

УДК 629.7.05: 681.786:528.088.2

СЛУЧАЙНЫЕ ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВРЕМЯПРОЛЁТНЫХ КАМЕР И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

© В. А. Гришин

*Институт космических исследований РАН,
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
E-mail: vgrishin@cosmos.ru*

Трёхмерные времяпролётные камеры находят всё более широкое применение в робототехнике для информационного обеспечения задач управления движением и считаются перспективными для решения задач стыковки с некооперируемыми космическими аппаратами. В этом случае очень важны величины ошибок измерения относительных координат, которые может обеспечить времяпролётная камера. Проанализированы случайные (шумовые) ошибки, а также выявлено наличие значительной корреляции случайных ошибок измерения дальности времяпролётных камер для соседних пикселей. Для частного примера построено аналитическое решение, показывающее существенное ухудшение точности измерений расстояния при наличии указанной корреляции.

Ключевые слова: времяпролётная камера, измерение дальности, ошибки относительной навигации, корреляция случайных ошибок измерений.

DOI: 10.15372/AUT20240602

EDN: OARYDR

Введение. Времяпролётные камеры (Time-of-Flight, или ToF-камеры) в настоящее время довольно широко распространены. Их характерной особенностью является то, что они позволяют получить не только яркостное, но и объёмное (дальностное) изображение. Помимо обычных приложений, такие камеры могут использоваться в задачах управления движением и навигации различных мобильных роботов [1], беспилотных летательных аппаратов и космических аппаратов (КА). Рассмотрим более подробно проблемы стыковки КА [2, 3]. При стыковке требуется обеспечить точное измерение относительных навигационных параметров (трёх линейных и угловых координат) активного аппарата относительно пассивного аппарата. Значительный практический интерес представляет оценка точности измерения этих параметров. Нижняя граница Крамера — Рао погрешности измерения относительных навигационных параметров была получена в [4]. Несмотря на то, что в [2–4] использовались разные камеры, условия съёмки и объекты, создаётся впечатление, что экспериментальная точность измерения, полученная в [2, 3], существенно хуже, чем приведённая в [4] нижняя граница погрешностей измерений Крамера — Рао.

Представленная работа посвящена анализу возможных причин действительно низкой точности измерений времяпролётных камер по сравнению с нижней границей Крамера — Рао.

Систематические и случайные (стохастические) ошибки ToF-камер. В [4] сформулирован ряд упрощающих предположений, что, в сущности, и позволило построить нижнюю границу Крамера — Рао. Рассмотрим два из шести допущений, приведённых в этой работе и касающихся природы ошибок измерения:

1. Предполагается отсутствие систематических ошибок или нелинейностей в измерениях расстояний для ToF-камеры, либо они скомпенсированы при калибровке камеры.

2. Предполагается, что ошибки измерения расстояния для разных пикселей камеры независимы и распределяются по нормальному закону.

Описание многочисленных типов систематических ошибок измерения расстоянияToF-камерами требует отдельного рассмотрения. Следует только отметить, что при неизвестных (неопределённых) внешних условиях (расстояние, условия освещения, наличие посторонних предметов в поле зрения, их расположение, ориентация и коэффициент отражения поверхности, многолучевость распространения излучения и т. д.) возникающие систематические ошибки измерения расстояния в действительности приходится относить к случайным.

Что касается случайных ошибок измерений, порождаемых шумами камеры и сильно зависящих от интенсивности отражённого сигнала [5], то производители ToF-камер, как правило, используют временное и пространственное сглаживания (фильтрацию) для уменьшения таких ошибок. Однако, как будет показано далее, такая фильтрация может привести к значительному ухудшению точности относительной навигации.

Эксперименты с ToF-камерой на стенде Института космических исследований (ИКИ) РАН. Для экспериментов была использована промышленная ToF-камера Basler с размером изображения 640×480 пикселей [6], которая применялась с настройками по умолчанию и имела следующие параметры: поле зрения $57^\circ \times 43^\circ$, диапазон однозначности 0–13,320 м, абсолютная точность ± 1 см, повторяемость (1σ) 8 мм. В камере используется матрица Panasonic MN34902BL. Камера входила в состав специального стенда, разработанного в отделе оптико-физических исследований ИКИ РАН. Серии снимков были сделаны для ряда различных расстояний, для анализа из которого была выбрана серия из 10 снимков, полученных с расстояния 1,8 м.

Изображения модели КА на фоне поглощающего свет тканевого покрытия представлены на рис. 1. На трёхмерном изображении видны элементы конструкции, обеспечивающие перемещение и позиционирование модели. В данном случае, чем ближе поверхность, тем темнее она выглядит на изображении.

По 10 кадрам определялось среднее расстояние для каждого пиксела кадра (рис. 2). Здесь отличная от нуля яркость присвоена только тем пикселям, для которых есть отчёты дальности для всех 10 кадров. Это число сопоставимо с возможностями по накоплению статистики в режиме реального времени на борту космического аппарата. На этом изображении, в отличие от рис. 1, чем ближе точка к камере, тем выше яркость.

Среднее расстояние использовалось для статистических оценок. Анализ производился для семи указанных на изображении областей размером 31×21 для всех 10 кадров. Величина случайных ошибок измерения расстояния тем больше, чем меньше интенсивность

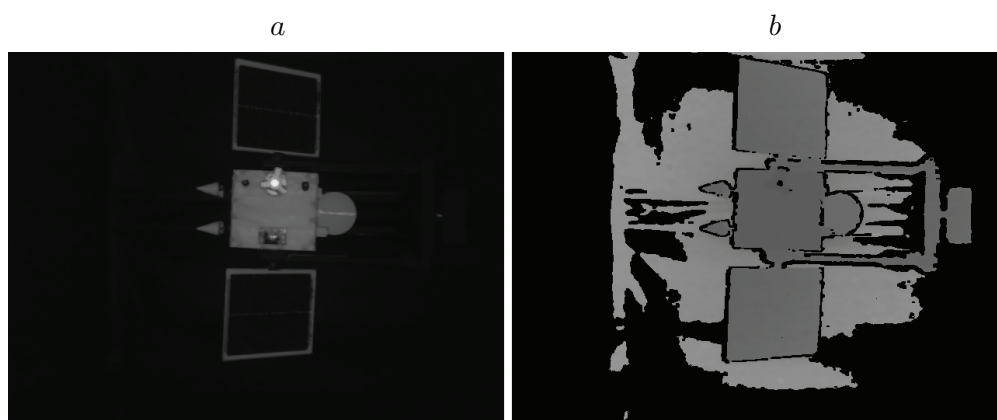


Рис. 1. Модель абстрактного КА, использованная для экспериментов: *a* — инфракрасное изображение (ИК), *b* — трёхмерное изображение

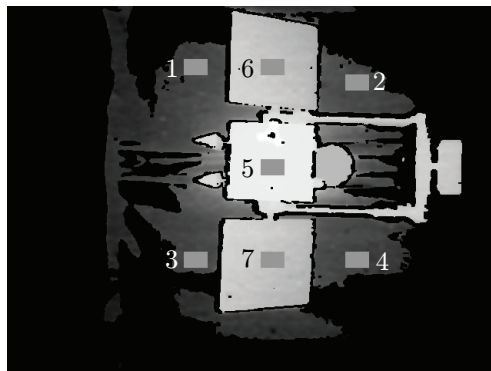


Рис. 2. Семь областей на изображении, для которых проводился статистический анализ

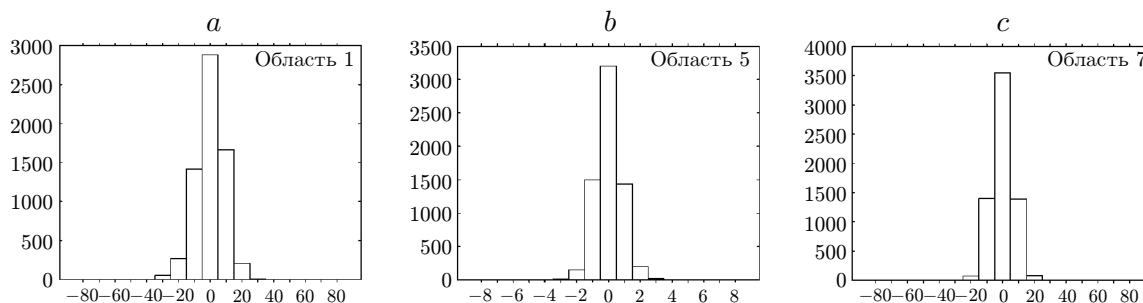


Рис. 3. Гистограммы отклонений от средней дальности для областей № 1 (а), 5 (b), 7 (c)

отражённого от поверхности ИК-излучения. Области № 1–4 приходятся на поглощающее видимый свет и ИК-излучение тёмное тканевое покрытие, области № 6–7 — на модели панелей солнечных батарей, которые развёрнуты на некоторый угол и поэтому отражают излучениеToF-камеры в пространство, что значительно уменьшает интенсивность принимаемого камерой излучения. Область № 5 приходится на корпус модели КА, покрытый хорошо отражающим материалом, что обуславливает высокий уровень отражённого сигнала и, соответственно, малые флуктуации результатов измерения дальности. На рис. 3 приведены гистограммы для областей № 1, 5, 7. Масштаб по горизонтальной оси для области № 5 в 10 раз крупнее, чем для областей № 1 и 7.

Анализ всех гистограмм позволяет сделать вывод о том, что функция распределения ошибок измерения дальности имеет одномодальный характер со спадающими «хвостами» распределения. Это не противоречит широко распространённому в научной литературе и принятому в [4] допущению о нормальности ошибок измерения дальностиToF-камерой. Для уточнения вопроса о законе распределения ошибок измерения дальностиToF-камерой были сделаны следующие оценки: 1) вероятность выхода ошибки за границу 3σ ; 2) разность Δ между коэффициентами эксцесса распределения ошибок измерений и эксцесса нормального распределения, равного 3; 3) коэффициент асимметрии распределения; 4) критерий согласия χ^2 с нормальным распределением. Для каждой области оценки строились по $31 \times 21 \times 10 = 6510$ измерениям.

Рассмотрим табл. 1. Для нормального распределения вероятность выхода за пределы коридора $\pm 3\sigma$ равна 0,28 %. Только для области № 4 получено близкое значение, для других областей этот показатель превышен в 1,7–3,7 раза. Положительные значения Δ разности коэффициента эксцесса, построенного по выборке, и коэффициента эксцесса нормального распределения также свидетельствуют о том, что выбросы интенсивнее, чем

Таблица 1

Характеристики измерения дальностиToF-камерой

Номер области	Среднее квадратическое отклонение (СКО) σ , мм	Доля измерений, выходящих за $\pm 3\sigma$	Δ	Коэффициент асимметрии	Критерий χ^2 согласия с нормальным распределением
1	8,84	0,71 %	0,56	-0,34	237,6
2	8,62	0,75 %	0,46	-0,02	113,2
3	7,20	1,04 %	1,22	0,07	403,4
4	7,94	0,29 %	0,015	0,16	148,5
5	0,78	0,71 %	0,68	0,14	239,7
6	6,64	0,63 %	0,78	0,06	113,4
7	6,82	0,51 %	0,38	0,07	269,9

у нормального распределения. Эмпирическая плотность вероятности имеет асимметрию (нормальное распределение симметрично), причём степень этой асимметрии также изменяется по полю кадра. Таким образом, несмотря на то, что гистограммы визуально похожи на нормальное распределение, на самом деле распределение ошибок измерения несколько отличается от нормального закона. Для уточнения этого вопроса использован критерий χ^2 как наиболее известный и массовый. Для его применения весь диапазон изменения ошибок измерения был разбит на 17 интервалов. Поскольку и среднее значение, и среднее квадратическое отклонение (СКО) оценивались по выборке, то число степеней свободы равно $17 - 1 - 2 = 14$. При этом числе степеней свободы и уровне значимости 0,05 получаем критическое значение критерия, равное 23,685. Соответственно, по критерию χ^2 для всех испытуемых областей гипотеза о нормальности была отвергнута с достоверностью $1,0 - 0,05 = 0,95$.

Необходимо отметить, что отклонение закона распределения от нормального не является критичным в том плане, что при близких значениях СКО ошибок измерения по каждому пикселу результирующие ошибки измерения относительных координат будут не слишком сильно отличаться от ошибок в случае нормального закона распределения при условии, что «хвосты» распределения не слишком «тяжёлые», т. е. отсутствуют аномальные ошибки измерений.

Переходим к наиболее интересному вопросу о степени корреляции ошибок измерения дальности соседних пикселов. Расположение областей, для которых вычислялась корреля-

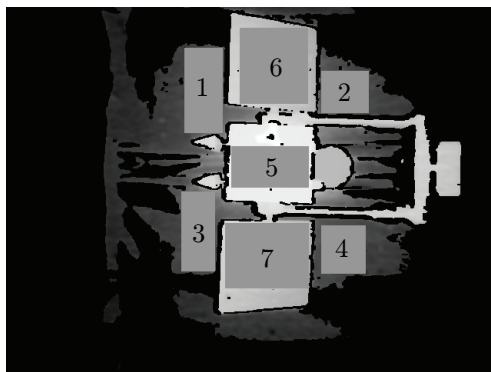


Рис. 4. Расположение областей, для которых вычисляется коэффициент корреляции ошибок измерения дальности

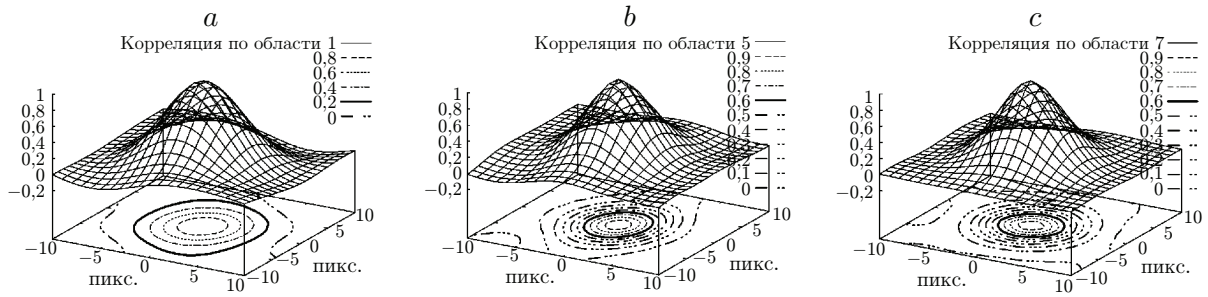


Рис. 5. Двумерные графики коэффициентов корреляции для областей № 1 (а), 5 (b), 7 (с)

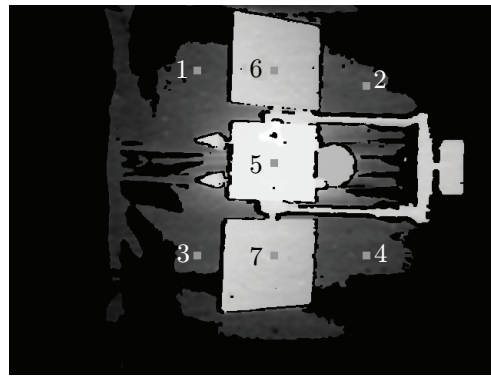


Рис. 6. Расположение семи областей размером 10×10 пикселей, по которым оценивалась ковариационная матрица фрагментов изображения

ция яркости соседних пикселей, показано на рис. 4. Области по сравнению с рис. 2 увеличены так, чтобы получить более устойчивые в статистическом смысле оценки. Двумерные графики коэффициентов корреляции показаны на рис. 5.

Перед вычислением коэффициента корреляции вычислялась средняя дальность для всех пикселей каждой области. Эта средняя дальность вычиталась из всех 10 изображений для каждой области для подавления влияния структурного шума. Коэффициент корреляции рассчитывался по «окну» размером 21×21 пикселей с усреднением по площади областей, указанных на рис. 4, и по всем 10 кадрам. Из графиков следует, что корреляция случайных ошибок дальности соседних пикселей достаточно велика.

Оценка влияния корреляции измерений дальности. Определим, как такая корреляция измерения дальности влияет на точность измерений. Для этого рассмотрим простой иллюстративный пример измерений по единственной координате (вместо шести координат). Построим оценку ковариационной матрицы измерений расстояний для областей изображений размером $10 \times 10 = 100$ пикселей, что даёт ковариационную матрицу, содержащую $100 \times 100 = 10000$ чисел. Для настолько малого фрагмента изображений дальность для всех пикселей можно считать приблизительно одинаковой. Расположение фрагментов, по которым строится ковариационная матрица, показано на рис. 6.

По каждой из семи указанных на рис. 6 областей были построены ковариационные матрицы: $\Sigma = (c_{i,j})$, которые оказались вырожденными из-за сильной корреляции ошибок измерения дальности соседних пикселей. Поэтому с целью их регуляризации элементы матриц умножались на близкий к единице коэффициент, зависящий от расстояния от главной диагонали:

$$c'_{i,j} = c_{i,j} \exp(-\alpha|i - j|). \quad (1)$$

Значение параметра α задано равным 0,0001. Далее по экспериментальной оценке ковариационной матрицы строится совместная многомерная плотность вероятности отсчетов дальности. Хотя фактическая плотность распределения ошибок измерения дальности показывает отклонение от закона Гаусса, такое приближение можно считать приемлемым для оценочных расчетов. Построим оценку дальности для случая коррелированных измерений методом максимального правдоподобия и сравним её с простым усреднением, которое является оптимальной оценкой для случая некоррелированных измерений с одинаковой точностью.

Функция правдоподобия для $n = 10 \times 10 = 100$ измерений дальности имеет вид

$$f(d, l_1, l_2, \dots, l_{100}) = ((2\pi)^{100} \det(\Sigma))^{-1/2} \times$$

$$\times \exp(-0,5(l_1 - d, l_2 - d, \dots, l_{100} - d) \Sigma^{-1} (l_1 - d, l_2 - d, \dots, l_{100} - d)^\top),$$

где $\Sigma^{-1} = (b_{i,j})$ — матрица, обратная ковариационной матрице Σ ; l_i , $i = 1, \dots, 100$ — измерения дальности, содержащие ошибки, d — дальность, которую требуется оценить.

Приравняв к нулю производную логарифма функции правдоподобия по параметру d , получаем выражение для оценки дальности методом максимального правдоподобия:

$$\tilde{d} = \left(l_1 \sum_{i=1}^{100} b_{i,1} + l_2 \sum_{i=1}^{100} b_{i,2} + \dots + l_{100} \sum_{i=1}^{100} b_{i,100} \right) / \sum_{i,j=1}^{100} b_{i,j}. \quad (2)$$

Нижняя граница Крамера — Рао для дисперсии ошибки измерений примет вид

$$D(\tilde{d}) \geq I^{-1}(d),$$

где $I(d)$ — количество информации по Фишеру, которая определяется через логарифм функции правдоподобия $L(d, l_1, l_2, \dots, l_{100})$ следующим образом:

$$I(d) = -E \left(\frac{\partial^2 L(d, l_1, l_2, \dots, l_{100})}{\partial d^2} \right) = \sum_{i,j=1}^{100} b_{i,j},$$

где E — знак математического ожидания.

Для частного случая независимых ошибок измерений расстояния для каждого пикселя при одинаковых дисперсиях ошибок измерений из (2) получаем известное выражение для оценки расстояния:

$$\tilde{d} = (l_1 + l_2 + \dots + l_{100}) / 100. \quad (3)$$

Нетрудно определить дисперсию оценок, полученных по выражениям (2) и (3). Для выражения (2) имеем

$$D(\tilde{d}) = \sum_{i,j=1}^{100} \left[c_{i,j} \left(\sum_{k=1}^{100} b_{k,i} \right) \left(\sum_{l=1}^{100} b_{l,j} \right) \right] / \left(\sum_{i,j=1}^{100} b_{i,j} \right)^2. \quad (4)$$

Для выражения (3) имеем

$$D(\tilde{d}) = \frac{1}{100^2} \sum_{i,j=1}^{100} c_{i,j}. \quad (5)$$

Таблица 2

СКО ошибок оценивания дальности по методу максимального правдоподобия и простым усреднением для семи областей размером 10×10 пикселей

Номер области	1	2	3	4	5	6	7
Оценка максимального правдоподобия	0,12	0,22	0,10	0,21	0,00828	0,110	0,114
Простое усреднение	6,08	5,25	3,19	4,79	0,47	4,03	6,40

Таблица 3

СКО ошибок оценивания дальности по методу максимального правдоподобия простым усреднением для коррелированных измерений для области № 1

Коэффициент α в (1)	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	50
Оценка максимального правдоподобия	0,12	0,39	1,06	1,45	1,09	0,84
Простое усреднение	6,08	6,02	5,47	3,13	1,37	1,01

Результаты расчётов СКО (как квадратного корня из дисперсии, рассчитанной по формулам (4) и (5)) приведены в табл. 2. В нашем случае дисперсия оценки по методу максимального правдоподобия численно совпадает с дисперсией, соответствующей нижней границе Крамера — Рао.

В табл. 2 наглядно показано, что при наличии корреляции ошибок измерения соседних пикселей простое усреднение может уступать по точности методу максимального правдоподобия в десятки раз. На примере ковариационной матрицы для области № 1 рассмотрим, как влияет степень корреляции ошибок измерения соседних пикселей на точность оценки (табл. 3). Для этого будем изменять коэффициент α в выражении (1). При стремлении α к бесконечности ковариационная матрица стремится к диагональному виду, а степень корреляции ошибок измерений соседних пикселей — к нулю. Однако при этом сохраняется неравноточность измерений, ухудшающая дисперсию оценки по формуле (5) по сравнению с дисперсией оценки по формуле (4).

Учёт корреляционных связей ошибок измерения дляToF-камер с целью повышения точности измерений весьма проблематичен вследствие существенной нестабильности статистики ошибок измерений. Адаптивные методы оценки ковариационных матриц затруднены их очень большими размерами и высокой вычислительной сложностью таких оценок. Таким образом, для повышения точности измерений разработчикам и производителям ToF-камер необходимо совершенствовать структуры фотоприёмных матриц и методы обработки информации с тем, чтобы без пространственно-временной фильтрации получать приемлемые значения ошибок измерений.

Заключение. ToF-камеры считаются перспективными для использования в различных областях, включая промышленность, робототехнику, космическую технику, медицину и т. д. В то же время точность измерений таких приборов часто является недостаточной для измерений в широком круге прикладных задач, в том числе в навигации и картографировании [7], что требует разработки комплекса мер по повышению точности измерений. В этих условиях производители для повышения конкурентоспособности своих изделий прибегают к временной и пространственной фильтрации результатов измерений, что, хотя и уменьшает СКО ошибок измерений, но при этом создаёт серьёзные проблемы для дальнейшей обработки информации из-за возникновения сильных корреляционных связей

результатов измерений соседними пикселями. Помимо этого, производители часто изменяют условия измерения параметров таким образом, чтобы получить наиболее выгодные для себя с точки зрения конкурентоспособности результаты измерений. В [8] подчёркивается необходимость оценки параметров различных ToF-камер с единых позиций, для чего требуется разрабатывать и внедрять стандартные методики оценки погрешностей применительно к ToF-камерам [9] и стандартные методы их коррекции. Иначе потребители и далее будут вынуждены проводить собственное исследование каждой конкретной модели камеры и оценивать её пригодность для своих задач [10, 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Wiedemann M., Sauer M., Driewer F., Schilling K.** Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics // Proc. of the 17th World Cong. Int. Federation of Automatic Control. Seoul, South Korea, 6–11 July, 2008. Vol. 41, N 2. P. 13689–13694.
2. **Klionovska K., Benninghoff H.** Initial Pose Estimation using PMD Sensor during the Rendezvous Phase in On-Orbit Servicing Missions // Proc. of the 27th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. San Antonio, USA, 5–9 Feb., 2017. AAS 17-263.
3. **Klionovska K., Ventura J., Benninghoff H., Huber F.** Close Range Tracking of an Uncooperative Target in a Sequence of Photonic Mixer Device (PMD) Images // Robotics. 2018. 7, Iss. 1. DOI: 10.3390/robotics7010005.
4. **Grishin V. A.** Accuracy of Relative Navigation Using Time-of-Flight Cameras // Journ. Spacecraft and Rockets. 2023. 60, N 2. P. 471–480. DOI: 10.2514/1.A35079.
5. **Falie D., Buzuloiu V.** Noise Characteristics of 3D Time-of-Flight Cameras // Proc. of the Int. Symp. on Signals, Circuits and Systems. Iasi, Romania, 13–14 July, 2007. Vol. 1. DOI: 10.1109/ISSCS.2007.4292693.
6. **Basler ToF Camera.** User's Manual. URL: http://ibesthost15.com/jidien.com/zh_tw/upload/download_files/cc7aaa22011ec463237657834cd46a3e.pdf (дата обращения: 18.09.2024).
7. **May S., Droeschel D., Fuchs S. et al.** Robust 3D-mapping with time-of-flight cameras // Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems. St. Louis, USA, 10–15 Oct., 2009. P. 1673–1678. DOI: 10.1109/IROS.2009.5354684.
8. **Pasinetti S., Nuzzi C., Luchetti A. et al.** Experimental Procedure for the Metrological Characterization of Time-of-Flight Cameras for Human Body 3D Measurements // Sensors. 2023. 23, Iss. 1. DOI: 10.3390/s23010538.
9. **Beraldina J.-A., Mackinnon D., Cournoyer L.** Metrological characterization of 3D imaging systems: Progress report on standards developments // Proc. of the 17th Int. Cong. of Metrology. 2015. 13003. DOI: 10.1051/metrology/201513003.
10. **Stürmer M., Becker G., Hornegger J.** Assessment of Time-of-Flight Cameras for Short Camera-Object Distances / Eds. by P. Eisert, K. Polthier, J. Hornegger // Vision, Modeling, and Visualization. Eindhoven: The Eurographics Association, 2011. P. 231–238. DOI: 10.2312/PE/VMV/VMV11/231-238.
11. **Dorrington A. A., Payne A. D., Cree M. J.** An evaluation of time-of-flight range cameras for close range metrology applications // Proc. of the ISPRS Commission V Mid-Term Symp. «Close Range Image Measurement Techniques». Newcastle upon Tyne, UK, 21–24 June, 2010. Vol. XXXVIII, pt. 5. P. 201–206.

Поступила в редакцию 10.09.2024

После доработки 13.09.2024

Принята к публикации 14.10.2024