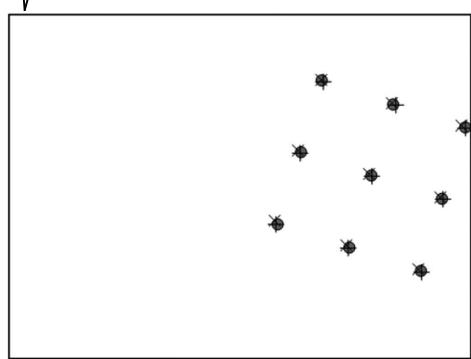


Рис. 3. Сопоставление центров изображений маркеров с рис. 2 (масштаб – 150 %)

Рис. 4 иллюстрирует учет коэффициента $k(D)$ при увеличении дальности до наблюдаемой плоскости в 2 раза: с $D = 900$ мм до $D = 1800$ мм. Из сравнения кадров с камеры ЛТД (рис. 2, а и 4, а) и его моделей (рис. 2, б и в и рис. 4, б и в) видно, что учёт параметра $k(D)$ в (6) позволяет добиться лучшего соответствия (рис. 2, в и рис. 6, в) зависимости пространственного распределения интенсивности отражений в плоскости МФПУ по сравнению с результатами моделирования согласно модели из работы [7] (рис. 2, б и рис. 6, б), в которой, как и в [6], с увеличением глубины D наблюдаемой сцены интенсивность отражений от маркеров подсвета не изменяется.

Разработанная модель также поддерживает режим имитации спекл-шума [23, 24] на изображениях маркеров (рис. 5) в соответствии с моделями из публикаций [25] и [26].

К недостаткам модели автора в её текущем состоянии следует отнести:

- отсутствие учета эффекта расхождения лучей

подсвета ЛТД: с увеличением дальности для полученных согласно предложенной модели изображений маркеров наблюдается занижение геометрических размеров их проекций на плоскость МФПУ по сравнению с полунатурным экспериментом (см. сопоставление рис. 4, а и рис. 4, в);

– отсутствие учета эффекта убывания мощности вдоль трассы распространения лазерного луча согласно закону Бугера-Ламберта-Бера [8, 13].

Заключение

В работе приведены аналитические выражения для математической модели ЛТД со структурированной многолучевой подсветкой, а также алгоритм для имитационного моделирования изображений маркеров подсвета. Разработанная модель обеспечивает субпиксельную точность формирования центров изображений маркеров подсвета и изменение их угловых размеров при изменении дальности, поддерживает диффузную модель отражения лазерных лучей, учитывает параметры дисторсии оптической системы регистрирующей камеры и спекл-шумы, характерные для лазерных отражений от не зеркальных поверхностей. В ходе полунатурного эксперимента показано, что для регистрирующей камеры низкого (0,3 Мп) разрешения с угловыми размерами поля зрения около $40^\circ \times 30^\circ$ достигается уменьшение среднеквадратической ошибки имитации положений центров изображений маркеров подсвета до 40 % относительно кадров с камеры реального ЛТД, а абсолютной ошибки до 1,9 раза по сравнению с ранее известной моделью [7].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN – 2020 – 0003).

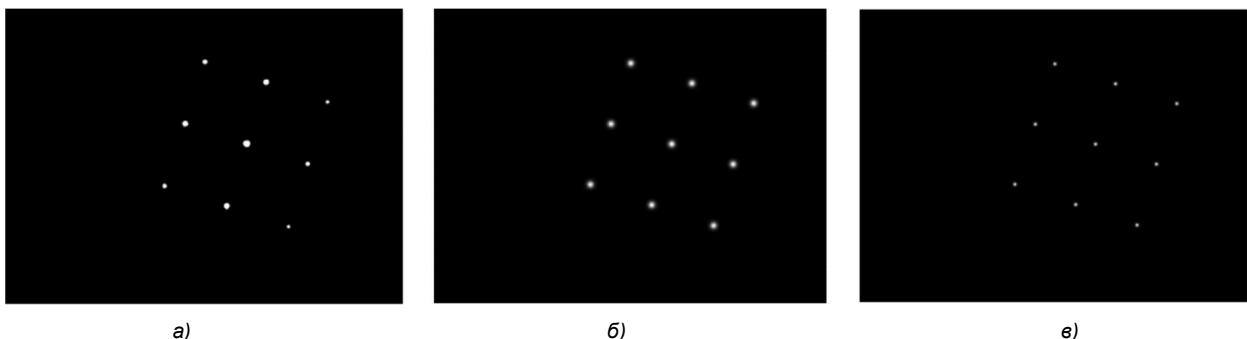


Рис. 4. Изображения маркеров на плоскости при $D = 1800$ мм:
а – с камеры Defender C-2525HD, б – согласно модели [7], в – согласно модели автора

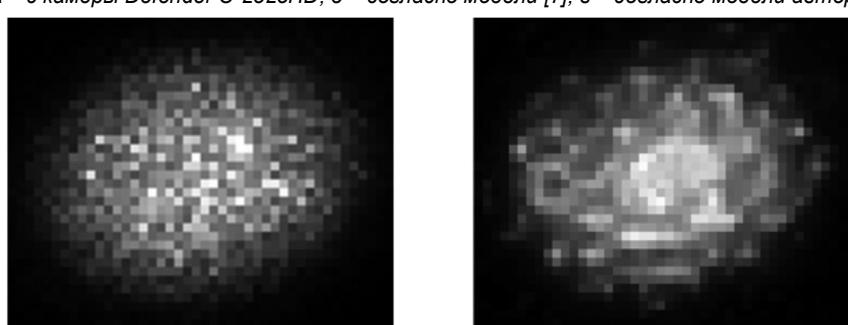


Рис. 5. Слева: имитация отражения лазерного луча со спекл-шумом;
справа: снимок отражения лазерного луча от зеркально-матовой металлической поверхности (масштаб изображений – 400 %)

Литература

1. Kalenjuk S, Lienhart W. Drive-by infrastructure monitoring: a workflow for rigorous deformation analysis of mobile laser scanning data. *Structural Health Monitoring*. 2024, vol. 23, no. 1. pp. 94-120.
2. Underlich T., Niemeier W., Wujanz D., Holst C., Neitzel F., Kuhlmann H. Areal deformation analysis from TLS point clouds – The challenge. *Allg. Vermess. Nachr.* 2016, vol. 123, pp. 340-351.
3. Баранчиков А.И., Муратов Е.Р., Никифоров М.Б., Устюков Д.И. Обнаружение точек лазерного подсвета стереосистемы на сложном фоне. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2018. Вып. 9. С. 10-19.
4. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения / под ред. Л.Н. Костяшкина и М.Б. Никифорова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. 234 с.
5. Ефимов А.И., Костяшкин Л.Н., Логинов А.А., Муратов Е.Р., Никифоров М.Б., Новиков А.И. Обработка изображений в многоспектральных системах технического зрения. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2017. № 60. С. 83-92.
6. Аллатов Б.А., Бабаян П.В., Евтеев И.Е. Моделирование работы системы технического зрения со структурированным освещением. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2020. № 71. С. 128-136.
7. Гуменюк А.А., Маринина И.А., Штрунова Е.С. Разработка модели лазерного триангуляционного дальномера со структурированной подсветкой. *Труды МАИ*. 2023. № 130. С. 1-19.
8. Андреев В.Г., Жирков Е.А. Методы анализа световых отражений при лазерном зондировании атмосферы. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2023. № 85. С. 14-22.
9. Горячева В.А. Оптический канал обзорно-поисковой информационно-измерительной системы. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2023. № 86. С. 38-44.
10. Косарев О.В., Дементьева Е.Г., Катунцов Е.В., Лунтовская Я.А., Кателевский Д.А. Алгоритм совмещения двумерных изображений методами контурного анализа. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2023. № 86. С. 38-44.
11. Bresenham J.E. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*. 1965, vol. 4, no. 1. pp. 25-30.
12. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision: 2nd edition. Cambridge: Cambridge university press, 2003. 656 p.
13. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие: 7-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2017. 852 с.
14. Андреев В.Г., Юкин С.А. Формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности по цифровой топографической карте. *Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета*. 2007. № 21. С. 25-30.
15. Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 608 с.
16. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение (Ленинград. отд-ние), 1977. 600 с.
17. Berry E.M. The reflection of light from a sphere. *Journal of the Optical Society of America*. 1929, vol. 7, pp. 679-682.
18. Glaeser G. Reflections on spheres and cylinders of revolution. *Journal for Geometry and Graphics*. 1999, vol. 3, no. 2, pp. 121-139.
19. Brown D.C. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*. 1971, vol. 37, no. 8. pp. 855-866.
20. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000, vol. 22, no. 11. pp. 1330-1334.
21. Camera Calibration Tools [Электронный ресурс]. – URL: <http://www0.cs.ucl.ac.uk/staff/Dan.Stoyanov/calib/download.html> (дата обращения 08.02.2024).
22. Патент РФ № 2788666, МПК G06T 7/80 (2017.01). Способ взаимной калибровки видеокамеры и устройства веерного лазерного подсвета / И.С. Холопов; заявл. 22.11.2021; опубл. 24.01.2023. Бюл. № 3.
23. Павлов В.А., Белов А.А., Волченко С.В., Раич А.В. Применение обученных на оптических изображениях свёрточных нейронных сетей для обнаружения объектов на радиолокационных изображениях. *Компьютерная оптика*. 2024. Т. 48, № 2. С. 253-259.
24. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных изображений от восходящего и нисходящего витков орбиты на основе нечеткой логики. Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 10-15.
25. Gascon F., Salazar F. Simulation of rough surfaces and analysis of roughness by MATLAB. *MATLAB – An ubiquitous tool for the practical engineer*: ed. M. Ionescu. Rijeka: InTech, 2011, pp. 391-420.
26. Amir Y.M., Thörnberg B. High precision laser scanning of metallic surfaces. *International Journal of Optics*. Vol. 2017. Article ID 4134205, pp. 1-13.