

УДК 514.88

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Зубарь Алексей Владимирович¹,
alexey_zubar@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{2,1},
apple_27@mail.ru

Кайков Кирилл Владимирович¹,
kirkaykov@mail.ru

¹ Омский автобронетанковый инженерный институт,
Россия, 644098, г. Омск, ул. 14 военный городок, 119.

² Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

Актуальность исследования обусловлена назревшей необходимостью разработки модели оценки точности определения пространственного положения объектов, а также отслеживания положения и движения их границ системой технического зрения, которая в составе автоматизированных комплексов может применяться при проведении различных геодезических работ, для маркшейдерского обеспечения подземного строительства, 3D-реконструкции ландшафта поверхности земли, картографировании местности, при выполнении работ в горной промышленности, а также обслуживании крупногабаритных и протяжённых объектов. Особенно актуально применение систем технического зрения, позволяющих осуществлять пространственные измерения, в тех случаях, когда традиционные лазерные средства не обеспечивают высокую эффективность, например, из-за высокой степени рассеивания или наоборот поглощения лазерного излучения поверхностью наблюдаемого объекта или его малыми угловыми размерами.

Цель: оценить геометрию измерительного пространства и определить закономерности распределения погрешности измерений в её границах.

Постановка задачи: разработка имитационной модели, обеспечивающей с учётом технических данных камер, их взаимных положения и ориентации, а также влияния на измерительный процесс случайных составляющих, возникающих как в процессе сборки системы, так и при её эксплуатации, реконструкция формы и размеров измерительного пространства, а также визуализация распределения погрешностей измерения координат объектов.

Методы: метод математического моделирования.

Новизна разработанной модели характеризуется тем, что в ней впервые была реализована возможность оценивания распределения ошибок определения координат системой технического зрения по всей глубине её измерительного пространства. При моделировании нет ограничений по взаимному положению камер и обязательной их однотипности. В модели впервые учитываются случайные погрешности, связанные как с определением взаимной ориентации положения камер, так и с неточностями при их изготовлении, а также возможностями применённой методики калибровки системы.

Результат. Приведены результаты анализа известных из уровня науки и техники моделей оценки погрешности определения трёхмерных координат объектов системой технического зрения, показаны их недостатки. Раскрыта сущность и основные этапы преобразований при разработке модели оценки погрешностей определения координат объектов и их распределения по измерительному пространству системой технического зрения.

Выводы. Модель на основе множества внешних и внутренних параметров камер, а также с учётом ожидаемых случайных погрешностей при сборке и настройке измерительной системы позволяет оценивать погрешность определения координат объектов и геометрию измерительного пространства. Представленная модель позволяет оценивать точность определения пространственных координат объектов, положения и движения их границ при применении систем технического зрения в составе геодезических автоматизированных измерительных комплексов. Кроме этого, применение данной модели даёт возможность оптимизировать процесс формулирования технических требований к видео- или фотокамерам и их взаимному положению в процессе проведения измерений.

Ключевые слова:

Моделирование, оценка точности, определение координат, система технического зрения, измерительная система.

Введение

Применение систем технического зрения (СТЗ) представляет значительный интерес при решении геодезических задач, например, при 3D-реконструкции ландшафта поверхности земли [1, 2], обслуживании крупногабаритных [3–5] либо протяжённых объектов [6, 7], картографировании местности [8], а также для маркшейдерского обеспечения подземного строительства и при выполнении различных работ в горной промышленности. Определяется это тем, что СТЗ, работа которых основывается на интеллектуальной об-

работке цифровых изображений высокого разрешения, позволяют в реальном времени определять координаты, положение границ и параметры движения одновременно нескольких объектов, что приводит к значительному увеличению скорости и производительности с одновременным уменьшением погрешности проведения работ. Кроме этого, применение измерительных автоматизированных систем, таких как СТЗ, позволяет оптимизировать процесс в целом, гарантированно снизить себестоимость и увеличить качество при выполнении различных работ в горной

промышленности, строительстве и реконструкции гидроэлектростанций, метро, тоннелей, бункеров и других подземных объектов [1, 3].

Для определения пространственных параметров объектов на основе компьютерной обработки их цифровых изображений и в условиях отсутствия информации о размерах наблюдаемых объектов необходимо минимум две разнесённые в пространстве цифровые видеокamеры. В связи с этим все существующие модели оценки точности СТЗ основаны на описании функциональной зависимости между точностью позиционирования наблюдаемого объекта от его удаления именно для двухкамерной СТЗ. Но даже при описании двухкамерной измерительной системы разработка её математической модели точности является достаточно сложной задачей. Определяется это тем, что величины погрешностей, с которыми могут быть определены координаты, а соответственно и прочие пространственные параметры наблюдаемых объектов, будут зависеть не только от расстояния до них, но и от внутренних технических данных камер, геометрии и точности их взаимного расположения, а также от локального положения объекта внутри измерительного пространства системы.

Для упрощения данной задачи, традиционно идя по пути разработки именно аналитической модели, авторы в рамках частных задач своих исследований прибегали к ряду упрощений по числу учитываемых факторов и допущений по ограничению из взаимного пространственного положения и ориентации, применяемых в составе СТЗ камер. Об этом свидетельствует анализ [9] существующих моделей [10–12], показавший, что они имеют ряд ограничений по количеству исходных данных для моделирования, а также не позволяют осуществлять моделирование при произвольно расположенных относительно друг друга и разных по техническим параметрам камерах. Большинство существующих моделей не дают возможность полностью оценивать форму, размеры и распределение погрешности измерений в границах измерительного пространства. Только в исследованиях [13, 14] авторами приведены соотношения, которые в совокупности дают возможность проведения моделирования размеров и формы измерительного пространства двухкамерной СТЗ. Вместе с этим данная модель не обеспечивает возможности изучения неравномерностей распределения погрешностей измерений в границах измерительного пространства СТЗ, построенной на основе произвольно сориентированных друг относительно друга цифровых видеокamер.

Общим недостатком всех существующих моделей оценки точности СТЗ является невозможность проведения оценки величины влияния на качество измерений случайных погрешностей, возникающих в процессе производства объективов, фотоматриц, на этапе сборки камер и их повседневной эксплуатации, а также в процессе взаимного позиционирования камер при работе измерительной системы.

Учитывая всё вышесказанное, разработка математической модели СТЗ, позволяющей оценивать степень влияния на результат проведения измерений

случайных погрешностей внешних и внутренних параметров измерительной системы, а также моделировать форму измерительного пространства, определять его размеры и анализировать характеристики распределения погрешностей в условиях применения различных и произвольно расположенных видеокamер на сегодняшний день, является актуальной задачей.

Применение такой модели позволит оптимизировать процесс формулирования технических требований к видео- или фотокамерам и их взаимному положению в процессе проведения измерений и в целом на этапе проектирования станет мощным вспомогательным инструментом для инженера-проектировщика СТЗ.

Построение модели оценки точности системы технического зрения

Особенностью СТЗ определения координат объектов является дискретная пиксельная структура фотоматриц. В результате каждая пара соответствующих пикселей на фотоматрицах применяемых камер пересекается своими полями зрения в пространстве, образуя элементарную область разрешения в виде многоугольника. Совокупность пересечений полей зрения всех пикселей фотоматриц будет образовывать измерительное пространство системы. При этом ставится задача вычисления размеров данных областей по всему объёму измерительного пространства при применении для проведения измерений по крайней мере двух камер. Если рассматривать данную задачу в плоскости, то измерительное пространство для двухкамерной СТЗ будет иметь вид, представленный на рис. 1. Из чертежа видно, что каждый из четырёхугольников определяет границы элементарной области разрешения СТЗ, внутри которой перемещение объекта регистрироваться измерительной системой не будет. Так, например, при нахождении в измерительном пространстве девяти точечных объектов $P_1...P_9$ на фотоматрицах камер K_1 и K_2 как отдельные объекты будут зарегистрированы только семь из них.

На плоскости границы w -й элементарной области разрешения будут характеризоваться четырёхугольником с вершинами A_w, B_w, C_w, D_w . Если за размеры w -ой элементарной области, характеризующей погрешность измерений в некоторой точке P_w , принять величины ΔX_w и ΔZ_w (рис. 1), то их значения могут быть вычислены при определении координат точек A_w, B_w, C_w, D_w относительно некоторой внешней системы координат (СК) $O_w X_w Y_w Z_w$.

Если разрешение фотоприёмных устройств (ФПУ) мало, поля зрения камер достаточно широки, а дальность до точки P_w сопоставима с расстоянием между камерами, области разрешения на плоскости будут представлять собой четырёхугольники, по форме близкие к ромбу (рис. 1). На практике же проведение измерений будет осуществляться в условиях применения камер высокого разрешения по объектам, находящимся от измерительной системы на удалении, многократно превышающем величину базы между камерами. В таких условиях элементарные области разрешения, сжимаясь в поперечном сечении, приобретают строго вытянутую форму. Учитывая данное

обстоятельство, для определения размеров областей разрешения более рационально пользоваться не проекциями ΔX_w , ΔZ_w и ΔY_w на оси СК $O_w X_w Y_w Z_w$, а величинам расстояний между максимально удалёнными друг от друга границами w -й области разрешения, определяющими её длину ΔW_w . На чертеже (рис. 1) такому расстоянию будет соответствовать величина, представляющая собой длину отрезка $A_w C_w$ w -й элементарной области $A_w B_w C_w D_w$. В результате ΔW_w для w -й элементарной области измерительного трёхмерного пространства с учётом ΔY_w может быть вычислено согласно выражению:

$$\Delta W_w = \sqrt{\Delta X_w^2 + \Delta Y_w^2 + \Delta Z_w^2}.$$

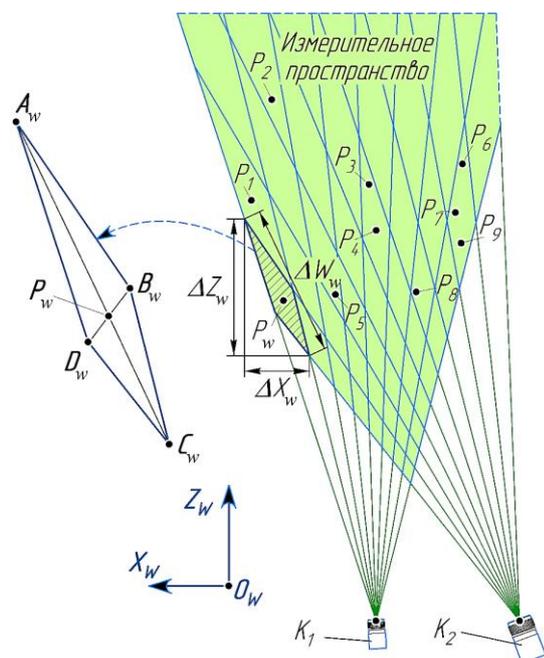


Рис. 1. Схема формирования элементарных областей разрешения и нахождения их размеров в границах измерительного пространства СТЗ

Fig. 1. Scheme of formation of elementary areas of resolution and finding their sizes within the measurement space of the computer vision system (CVS)

В этом случае величина абсолютной погрешности $\Delta \sigma_w$ определения координат в окрестностях каждой из точек P_w может быть найдена как половина угловой величины поля зрения одного пикселя ФПУ в соответствии с выражением

$$\Delta \sigma_w = \pm 0,5 \Delta W_w.$$

Значение $\Delta \sigma_w$ в каждой w -й области пространства будет определяться не только геометрией взаимного размещения камер и внутренними параметрами СТЗ, но и величинами случайных погрешностей, возникающих, например, при проведении внешней и внутренней калибровки [15–18] камер, в том числе и при изготовлении измерительной системы. В результате воздействия данных факторов границы элементарных областей разрешения будут при каждом i -м измерении ($i \in 0 \dots I$, I – количество измерений) случайным

образом отклоняться от расчётного значения. Иллюстрация такого отклонения приведена на рис. 2, где показано пересечение полей зрения (ПЗ) отдельных пикселей ФПУ камер K_1 и K_2 на точечном объекте P_w , а также случайные положения границ области разрешения.

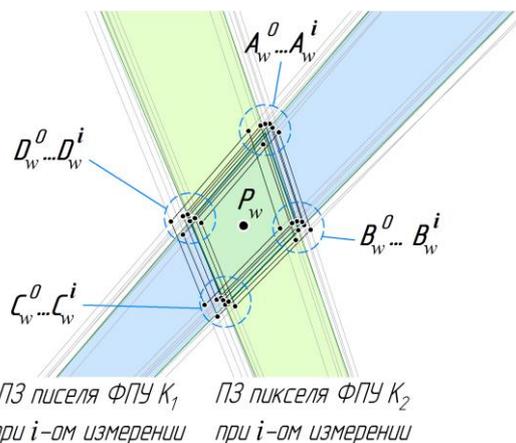


Рис. 2. Воздействие случайных погрешностей на положение границ элементарной области разрешения

Fig. 2. Effect of random errors on the position of the boundaries of the elementary resolution domain

В этом случае величина погрешности $\Delta \sigma'_w$ определения координат точечного объекта P_w СТЗ с учётом влияния на процесс измерений случайных факторов будет определяться как

$$\Delta \sigma'_w = \pm 0,5 \frac{\sum_{i=0}^{i=I-1} \Delta W_w^i}{I-1}.$$

В трёхмерном же пространстве элементарная разрешающая область будет представлять собой восьмиугольник, форма и размеры которого будут зависеть как от взаимного положения камер, так и от формы пикселей их ФПУ. Порядок вычисления местоположения границ w -й элементарной области для искомой точки P_w основывается на применении расширенной проекционной модели цифровой видеокамеры [19], которая, в отличие от классической модели камеры [20, 21], включает большее количество исходных данных и соответственно позволяет более гибко осуществлять процесс моделирования.

Расширенная проекционная модель камеры устанавливает связь трёхмерных координат объекта P во внешней СК W непосредственно с пиксельной СК изображения Img_j^K , т. е. с номерами строк m_j^P и столбцов n_j^P (рис. 3). Так, для некоторой j -й камеры данная модель (без учёта дисторсионных искажений) описывается следующим выражением [19]:

$$P_w (C_j^w)^{-1} (B_j)^{-1} (K_j)^{-1} = P_j^{Img},$$

где $P_w = (x_w^P \ y_w^P \ z_w^P \ 1)$ – вектор трёхмерных координат объекта в СК W ; $C_j^w = \begin{pmatrix} R_j^w & | & [0 \ 0 \ 0]^T \\ \hline T_j^w & | & 1 \end{pmatrix}$ –

матрица переноса, содержащая информацию о пространственном положении и ориентации СК j -й камеры в некоторой внешней СК W ; R_j^W – матрица поворота, определяющая ориентацию осей СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$ j -й камеры относительно осей СК W ; $T_j^W = (x_j^W \ y_j^W \ z_j^W)$ – вектор переноса с координатами начала СК $O_j^K X_j^K Y_j^K Z_j^K$ j -й камеры относительно начала внешней СК W ;

$$B_j = \begin{pmatrix} b_j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{– проекционная матрица;}$$

$b_j = \frac{z_j^P}{f_j}$ – проекционный коэффициент; z_j^P – координата объекта относительно оси $O_j^K Z_j^K$ СК камеры; f_j – фокусное расстояние объектива камеры;

$K_j =$

$$= \begin{pmatrix} -p_j^x & 0 & 0 & 0 \\ -\text{ctg}\theta_j p_j^y & -p_j^y & 0 & 0 \\ 0,5p_j^x(N_j - 1) & 0,5p_j^y(M_j - 1) & f_j & 0 \\ O_j^x + \text{ctg}\theta_j \left[\begin{matrix} 0,5p_j^x \times \\ \times(M_j - 1) + \\ +\Delta O_j^y \end{matrix} \right] & O_j^y & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

– матрица внутренних параметров; N_j, M_j – значения горизонтальных и вертикальных разрешений ФПУ; O_j^x, O_j^y – величины расстояний между центром фото-матрицы и геометрическим центром изображения Img_j^K , формируемым в плоскости ФПУ объективом камеры; p_j^x, p_j^y – физические размеры пикселя ФПУ соответствующей камеры; θ_j – величина угла переко-

са изображений Img_j^K , возникающего, как правило, из-за погрешностей изготовления ФПУ, а также при неточной синхронизации процесса пиксельной выборки в процессе формирования изображения; $P_j^{img} = (n_j^P \ m_j^P \ 1 \ 1)$ – расширенный вектор пиксельных координат изображения объекта P на цифровом изображении Img_j^K j -й камеры.

Таким образом, если в трёхмерном пространстве задать множество объектов с координатами x_w^P, y_w^P и z_w^P и описать их положение массивом P_w размерами $[4 \times w]$

$$P_w = \begin{pmatrix} x_1^P & y_1^P & z_1^P & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_w^P & y_w^P & z_w^P & 1 \end{pmatrix},$$

то для каждого из данных объектов с применением модели камеры может быть найден массив P_j^{img} с пиксельными координатами n_w^P и m_w^P соответствующих w -х объектов в плоскости изображения Img_j^K j -й камеры

$$P_j^{img} = \begin{pmatrix} n_1^P & m_1^P & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_w^P & m_w^P & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Для СТЗ, состоящей из двух камер K_1 и K_2 , аналогичным образом будут найдены два массива P_1^{img} и P_2^{img} .

Положение обеих камер в пространстве сгенерированных точек в любой момент времени может быть изменено, это означает, что в разное время разные точки могут выпадать из измерительного пространства СТЗ.

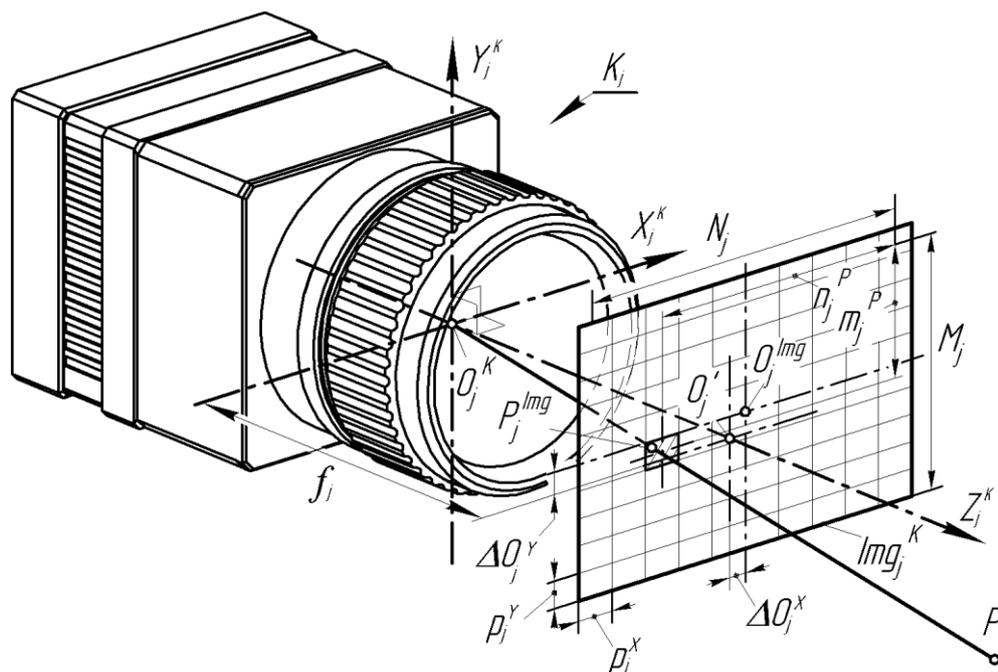


Рис. 3. Система «изображение–камера»

Fig. 3. «Image–camera» system

Если из массивов P_1^{Img} и P_2^{Img} по отдельности удалить все строки с координатами, не удовлетворяющими требованию $(N_j-1) \geq n_w^P \geq 0$ и $(M-1) \geq m_w^P \geq 0$, то будут получены массивы P_1^{Img} и P_2^{Img} , содержащие исключительно координаты только тех объектов, которые в данный момент попадают в поле зрения каждой из камер (рис. 4, а). Синхронное же сопоставление строк массивов P_1^{Img} и P_2^{Img} с пиксельным размерами изображений Img_1^K и Img_2^K позволит найти и

использовать в дальнейших расчётах два массива P_1^{Img} и P_2^{Img} , содержащие координаты только тех объектов, которые одновременно попадают в поля зрения камер K_1 и K_2 , т. е. находятся в измерительном пространстве моделируемой СТЗ (рис. 4, б).

На следующем этапе решалась задача определения трёхмерных координат пересечения полей зрения пикселей ФПУ камер K_1 и K_2 в точке P_w .

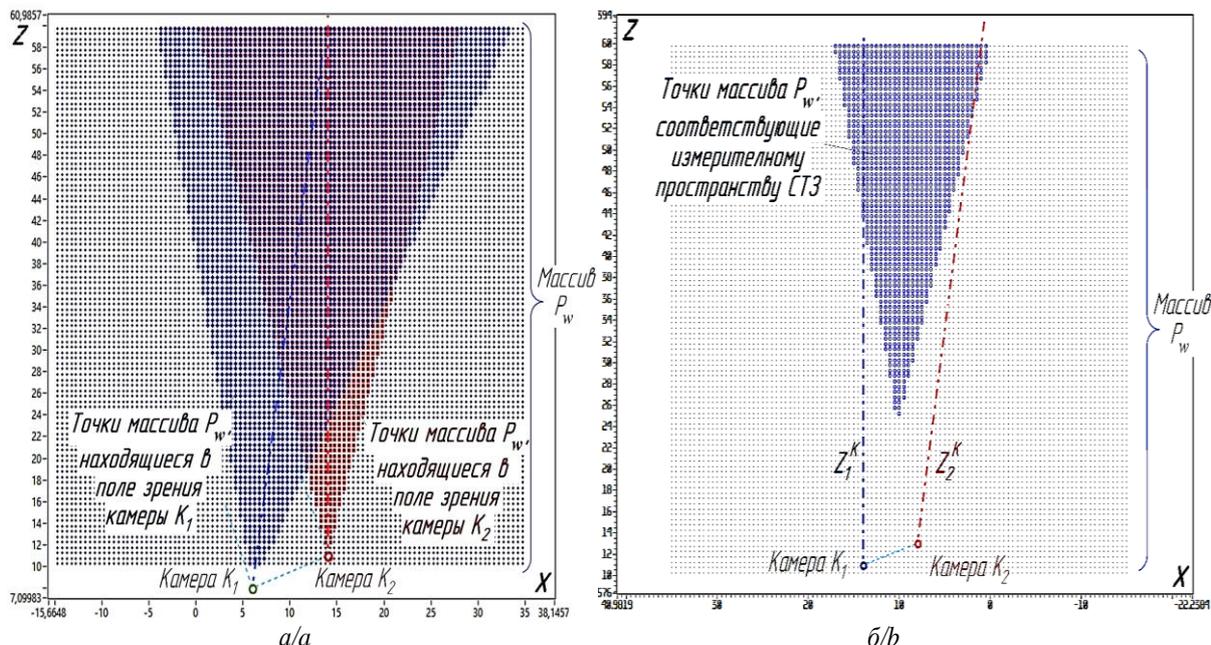


Рис. 4. Определение объектов, попавших в поля зрения камер и измерительное пространство СТЗ в одной плоскости
 Fig. 4. Definition of the objects which got to fields of vision of cameras and measuring space of a CVS in one plane

Так как строки массивов P_1^{Img} и P_2^{Img} содержат пиксельные координаты изображений w -х объектов, то физические границы пикселя A , B , C и D (рис. 5), определяющие границы их полей зрения, будут отличаться от соответствующих номеров столбцов n_w^P и строк m_w^P на величину $\pm 0,5$ размера. При каждой из строк массивов P_1^{Img} и P_2^{Img} обоих изображений записывались четыре отдельных вектора с координатами границ пикселя, на который проецируется изображение w -го объекта, а именно:

$$\begin{aligned} (P_j^A)_w &= (n_w^P - 0,5 \quad m_w^P + 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^A \quad m_w^A \quad 1 \quad 1); \\ (P_j^B)_w &= (n_w^P + 0,5 \quad m_w^P + 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^B \quad m_w^B \quad 1 \quad 1); \\ (P_j^C)_w &= (n_w^P + 0,5 \quad m_w^P - 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^C \quad m_w^C \quad 1 \quad 1); \\ (P_j^D)_w &= (n_w^P - 0,5 \quad m_w^P - 0,5 \quad 1 \quad 1) = (n_w^D \quad m_w^D \quad 1 \quad 1). \end{aligned}$$

Принималось, что в результате пересечения в окрестностях w -го объекта полей зрения двух пикселей камер K_1 и K_2 будут получены точки CC , DC , CD , DD , BB , BA , AB , AA (рис. 5), определяющие границы данной w -й элементарной области разрешения, уже непосредственно внутри которой и будет находиться исследуемый объект P_w .

Для вычисления пространственных координат границ области разрешения был использован способ

определения координат [22], основанный на применении математической модели измерительной системы [19]. Если обозначить границы области разрешения g -м индексом от 0 до 8, то математически данный способ в условиях принятых обозначений будет описываться следующим выражением:

$$(P_w^g)_w = (A_g^N)_1 B_1 (C_1^N)^{-1} C_1^w,$$

где g – индекс вычисляемой точки;

$$(A_g^N)_1 = A_1^g C_1^N = (x_1^g \quad y_1^g \quad z_1^g \quad 1)$$

– вектор нормированных координат изображения g -й точки относительно СК камеры K_1 ;

$$B_1 = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

– проекционная матрица для камеры K_1 ;

$$b_1 = \frac{(A_g^N)_2 \left| (C_2^W)^{T(4)} - (C_1^W)^{T(4)} \right|}{(A_g^N)_1^{(1)} (A_g^N)_2^{(3)} - (A_g^N)_2^{(1)} (A_g^N)_1^{(3)}}$$

– проекционный коэффициент для камеры K_1 ;

$$C_1^N = \left(\begin{array}{c|ccc} R_1^N & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)^T$$

– матрица ориентации СК камеры K_1 относительно СК измерительной системы;

$$(P_w^g)_w = \begin{pmatrix} [x_w^g]_w & [y_w^g]_w & [z_w^g]_w & 1 \end{pmatrix}$$

– вектор с координатами g -й границы области разрешения в СК W .

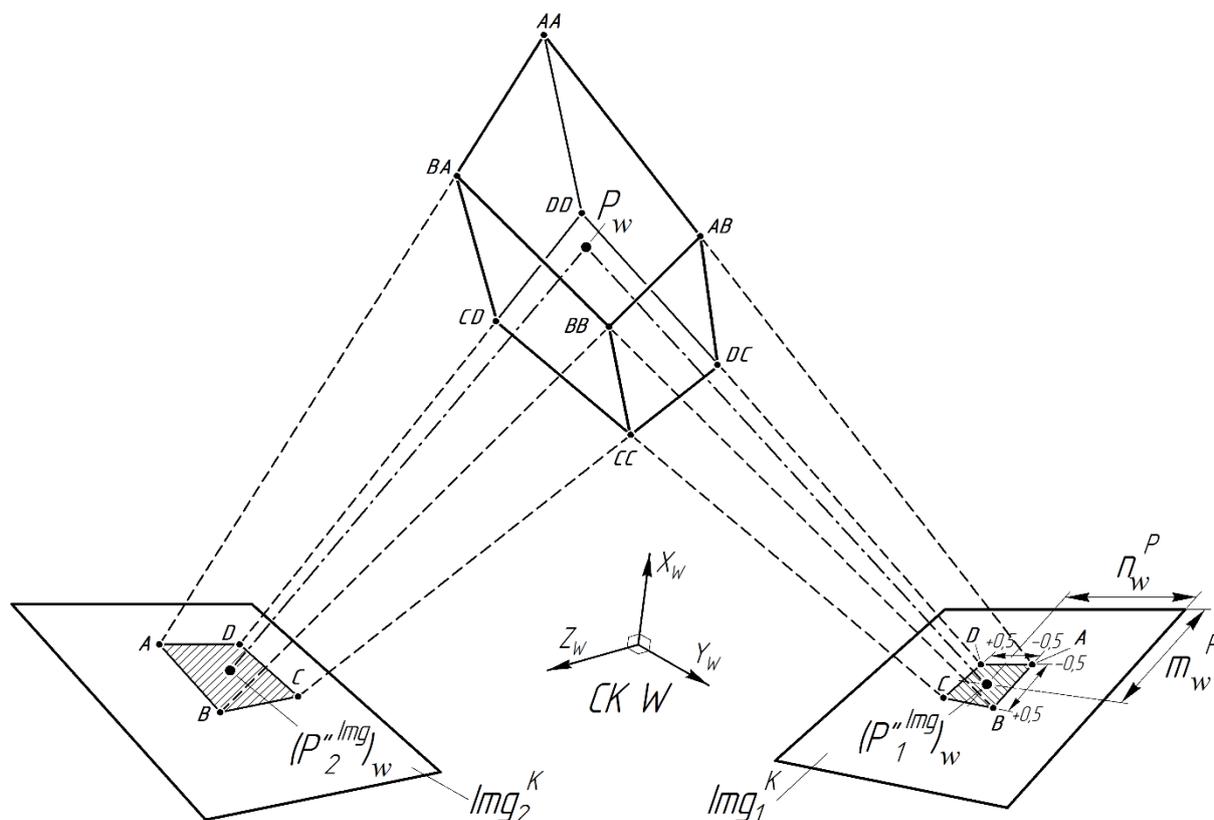


Рис. 5. Схема определения границ области разрешения в трёхмерном пространстве
 Fig. 5. Scheme of delimitation of permission area in three-dimensional space

На данном этапе проводилось введение случайных составляющих, а именно:

- $\Delta\alpha_j^W, \Delta\beta_j^W, \Delta\phi_j^W$ – погрешности в горизонтальной, вертикальной и поперечной плоскостях ориентации СК камеры j -й камеры в СК W ;
- $\Delta x_j^W, \Delta y_j^W, \Delta z_j^W$ – погрешности определения положения начала СК камеры K_1 в СК W ;
- Δf_j – погрешности величины фокусного расстояния объектива j -й камеры;
- $\Delta O_j^X, \Delta O_j^Y$ – горизонтальные и вертикальные расстояния между физическим центром изображения Img_j^K и геометрическим центром ФПУ j -й камеры (координаты главной точки);
- $\Delta\theta_j$ – величина случайной составляющей перекоса изображения Img_j^K j -й камеры.

Величины погрешностей учитывались путём суммирования соответствующих внешних и внутренних параметров камер со случайными значениями, сгенерированными ЭВМ в рамках заданных отклонений по закону распределения Релея i раз. При этом на каждой i -й итерации осуществлялось вычисление величин ΔW_w^i , для чего координаты векторов $(P_w^g)_w^i$ преобразовывались из СК W в СК, начало которой находилось строго в соответствующей w -ой точке. В ре-

зультате чего вычислялись векторы P_g^w , модули которых, в свою очередь, характеризовали длины отрезков L_g^w , соединяющих центр w -й области разрешения со всеми её g -ми границами согласно выражению

$$|P_g^w| = \sqrt{(x_g^w)^2 + (y_g^w)^2 + (z_g^w)^2} = L_g^w.$$

По двум наиболее длинным значениям L_g^w для каждой w -й области разрешения вычислялись величины ΔW_w и находились соответствующие значения абсолютных погрешностей $\Delta\sigma_w$ измерений, по которым далее формировался массив для графического представления измерительного пространства СТЗ и распределения погрешности измерений в его границах.

Исследования построенной модели оценки точности системы технического зрения

Реализация разработанной модели была осуществлена в среде графического программирования LabVIEW [23].

Адекватность модели осуществлялась на экспериментальной установке (рис. 6), включающей лазерный тахеометр Spectra Precision 2, применяемый в качестве эталонного средства с погрешностями измерения дальности ± 2 мм и угла на объект $3''$ [24], захват-

ное устройство с цифровыми видеокамерами с фото-матрицами IMX179 [25] фирмы SONY разрешением 3280×2464 (8 Мр) с размером пикселя 1,4 мкм, объек-

тивами с фокусными расстояниями 4 и 8 мм, а также ЭВМ, обеспечивающую захват изображений и их программную обработку.

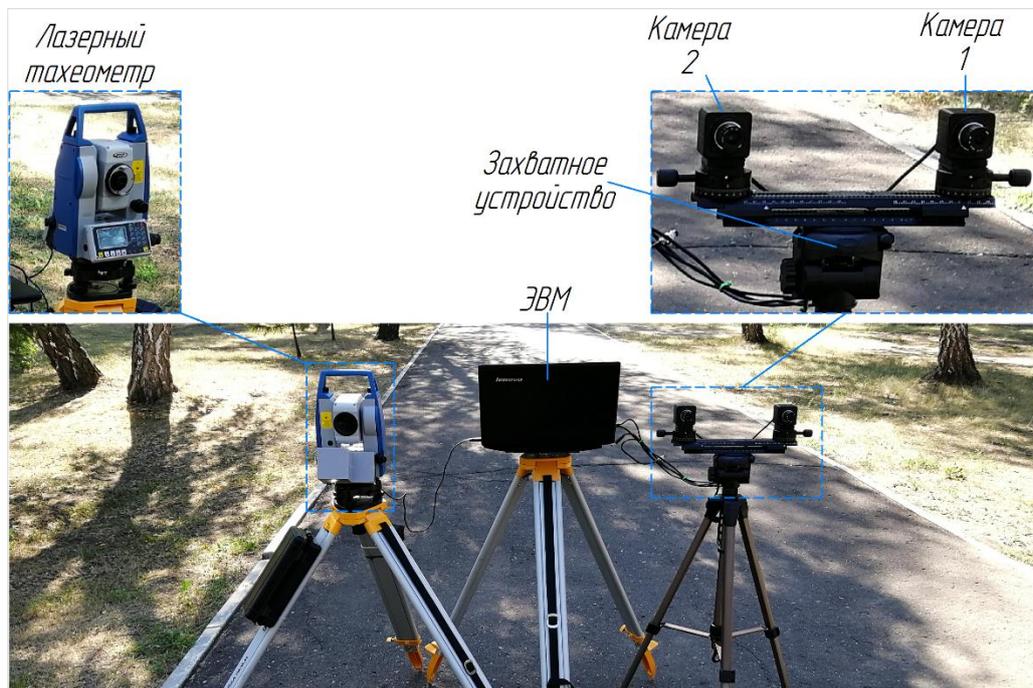


Рис. 6. Внешний вид установки для проведения экспериментальных исследований
 Fig. 6. Appearance of the device for experimental research

Исходя из технических параметров экспериментальной установки размеры экспериментальной площадки, в пределах которой с интервалом 1–1,5 м перемещалась контрольная мишень, имитирующая объект интереса, составляли 45×85 м. Для удобства обработки результатов измерений по F-критерию Фишера полученные значения координат преобразовывались в значения дальности. Результаты проведения экспериментальных исследований представлены на рис. 7, где показаны упорядоченные по возрастанию значения дальностей до контрольной мишени, соответствующие им величины погрешностей, найденные как разности между показаниями лазерного тахео-

метра и СТЗ, а также смоделированные согласно разработанной модели и условиям эксперимента границы погрешности.

Из представленной зависимости (рис. 7) видно, что практические и теоретические результаты имеют хорошую сходимость, что также подтвердилось F-критерием Фишера. Это означает, что разработанная модель является адекватной и может применяться для оценки погрешностей определения координат множества объектов, положения и контроля перемещения их границ СТЗ с применением разных по техническим данным и произвольно сориентированных цифровых видеокамер.

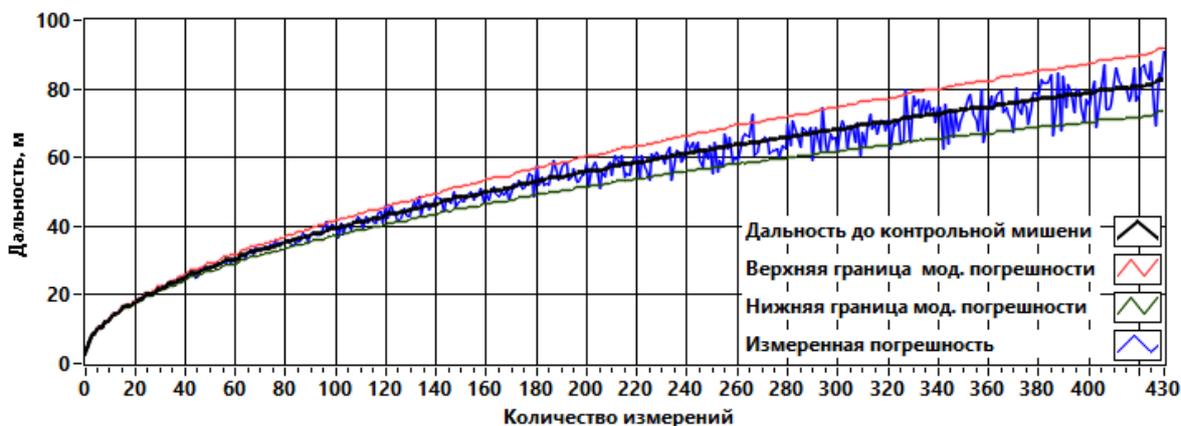


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований

Fig. 7. Experimental results

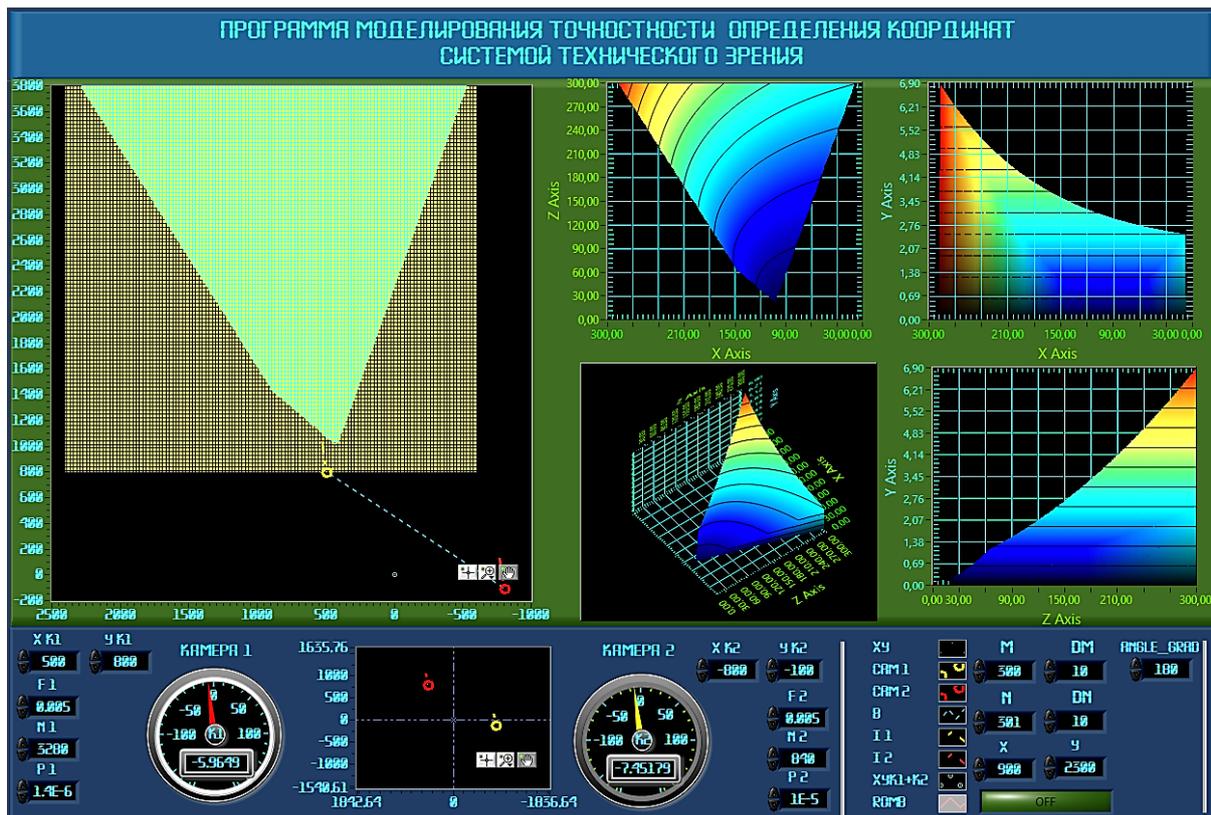


Рис. 8. Интерфейс программы для ЭВМ и результаты моделирования
 Fig. 8. Computer program interface and modeling results

Интерфейс разработанной программы с результатами моделирования представлен на рис. 8, где можно видеть смоделированный массив точек P_w с выделенными точками измерительного пространства (левое окно), анализ которого позволяет оценивать форму и размеры измерительного пространства на определенном срезе по оси $O_w Z_w$ СК W при проведении измерений двухкамерной СТЗ. В правом окне представлено распределение погрешности измерений по измерительному пространству в трёхмерном виде и в виде проекций на соответствующие оси СК W .

При моделировании величины погрешностей принимались исходя из возможностей существующих методик проведения внешней и внутренней калибровки камер [15–18]. В частности, погрешности ориентации камер составляли $2,5 \pm 0,01$ миллирадиан, погрешности положения камер – $0,5 \pm 0,01$ мм, погрешности определения фокусного расстояния – $0,05 \pm 0,001$ мм, погрешности определения координат главной точки – $0,003 \pm 0,0001$ мм. В связи с тем, что проводилось моделирование статической сцены, возможный перекося изображений не учитывался. Проведённое моделирование для измерительной системы с базовым расстоянием 300 мм и фокусным расстоянием объективов камер 150 мм показало, что при применении датчиков угла, обеспечивающих погрешность не более $45''$, погрешность определения координат объектов на дистанции 1 км составляет не более $\pm 3,5$ м. При увеличении базового расстояния, фокусного расстояния объективов и с применением фотоматриц с меньшим значением размера пикселя по-

грешность определения координат СТЗ может быть значительно снижена. Так, например, увеличение базового и фокусного расстояний объективов, соответственно, до 1000 и 180 мм обеспечит максимальную погрешность измерений $\pm 4,7$ м, но уже на дистанции 2,5 км, и менее ± 1 м – на дистанции 1 км. Это с учётом возможности проведения одновременных замеров по множеству разнесённых на обширной территории объектов, в том числе «сложных» для лазерных дальномеров, позволяет применять такую СТЗ в составе роботизированных измерительных комплексов, решающих широкий спектр измерительных задач, в том числе для маркшейдерского обеспечения подземного строительства и при выполнении различных работ в горной промышленности.

Выводы

1. Разработана имитационная многофакторная модель оценки точности определения пространственных координат объектов по их цифровым изображениям.
2. Модель позволяет оценивать геометрию измерительного пространства системы технического зрения и закономерности распределения погрешностей измерений в её границах как с учётом технических параметров камер и их пространственной взаимной конфигурации, так и с учётом точностных показателей изготовления, сборки и настройки камер.
3. Представленная модель может использоваться для проведения оценки погрешности существующих и

новых систем технического зрения, выполняющих одновременное автоматизированное определение взаимного положения, координат и форм множества разнесённых в пространстве объектов, особенно в условиях, когда применение лазерных измерительных систем ограничено в связи с небольшими угловыми размерами и/или малыми эффективными поверхностями рассеивания инте-

ресующих объектов. Применением таких СТЗ в составе роботизированных измерительных комплексов позволит эффективно осуществлять выполнение широкого спектра измерительных задач для маркшейдерского обеспечения подземного строительства, при выполнении различных работ в горной промышленности и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петроченко А.В. Мультипроекционные системы обработки последовательности изображений для формирования геопространственной информации о подстилающей поверхности // Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. Робототехнические комплексы на основе БЛА. – М.: Радиотехника, 2016. – С. 644–660.
2. Гришин В.А. Оценка статистических характеристик изображений местности с точки зрения их пригодности для 3D реконструкции // Искусственный интеллект в технических системах: Сб. научн. тр. Вып. 24. – М.: Гос. ИФТП, 2004. – С. 63–74.
3. Петроченко А.В. Исследование и разработка оптико-электронной системы контроля деформаций протяжённых объектов сложной формы методом последовательной привязки координат: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2017. – 19 с.
4. Konyakhin I.A., Vasilev A.S., Petrochenko A.V. Electrooptic converter for measuring linear shifts of the section boards at the main dish of the radiotelescope // Studies in Systems, Decision and Control. – 2016. – V. 49. – P. 269–277.
5. Konyakhin I.A., Stepashkin I.S., Petrochenko A.V. System of the optic-electronic sensors for control position of the radio telescope elements // Proceedings of SPIE. – 2016. – V. 9899. – P. 989934.
6. Konyakhin I.A., Petrochenko A.V., Tolochek N.S. Optic-electronic systems for measurement a position of radio-telescope components // Proceedings of SPIE. – 2015. – V. 9446. – P. 94460M.
7. Konyakhin I.A., Petrochenko A.V., Tolochek N.S. Optic-electronic system for deformation of radio-telescope counter-reflector computer modeling // Proceedings of SPIE. – 2014. – V. 9131. – P. 91311O.
8. A vision system to reconstruct natural deep-sea scenes in 3D / A.G. Allais, V. Brandou, S. Dentrecolas, J.P. Gilliotte, M. Iris Perrier // Proceedings of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference. – Lisbon, Portugal, 1–6 July 2007. – P. 111–118.
9. Зубарь А.В., Кайков К.В., Ушнурцев С.В. Оценка распределения оценок точности определения координат по измерительному пространству системы технического зрения // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Техническое зрение и распознавание образов»: Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. – Анапа: ВИТ «ЭРА», 2019. – С. 46–55.
10. Козлов В.Л., Кузьмичев И.Р. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 1. – С. 33–38.
11. Самойлов А.М., Гренке В.В., Шакиров И.В. Оценка точности определения координат объекта в рабочей зоне стереодально-
- мера // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 112–115.
12. Коротаев В.В., Нгуен Х.В., Ярышев С.Н. Анализ схемы расположения камер в активной стереоскопической системе безопасности автомобиля // Евразийский союз ученых. – М.: Международный Образовательный Центр, 2014. – № 5-3 (5). – С. 84–86.
13. Румянцев К.Е., Кравцов С.В. Анализ измерительного пространства цифровой телевизионной стереоскопической системы. Точечное и интервальное оценивание координат точек трёхмерной сцены // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2011. – Т. 7. – № 3. – С. 38–48.
14. Румянцев К.Е. Анализ ошибок измерений глубины точек трёхмерной сцены цифровой телевизионной стереоскопической системой // Радиотехника. – 2011. – № 9. – С. 83–93.
15. Faugeras O., Luong T., Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments // Proc. Second European Conf. Computer Vision. – Santa Margherita Ligure, Italy, May 1992. – P. 321–334.
16. Faugeras O., Toscani G. The calibration problem for stereo // Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. – Miami Beach, Florida, June 1986. – P. 15–20.
17. Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robot vision // Pattern Recognition Letters. – December 1984. – V. 2. – P. 401–412.
18. Gennery D. Stereo-camera calibration // Proc. 10th Image Understanding Workshop. – San Francisco, CA, 1979. – P. 101–108.
19. Зубарь А.В. Оптико-электронная система определения параметров целей. Теоретические основы построения: моногр. – Омск: ОАБИИ, 2018. – С. 32–50.
20. Semenuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy // Procedia CIRP 41, 2016, pp 765 – 770.
21. A novel camera calibration technique based on differential evolution particle swarm optimization algorithm / Li Deng, Gen Lu, Yuying Shao, Minrui Fei and Huosheng Hu // Neurocomputing. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/209005979.pdf> (дата обращения 10.06.2020)
22. Способ определения координат объектов по их цифровым изображениям: пат. Рос. Федерация № 2697822; заявл. 19.11.18; опубл. 21.08.19, Бюл. № 6.
23. Свидетельство 2019663456. Программа моделирования измерительной области определения координат СТЗ: программа для ЭВМ / А.В. Зубарь (RU); правообладатель А.В. Зубарь; №2019662172; заявл. 03.10.2019. опубл. 16.10.2019. Бюл. № 10.
24. Группа компаний Геодезия и Строительство. URL: <https://gis2000.ru/equipment/spectra-precision-focus-2-5.html> (дата обращения 17.06.2020).
25. Exmor. Википедия. Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Exmor> (дата обращения 3.10.2020).

Поступила 10.03.2021 г.

Информация об авторах

Зубарь А.В., кандидат технических наук, докторант Омского автобронетанкового инженерного института.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор 5 кафедры электрооборудования и автоматики, Омского автобронетанкового инженерного института.

Кайков К.В., преподаватель 5 кафедры электрооборудования и автоматики Омского автобронетанкового инженерного института.

UDK 514.88

SIMULATION MODEL OF ASSESSMENT OF COMPUTER VISION SYSTEM ACCURACY

Aleksey V. Zubar¹,
alexey_zubar@mail.ru

Rustam N. Khamitov^{2,1},
apple_27@mail.ru

Kiril V. Kaykov¹,
kirkaykov@mail.ru

¹ Omsk Tank-Automotive Engineering Institute,
119, 14 voenny gorodok street, Omsk, 644098, Russia.

² Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

The relevance of the study is caused by the urgent need to develop a model for assessing the accuracy of determining the spatial position of objects, as well as tracking the position and movement of their boundaries by a computer vision system, which, as part of automated systems, can be used when carrying out various geodetic works, for surveying support of underground construction, 3D reconstruction of the surface landscape land, terrain mapping, when performing work in the mining industry, as well as servicing large and extended objects. It is especially important to use computer vision systems that allow spatial measurements in cases where traditional laser means do not provide high efficiency, for example, due to a high degree of scattering or, conversely, absorption of laser radiation by the surface of the observed object or small angular dimensions.

Purpose: assessment of the measurement space geometry and determine the distribution patterns of the measurement accuracy within its boundaries.

Problem statement: development of a simulation model that provides reconstruction of the form and dimensions of the measurement space and visualization of the distribution of measurement accuracy of coordinates of objects, taking into account the technical data of the cameras, their relative positions and orientations, as well as the influence on the measuring process of random components arising both during the assembly of the system and during its operation.

Methods: mathematical model method.

The novelty of the developed model is characterized by the fact that it was the first one to realize the possibility of estimating the distribution of errors in determining coordinates by the technical vision system over the entire depth of its measuring space. When modeling, there are no restrictions on the relative position of the cameras and their obligatory uniformity. For the first time, the model takes into account random errors associated with both the determination of the relative orientation of the position of the cameras, and with inaccuracies in their manufacture, as well as the capabilities of the applied system calibration method.

Results. The paper introduces the results of the analysis of models known from the level of science and technology for assessing the accuracy in determining the three-dimensional coordinates of objects by the technical vision system, their disadvantages are shown. The essence and main stages of transformations in the development of the model for assessing the accuracy in determining the coordinates of objects and their distribution over the measuring space by the computer vision system are disclosed.

Conclusions. The model based on the set of external and internal parameters of the cameras, as well as taking into account the expected random errors in the assembly and adjustment of the measuring system, makes it possible to estimate the accuracy in determining the coordinates of objects and the geometry of the measuring space. The presented model makes it possible to evaluate the accuracy of determining the spatial coordinates of objects, the position and movement of their boundaries when using computer vision systems as part of geodetic automated measuring systems. In addition, the use of this model makes it possible to optimize the process of formulating technical requirements for video or cameras and their relative position in the course of measurements.

Key words:

Modeling, accuracy assessment, determination of coordinates, computer vision system, measuring system.

REFERENCES

1. Petrochenko A.V. Multiproektsionnye sistemy obrabotki posledovatelnosti izobrazheniy dlya formirovaniya geoprostranstvennoy informatsii o podstilayushchey poverkhnosti (Moskva) [The multiprojective systems of processing of the sequence of images for formation of geospatial information on the underlying surface (Moscow)]. *Kompleksy s bespilotnymi letatelnyimi apparatami. Robototekhnicheskie komplekсы na osnove BLA*. Moscow, Radio-tehnika Publ., 2016. pp. 644–660.
2. Grishin V.A. Otsenka statisticheskikh kharakteristik izobrazheniy mestnosti s tochki zreniya ikh prigodnosti dlya 3D rekonstruktсии (Moskva) [Assessment of statistical characteristics of images of the area in terms of their suitability for 3D reconstruction (Moscow)]. *Proceedings. Artificial intelligence in technical systems*, 2004, no. 24, pp. 63–74.
3. Petrochenko A.V. *Issledovanie i razrabotka optiko-elektronnoy sistemy kontrolya deformatsiy protyazhennykh obyektov slozhnoy formy metodom posledovatelnoy privyazki koordinat*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Research and development of an optoelectronic system for monitoring the deformations of extended objects of complex shape by the method of sequential coordinate referencing. Cand. Diss. Abstract]. St. Petersburg, 2017. 19 p.
4. Konyakhin I.A., Vasilev A.S., Petrochenko A.V. Electrooptic Converter for Measuring Linear Shifts of the Section Boards at the Main Dish of the Radiotelescope. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2016, vol. 49, pp. 269–277.
5. Konyakhin I.A., Stepashkin I.S., Petrochenko A.V. System of the optic-electronicsensors for control position of the radio telescope elements. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9899, pp. 989934.

6. Konyakhin I.A., Petrochenko A.V., Tolochek N.S. Optic-electronic systems for measurement a position of radio-telescope components. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9446, pp. 94460M.
7. Konyakhin I.A., Petrochenko A.V., Tolochek N.S. Optic-electronic system for deformation of radio-telescope counter-reflector computer modeling. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9131, pp. 91311O.
8. Allais A.G., Brandou V., Dentrecolas S., Gilliotte J.P., Perrier I.M. A vision system to reconstruct natural deep-sea scenes in 3D. *Proc. of the Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Lisbon, Portugal, 1–6 July 2007. pp. 111–118.
9. Zubar A.V., Shcherbo A.N., Kaykov K.V. Otsenka raspredeleniya otsenok tochnosti opredeleniya koordinat po izmeritelnomu prostanstvu sistemy tekhnicheskogo zreniya (Anapa) [Analysis of mathematical models of accuracy of determination of coordinates of objects according to digital images (Anapa)]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoy nauki po napravleniyu «Tekhnicheskoe zrenie i raspoznavanie obrazov»*: Sbornik tezisev dokladov nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 2020, no.1 (20), pp. 5-9.
10. Kozlov V.L., Kuzmichev I.R. Measuring instrument of range and dimensional parameters of objects based on the digital camera. *Bulletin of Belarusian State University. Physicist. Mathematics. Informatics*, 2011, no. 1, pp. 33–38. In Rus.
11. Samoylov A.M. Grenke V.V., Shakirov I.V. Assessment of accuracy of determination of coordinates of an object in the working area of a stereo range finder (Tomsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 310, no. 2, pp. 112–115. In Rus.
12. Korotayev V.V., Nguyen Kh.V., Yaryshev S.N. Analiz skhemy raspolzheniya kamer v aktivnoy stereoskopicheskoy sisteme bezopasnosti avtomobilya [Analysis of the layout of cameras in an active three-dimensional safety system of a vehicle]. *Evrasiyskiy soyuz uchenykh* [Eurasian Union of Scientists]. Moscow, Mezhdunarodny Obrazovatelny Tsentr Publ., 2014. No. 5-3 (5), pp. 84–86.
13. Rumyantsev K.E., Kravtsov S.V. Analysis of measuring space of a digital television three-dimensional system. Pointed and interval estimation of coordinates of points of a three-dimensional scene. *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2011, vol. 7, no 3, pp. 38–48. In Rus.
14. Rumyantsev K.E. Analysis of errors of measurements of depth of points of a three-dimensional scene by a digital television three-dimensional system. *Radio engineering*, 2011, no. 9, pp. 83–93. In Rus.
15. Faugeras O., Luong T., Maybank S. Camera self-calibration: theory and experiments. *Proc. Second European Conf. Computer Vision*. Santa Margherita Ligure, Italy, 1992. pp. 321–334.
16. Faugeras O., Toscani G. The calibration problem for stereo. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami Beach, Florida, 1986. pp. 15–20.
17. Ganapathy S. Decomposition of transformation matrices for robor vision. *Pattern Recognition Letters*, 1984, vol. 2, pp. 401–412.
18. Gennery D. Stereo-camera calibration. *Proc. 10th Image Understanding Workshop*. San Francisco, CA, 1979. pp. 101–108.
19. Zubar A.V. *Optiko-elektronnaya sistema opredeleniya parametrov tseley. Teoreticheskie osnovy postroyeniya* [Optical-electronic system of determination of parameters of the purposes. Theoretical bases of construction]. Omsk, OABII Publ., 2018. pp. 32–50.
20. Semenuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 765–770.
21. Li Deng, Gen Lu, Yuying Shao, Minrui Fei, Huosheng Hu. A novel camera calibration technique based on differential evolution particle swarm optimization algorithm. *Neurocomputing*. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/209005979.pdf> (accessed 10 June 2020).
22. Zubar A.V., Kaykov K.V., Pipovarov V.P., Shcherbo A.N., Tishin S.A., Shargin A.W., Yablochkin A.B. *Sposob opredeleniya koordinat obyektov po ikh tsifrovym izobrazheniyam* [Way of determination of coordinates of objects according to their digital images]. Patent RF, no. 2697822, 2019.
23. Zubar A.V. *Programma modelirovaniya izmeritelnoy oblasti opredeleniya koordinat STZ* [Program of modeling of a measuring range of definition of coordinates of a system of computer vision]. Patent RF, no. 2019662172, 2019.
24. *Group of companies Geodesy and Construction*. 2020. Available at: <https://gis2000.ru/equipment/spectra-precision-focus-2-5.html> (accessed 17 June 2020).
25. *Exmor*. 2020. Wikipedia. Free encyclopedia. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Exmor> (accessed 3 October 2020).

Received: 10 March 2021.

Information about the authors

Aleksey V. Zubar, Cand. Sc., postdoctoral student, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute.

Rustam N. Khamitov, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute.

Kiril V. Kaykov, lecturer, Omsk Tank-Automotive Engineering Institute.