

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПЛАТФОРМЫ СТЕНДА
ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ
ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАНОСПУТНИКА**

В. Д. МЕЩЕРЯКОВ*, П. Н. НИКОЛАЕВ, А. А. ХУСАИНОВ

*Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева,
Самара, Россия,
meshcheryakov.vd@ssau.ru

Аннотация. Предложена методика определения ориентации платформы стенда полунатурного моделирования угловых движений относительно центра масс наноспутника. Разработанная методика основана на применении стереокамеры, состоящей из инфракрасной камеры и цветной камеры видимого спектрального диапазона. Каждая из таких камер предназначена соответственно для формирования инфракрасных и цветных изображений на обработанных снимках. Работа обеих камер базируется на использовании системы активных оптических маркеров, излучающих в инфракрасном и видимом диапазонах. По снимку, сделанному инфракрасной камерой, определяются центры оптических маркеров с помощью преобразования Хафа. Этим же методом на снимке, полученном цветной камерой, путем оценки фундаментальной матрицы, отфильтровываются посторонние артефакты. После того как цвет маркера с цветного изображения определен, этот признак добавляется к полученным координатам маркеров с инфракрасного изображения. После этого формируется тройка векторов в системе координат платформы стенда и определяется ее ориентация в системе координат инфракрасной камеры. Полунатурное моделирование показало погрешность не выше $0,5^\circ$.

Ключевые слова: определение ориентации, полунатурное моделирование, стереокамера, оптическая система, активные маркеры

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

Ссылка для цитирования: Мещеряков В. Д., Николаев П. Н., Хусаинов А. А. Определение ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 6. С. 430—442. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442.

**DEFINING THE ORIENTATION OF THE STAND PLATFORM
FOR SEMI-NATURAL MODELING OF THE DYNAMICS
OF A NANOSATELLITE RELATIVE MOTION**

V. D. Meshcheryakov*, P. N. Nikolaev, A. A. Khusainov

*Samara University, Samara, Russia
meshcheryakov.vd@ssau.ru*

Abstract. A technique for determining the orientation of the stand platform for semi-natural modeling of angular motion dynamics relative to the center of mass of a nanosatellite is proposed. The developed technique is based on the use of a stereo camera consisting of an infrared camera and a color camera of the visible spectral range. Each of these cameras is designed, respectively, for the formation of infrared and color images on processed photographs. The operation of both cameras is based on the use of a system of active optical markers emitting in the infrared and visible ranges. Based on the image taken by the infrared camera, the centers of optical markers are determined using the Hough transform. By the same method, extraneous artefacts are filtered out in the image obtained by a color camera by evaluating the fundamental matrix. After the color of the marker from the color image is determined, this feature is added to the obtained coordinates of the markers from the infrared image. After that, a triple of vectors is formed in the coordinate system of the stand platform and its orientation is determined in the coordinate system of the infrared camera. According to results of semi-linear modeling, the orientation error does not exceed 0.5° .

Keywords: semi-natural modeling, stereo camera, optical system, active markers

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the project 0777-2020-0018, funded from the funds of the state assignment to the winners of the competition of scientific laboratories of educational institutions of higher education subordinate to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

For citation: Meshcheryakov V. D., Nikolaev P. N., Khusainov A. A. Defining the orientation of the stand platform for semi-natural modeling of the dynamics of a nanosatellite relative motion. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 6. P. 430—442 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-6-430-442.

Введение. В последнее время в мире возрастает интерес к использованию микро- и наноспутников [1]. Практически любой проект по созданию малого спутника требует минимизации расходов на проектирование и эксплуатацию. Существенную экономию обеспечивают правильный выбор проектных характеристик спутника, а также оптимизация его систем на начальной стадии проектирования. При этом очень важно суметь правильно оценить состав и характеристики системы определения ориентации и стабилизации, а это, в свою очередь, трудно сделать без моделирования [2].

При испытаниях систем определения ориентации и стабилизации наибольшую эффективность показывает метод полунатурного моделирования, позволяющий выявлять потенциальные проблемы в работе на более ранних этапах проектирования, что может существенно снизить материальные и временные затраты на устранение выявленных недостатков [3]. Для подобных испытаний используются стенды полунатурного моделирования, позволяющие определить работоспособность нескольких систем испытываемого оборудования.

В настоящей работе предлагается методика оценки относительного движения платформы стенда полунатурного моделирования динамики наноспутника по активным оптическим маркерам. Стенд используется для отработки алгоритмов управления угловым движением и определения ориентации наноспутника.

Оценка ориентации и движения объектов по изображению с камер является широко распространенным методом, доказавшим свою эффективность во многих областях. Например, в работе [4] камеры и оптические маркеры используются для определения деформации вращающихся лопастей. Подобный подход к использованию камер нашел свое применение в определении вибраций вращающихся механизмов, что позволяет говорить о его высокой разрешающей способности [5]. В работах [4, 5] особо отмечаются преимущества применения оптических методов в тех случаях, когда невозможно использовать блоки инерционных измерений, включающие в себя акселерометры и гироскопы, что позволяет минимизировать влияние измерительной системы на объект испытаний. К преимуществам оптических методов относятся отсутствие дрейфа нуля и накопительных ошибок, образующихся в ходе интегрирования, что позволяет применять их при испытаниях на длительном промежутке времени без каких-либо методов коррекции.

Постановка задачи. В Самарском университете располагается Центр наноспутниковых технологий, оснащенный стендом исследования движения относительно центра масс наноспутника производства компании „Спутникс“ (рис. 1). Стенд состоит из: аэродинамического подвеса, имитатора магнитного поля Земли (по модели IGRF-13), имитатора Солнца и имитатора звездного неба. Воздушный подвес представляет собой сферический подшипник, в котором вместо смазки используется струя газа, подаваемого под давлением с помощью компрессора [6]. Использование подобной системы обеспечивает три степени свободы. Движение объекта испытаний происходит в магнитном поле, что позволяет ему определять свое положение и выполнять демпфирование угловой скорости при помощи магнитных катушек. Определение ориентации происходит и при применении звездных датчиков, для чего на имитатор выводится изображение звездного неба. Стенд позволяет проводить испытания систем ориентации наноспутников массой до 4 кг и габаритами до 120×120×400 мм [7]. В Центре

наноспутниковых технологий стенд используется для испытаний систем ориентации и стабилизации наноспутников формата CubeSat.

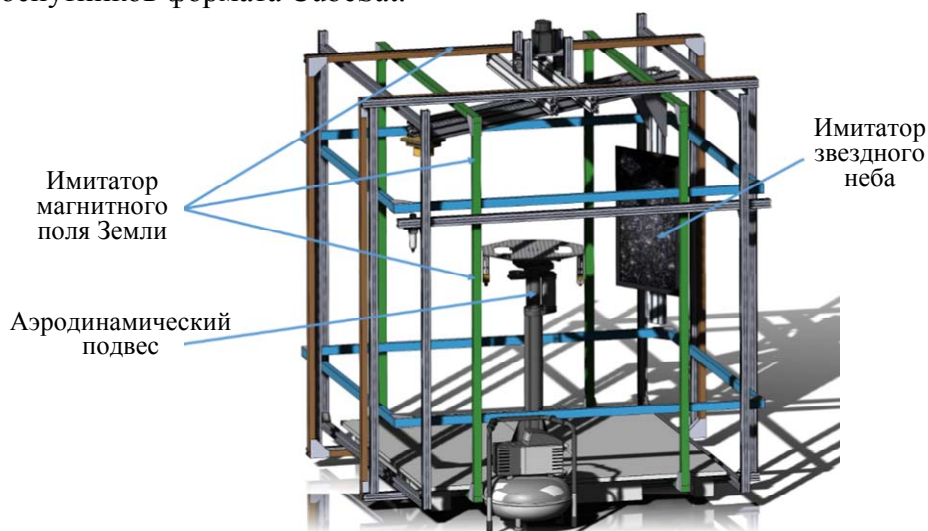


Рис. 1

В комплекте со стендом полунатурного моделирования идет система независимых измерений SXL-AM-05, состоящая из маркеров пассивного типа, штатно размещаемых на платформе (рис. 2) [8].

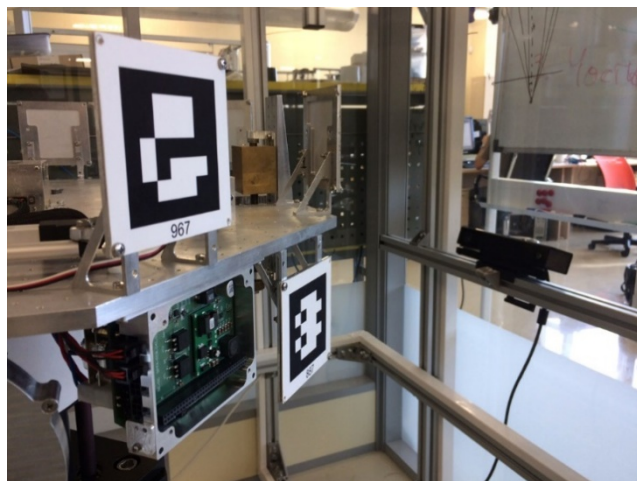


Рис. 2

Большое число шаблонов (до 16 штук) системы приводит к утяжелению платформы, требует значительных вычислительных мощностей из-за сложности необходимых математических расчетов и частично перекрывает объект испытаний, не позволяя проводить испытания звездных датчиков и датчиков Солнца.

В работах [4, 5] также использовались пассивные маркеры с внешним источником подсветки, однако такой подход может нарушить работу датчиков определения направления на Солнце и звездного неба, поэтому в настоящей работе предложено применять активные оптические маркеры. Такая система позволяет уменьшить вес и обеспечить большую видимость объекта испытаний.

В работе [9] использовались оптические маркеры активного типа, закрепленные на концах штанг, что позволяло задавать вектор ориентации в пространстве. Для того чтобы различать векторы, выполнялись штанги различного размера. Чтобы определить направления векторов, используется блок инерционных измерений, установленный в точке пересечения штанг. В отличие от [9], в настоящей работе предложено использовать симметричную конструкцию оптических маркеров на платформе без блока инерционных измерений и для различения векторов использовать маркеры разных цветов.

Система оптических маркеров. Предлагаемая система оптических маркеров состоит из полых пластиковых шаров, закрепленных на платформе аэродинамического стенда. Внутри полого шара размещаются цветной и инфракрасный диоды. Инфракрасный диод необходим для идентификации маркера инфракрасной камерой, цветной — для задания признака маркера, а именно: определения цвета. Схематично маркер представлен на рис. 3, а.

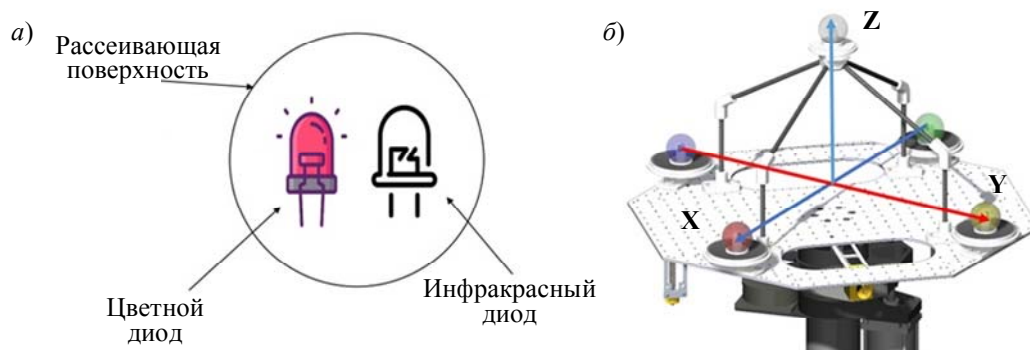


Рис. 3

Пары маркеров синего—желтого и красного—зеленого цветов, расположенные на противоположных сторонах платформы, формируют два ортогональных вектора ориентации. Маркер белого цвета, закрепленный на выносных элементах над центром платформы, вместе с точкой пересечения двух найденных векторов формирует третий вектор ориентации.

При построении векторов ориентации необходимо учитывать, что один из маркеров будет перекрываться объектом испытаний. Поэтому необходимо разместить четыре маркера на платформе, чтобы в любой момент времени в зоне видимости камеры находилось не менее трех маркеров, необходимых для построения двух векторов. Общий вид системы оптических маркеров представлен на рис. 3, б.

Методика определения ориентации платформы стенда по активным оптическим маркерам. Предлагается методика, использующая две камеры: инфракрасную и цветную. Инфракрасная камера необходима для определения координат маркеров, цветная — для определения цвета маркеров.

При использовании камер необходимо учитывать искажения, вносимые в изображение линзой. Наибольший вклад в систематическую погрешность оптических систем вносит дисторсия линзы объектива [9, 10]. Математическая модель дисторсии для камеры определяется через следующее выражение:

$$\begin{cases} x'' = x'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 x' y' + p_2 (r^2 + 2x'), \\ y'' = y'(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_2 x' y' + p_1 (r^2 + 2y'), \\ r^2 = x^2 + y^2, \end{cases} \quad (1)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты радиальной дисторсии; p_1, p_2 — коэффициенты тангенциальной дисторсии; x, y — координаты пикселей на исходном снимке; x'', y'' — координаты точек изображения на снимке с устраненными искажениями [11, 12].

Для поиска координат центров оптических маркеров используется алгоритм Хафа [13]. Этот алгоритм применяется и для цветного снимка, но кроме окружностей, соответствующих оптическим маркерам, он определяет артефакты на фоне. При этом артефакты отсутствуют на инфракрасном снимке, что позволяет использовать модель стереокамеры для фильтрации окружностей на цветном.

Для соотношения инфракрасного изображения маркера с цветным используется модель стереокамеры. Математическую модель двух проекций точки можно выразить через:

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{F} — фундаментальная матрица стереокамеры (обуславливает связь между любыми двумя изображениями одной и той же сцены, которая показывает, где проекция точек из сцены может находиться на обоих изображениях); \mathbf{x} — вектор однородных координат точки на изображении первой камеры; \mathbf{x}' — вектор однородных координат точки на изображении второй камеры. Точки, для которых справедливо выражение (2), называются стереопарой [11, 12, 14, 15]. После определения центра оптических маркеров на инфракрасном снимке, который соответствует однородным координатам \mathbf{x} , когда известны значения фундаментальной матрицы \mathbf{F} , строится эпиполярная линия на втором изображении, на которой, по определению, находится стереопара.

Уравнение эпиполярной линии получается из (2) [15]:

$$\begin{cases} \mathbf{x}\mathbf{l} = 0, \\ l = [a \ b \ c]^T, \end{cases} \quad (3)$$

где \mathbf{l} — вектор коэффициентов уравнения прямой:

$$ax + by + c = 0, \quad (4)$$

где x, y — координаты эпиполярной прямой на плоскости изображения; a, b, c — коэффициенты прямой на плоскости.

После построения линии происходит „отбрасывание“ окружностей, не соответствующих оптическим маркерам. Производится расчет расстояний от каждой обнаруженной окружности до каждой эпиполярной линии, выбираются наиболее близко расположенные окружности.

Для определения ориентации платформы, согласно алгоритму, необходимо определить цвет каждого маркера. Изображения, получаемые с цветной камеры, состоят из трех компонент — RGB (красный, зеленый, синий цвет) [16]. Для определения цвета маркера по серии снимков заранее находятся средние составляющие цветовых компонент в области, соответствующей границам оптических маркеров. Средние значения каждой цветовой компоненты в области, соответствующей каждому оптическому маркеру, представлены в табл. 1 (диапазон значений от 0 до 255).

Таблица 1

Средние значения цветовых компонент, полученные по серии фотографий

Параметр	Среднее значение для каждой цветовой компоненты, отн. ед.		
	Красный	Зеленый	Синий
Синий (P_B)	58±19	145±32	221±9
Зеленый (P_G)	90±22	228±10	140±29
Белый (P_W)	239±11	242±11	240±10
Красный (P_R)	241±6	214±20	218±16
Желтый (P_Y)	234±12	219±16	111±19

Значения, указанные в табл. 1, используются в качестве эталонных. Для определения цвета маркеров на каждом кадре необходимо получить средние значения каждой цветовой компоненты внутри окружности каждого маркера и сравнить их с эталонными.

После этого по известному расположению маркеров выполняется построение системы векторов ориентации. Вектор \mathbf{X} получается вычитанием координат точек синего и зеленого маркеров, вектор \mathbf{Y} — желтого и красного. Вектор \mathbf{Z} получается вычитанием координат белого маркера и точки пересечения векторов \mathbf{X} и \mathbf{Y} :

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{x,y} = P_B - P_G, \\ \mathbf{Y}_{x,y} = P_Y - \frac{P_B + P_G}{2}, \\ \mathbf{Z}_{x,y} = P_W - \frac{P_B + P_G}{2}. \end{cases} \quad (5)$$

Векторы ориентации, полученные таким способом, являются двумерными. Третья составляющая находится из векторного произведения:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_z = \mathbf{Y}_{x,y} \times \mathbf{Z}_{x,y}, \\ \mathbf{Y}_z = \mathbf{Z}_{x,y} \times \mathbf{X}_{x,y}, \\ \mathbf{Z}_z = \mathbf{X}_{x,y} \times \mathbf{Y}_{x,y}, \end{cases} \quad (6)$$

восстановленные векторы обозначены индексом r .

Далее, согласно [9], составляется матрица \mathbf{M} из восстановленных векторов ориентации платформы стенда:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_x & \mathbf{Y}_x & \mathbf{Z}_x \\ \mathbf{X}_y & \mathbf{Y}_y & \mathbf{Z}_y \\ \mathbf{X}_z & \mathbf{Y}_z & \mathbf{Z}_z \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для нахождения оптимального кватерниона ориентации платформы производится регуляризация, с этой целью составляется матрица Бар—Ицхака:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} m_{11} - m_{22} - m_{33} & m_{21} + m_{12} & m_{31} + m_{13} & m_{23} - m_{32} \\ m_{21} + m_{12} & m_{22} - m_{11} - m_{33} & m_{32} + m_{23} & m_{31} - m_{13} \\ m_{31} + m_{13} & m_{32} + m_{23} & m_{33} - m_{11} - m_{22} & m_{12} - m_{21} \\ m_{23} - m_{32} & m_{31} - m_{13} & m_{12} - m_{21} & m_{11} + m_{22} + m_{33} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где m_{ij} — элементы матрицы (7) [9].

Оптимальный кватернион \mathbf{v} находится как нормализованный собственный вектор, соответствующий максимуму собственного значения матрицы \mathbf{K} :

$$\hat{q} = [v_4 \ v_1 \ v_2 \ v_3], \quad (9)$$

где v_1, v_2, v_3, v_4 — элементы нормализованного собственного вектора.

Таким образом, методика работы с получаемыми изображениями имеет следующий порядок:

- 1) получение изображений со стереокамеры;
- 2) устранение дисторсии с помощью калибровочных коэффициентов;
- 3) выполнение фильтрации инфракрасного изображения;
- 4) поиск границ маркеров и их центров на инфракрасном снимке;
- 5) поиск границ маркеров и их центров на цветном изображении;
- 6) определение цвета маркеров;
- 7) формирование векторов ориентации платформы стенда.

Анализ точностных характеристик методики. Перед проведением экспериментов с использованием системы оптических маркеров на аэродинамическом подвесе стенда было проведено математическое моделирование алгоритма. Задача моделирования заключается в том, чтобы построить трехмерную систему векторов, выполнить поворот данной системы и по двумерным координатам с помощью предложенной методики вычислить углы поворота системы. Рассматривались два варианта отклонения от центра маркера: два пиксела — это соответствует ошибке определения центра маркера с помощью камеры; пять пикселов — это

равняется наименьшему радиусу маркера, определенному на инфракрасном изображении, и рассматривается как предельный случай ошибки. Было проведено 400 итераций моделирования по равномерному закону для каждого варианта распределения ошибок.

Были заданы точки, соответствующие положению маркеров в трехмерной системе координат. Координаты точек были подобраны таким образом, чтобы составить трехмерные ортогональные векторы единичной длины:

$$P_R = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix}; P_B = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 0,5 \\ 0,5 \end{pmatrix}; P_W = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0,5 \end{pmatrix}; P_{cross} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0,5 \end{pmatrix}; P_G = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 1 \end{pmatrix}; P_Y = \begin{pmatrix} 1 \\ 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Составленные векторы единичной длины образуют систему, аналогичную системе расположения маркеров на стенде по формуле (5):

$$\begin{cases} \mathbf{X} = \frac{P_R - P_B}{\|P_R - P_B\|}; \\ \mathbf{Y} = \frac{P_G - P_Y}{\|P_G - P_Y\|}; \\ \mathbf{Z} = \frac{P_W - P_{cross}}{\|P_W - P_{cross}\|}. \end{cases} \quad (10)$$

Затем выполняется поворот системы векторов с использованием матрицы поворота \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix},$$

где использованы следующие тестовые углы поворота $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 20^\circ$, $\gamma = 30^\circ$.

Ниже представлен пример расчета для одной реализации случайной ошибки в два пиксела. Изначальная система векторов имеет следующие значения:

$$\mathbf{X}_{in} = \begin{pmatrix} 0,813 \\ -0,441 \\ 0,378 \end{pmatrix}; \mathbf{Y}_{in} = \begin{pmatrix} 0,469 \\ 0,883 \\ 0,018 \end{pmatrix}; \mathbf{Z}_{in} = \begin{pmatrix} -0,342 \\ 0,163 \\ 0,925 \end{pmatrix}.$$

Согласно математической модели преобразования координат проективной камерой, которая описывает связь положения объекта в пространстве и его изображения, получаемого камерой, третья координата, соответствующая расстоянию от плоскости камеры до точки изображения, устранялась [11]:

$$\mathbf{X}_{x,y} = \begin{pmatrix} 0,813 \\ -0,441 \\ 0 \end{pmatrix}; \mathbf{Y}_{x,y} = \begin{pmatrix} 0,469 \\ 0,883 \\ 0 \end{pmatrix}; \mathbf{Z}_{x,y} = \begin{pmatrix} -0,342 \\ 0,163 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Данные векторы получены с инфракрасного снимка и наделены признаком цвета. Восстановление третьей координаты происходит с помощью векторного произведения (5):

$$\mathbf{X}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,378 \end{pmatrix}; \mathbf{Y}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,018 \end{pmatrix}; \mathbf{Z}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0,925 \end{pmatrix}.$$

По формуле (7) рассчитывается матрица \mathbf{M} :

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0,813 & 0,469 & -0,342 \\ -0,441 & 0,883 & 0,163 \\ 0,378 & 0,018 & 0,925 \end{pmatrix},$$

а по формуле (8):

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} -0,331 & 0,009 & 0,012 & 0,048 \\ 0,009 & -2,86 & 0,061 & 0,241 \\ 0,012 & 0,061 & -0,257 & 0,303 \\ 0,048 & 0,241 & 0,303 & 0,874 \end{pmatrix}.$$

Для матрицы **K** максимальное собственное значение находится в четвертом столбце, и кватернион:

$$\hat{q} = [0,951 \quad 0,038 \quad 0,189 \quad 0,239].$$

Подобным образом производились вычисления и для ошибки, моделирующей отклонение в пять пикселей. Математические ожидания и среднеквадратические отклонения, получившиеся в результате статистического моделирования, для обоих случаев представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты статистического моделирования

Ошибка, пиксели	$M_{\alpha, \dots}^{\circ}$	$\sigma_{\alpha, \dots}^{\circ}$	$M_{\beta, \dots}^{\circ}$	$\sigma_{\beta, \dots}^{\circ}$	$M_{\gamma, \dots}^{\circ}$	$\sigma_{\gamma, \dots}^{\circ}$
2	10,01	0,215	19,98	0,183	30,00	0,158
5	9,99	0,523	19,98	0,472	30,01	0,397

Экспериментальное определение ориентации. На стенде полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника в качестве камер используются устройства Microsoft Kinect первого поколения (рис. 4).



Рис. 4

Устройство включает цветную камеру и инфракрасный излучатель, который совместно с инфракрасной камерой представляет собой датчик глубины. Система оптических маркеров и наноспутник расположены на платформе стенда. Камера фиксирует положение платформы,

выдает кадр в систему обработки изображений, которая определяет положение маркеров и вычисляет ориентацию платформы.

Был проведен эксперимент по предложенной методике для определения коэффициентов устранения дисторсии и фундаментальной матрицы стереокамеры, с применением пакета прикладных программ MatLab и приложения Stereo Camera Calibrator [12]. Особенностью этих камер является тот факт, что значение тангенциальной дисторсии ниже, чем достигаемый уровень точности определения дисторсии [10].

Для определения коэффициента дисторсии в поле зрения обеих камер помещался шахматный шаблон и выполнялась серия снимков. На рис. 5 проиллюстрирована работа приложения MatLab Stereo Camera Calibrator [17], служащего для определения ключевых точек.

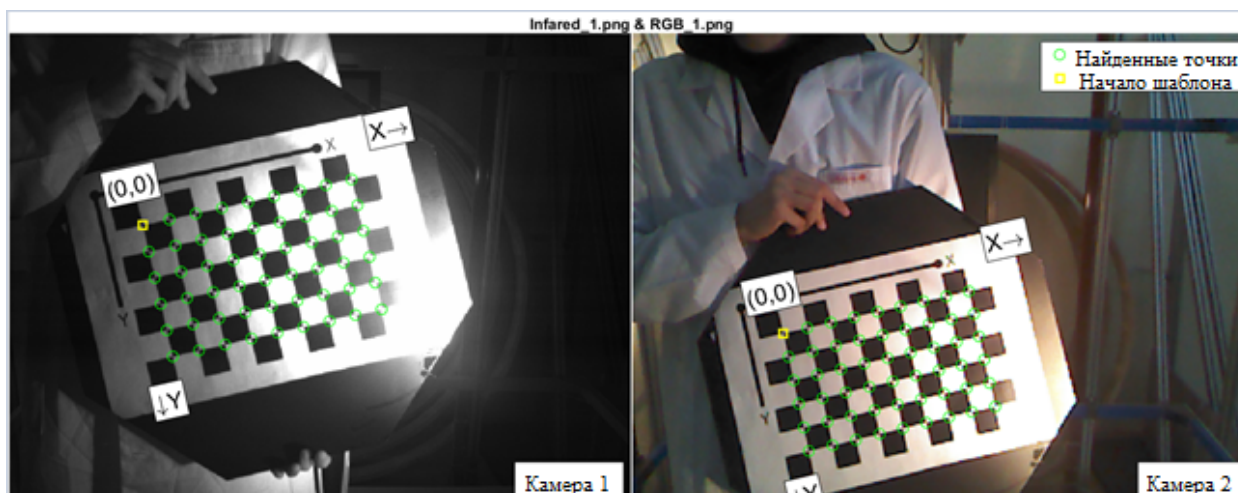


Рис. 5

Значения коэффициентов дисторсии получались для двух устройств Microsoft Kinect (в табл. 3 обозначены „кинект 0“ и „кинект 1“, коэффициенты тангенциальной дисторсии равны нулю).

Таблица 3

Значения коэффициентов радиальной дисторсии		
Камера	k_1 , отн. ед.	k_2 , отн. ед.
IR кинект 0	-0,1208	0,3584
IR кинект 1	-0,1581	0,6517
RGB кинект 0	0,0460	-0,1167
RGB кинект 1	0,0444	-0,1368

С помощью шахматных шаблонов и приложения MatLab StereoCamera Calibrator экспериментально получены значения фундаментальной матрицы, необходимые для фильтрации окружностей на цветном снимке, не соответствующих оптическим маркерам:

$$F = \begin{pmatrix} 0,00275 & -0,13 & 287 \\ 0,12 & -0,45 & 30 \\ -268 & 33 & -7150 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3}.$$

Выполнена пороговая фильтрация полученного инфракрасного изображения (рис. 6, а) по уровню 9500. Значение уровня фильтрации определялось экспериментально. Далее устранена дисторсия и выполнен поиск центров маркеров при помощи алгоритма Хафа [13]. Пример найденных маркеров показан на рис. 6, б.

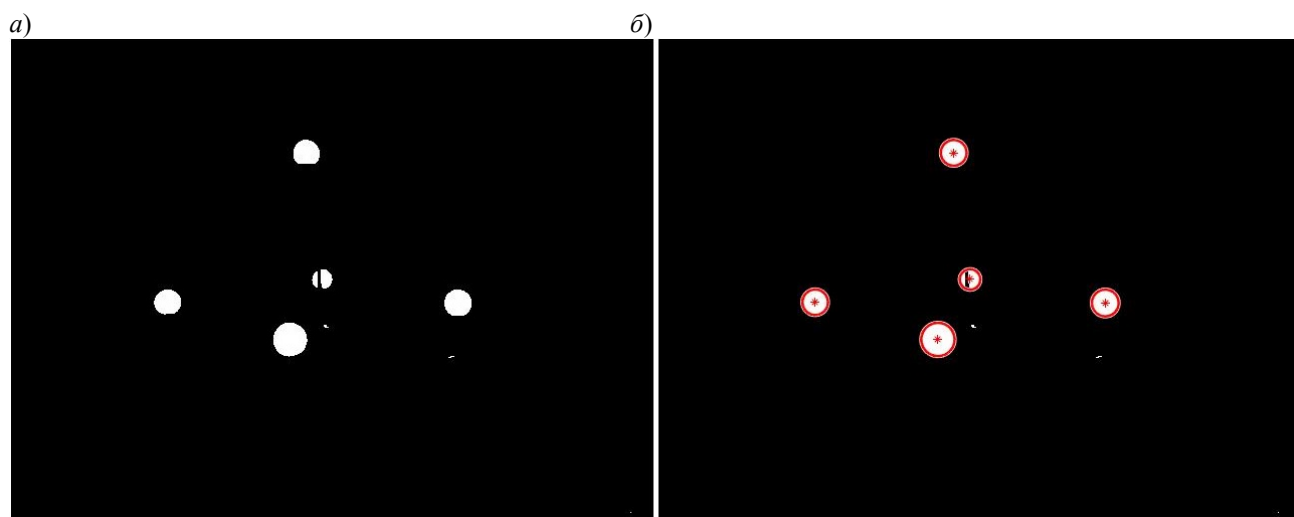


Рис. 6

На цветном снимке также была устранена дисторсия (рис. 7, *a*), после чего производился поиск окружностей на снимке, но при этом алгоритм Хафа определил окружности, не соответствующие оптическим маркерам (рис. 7, *б*).

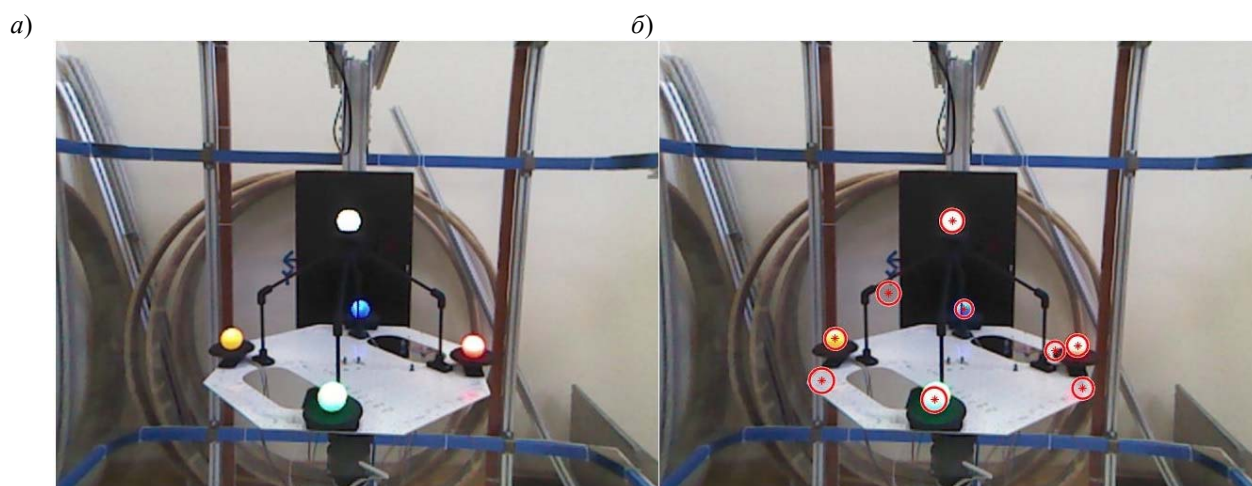


Рис. 7

С помощью фундаментальной матрицы стереокамеры и координат центров оптических маркеров были построены эпиполярные линии. Изображения с эпиполярными линиями и отфильтрованными окружностями приведены на рис. 8, *a* и *б*.

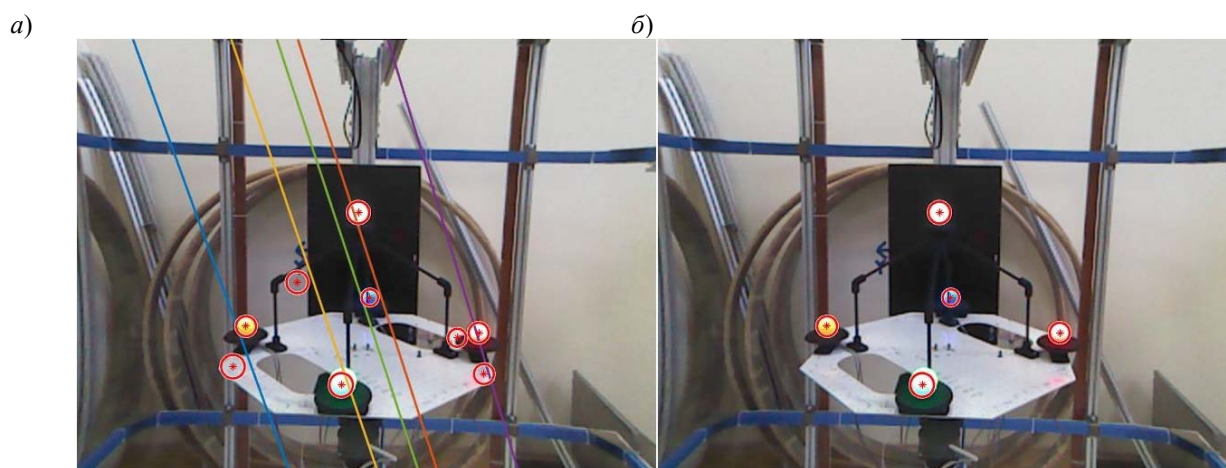


Рис. 8

После фильтрации окружностей были определены цвета. Векторы ориентации были составлены парами из маркеров „зеленый—синий“ и „красный—желтый“. Третий вектор ориентации получен на пересечении двух векторов ориентации и координат центра белого маркера (табл. 4).

Таблица 4

Координаты центров маркеров на изображении		
Маркер	Координата X , усл. ед.	Координата Y , усл. ед.
Красный	444	324
Зеленый	292	382
Синий	324	285
Желтый	187	317
Белый	311	192

Далее по предложенной методике был посчитан кватернион ориентации и пересчитан в углы ориентации платформы в системе координат камеры: угол поворота относительно оси X — $9,7067^\circ$; относительно оси Y — $-6,7848^\circ$; относительно оси Z — $1,6992^\circ$.

Заключение. Оценена возможность использования стереокамеры для бесконтактного определения ориентации платформы. Разработана и реализована система активных маркеров на платформе стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника. Также разработана методика определения ориентации платформы стенда полунатурного моделирования динамики относительного движения наноспутника с помощью активных маркеров. Погрешность определения ориентации платформы для крайнего случая определения центра оптического маркера в пять пикселей составляет не более $0,5^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каширин А. В., Глебанова И. И. Анализ современного состояния рынка наноспутников как подрывной инновации и возможностей его развития в России // Молодой ученый. 2016. № 7(111). С. 855—867.
2. Лабораторный стенд для полунатурной отработки систем ориентации микро- и наноспутников. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук, 2021 [Электронный ресурс]: <https://keldysh.ru/papers/2008/prep38/prep2008_38.html>. (дата обращения 11.06.2021).
3. Игрицкий В. А., Майорова В. И. Особенности разработки модульных аппаратно-программных комплексов полунатурного моделирования систем управления и навигации малоразмерных космических аппаратов // Наука и Образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 13.
4. Meitu Ye, Jin Liang, Leigang Li, Boxing Qian, Maodong Ren, Mingkai Zhang, Wang Lu, Yulong Zong. Full-field motion and deformation measurement of high speed rotation based on temporal phase-locking and 3D-DIC // Optics and Lasers in Engineering. 2021. Vol. 146, N 6. P. 106697.
5. Jinzhao Y., Tse P. Sparse representation of complex steerable pyramid for machine fault diagnosis by using non-contact video motion to replace conventional accelerometers // Measurement. 2021. N 175365. February 2021. DOI:10.1016/j.measurement.2021.109104.
6. Элементы стенда полунатурного моделирования. „Спутник“, частная космическая компания. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturalnogo-modelirovaniya>>. (дата обращения 28.05.2021)
7. Полунатурный испытательный стенд отработки бортовых систем ориентации и стабилизации наноспутников. Центр наноспутниковых технологий. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://spacetest.ru/index.php?id=orient>>. (дата обращения 28.05.2021).
8. Система независимых измерений. „Спутник“, частная космическая компания. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturalnogomodelirovaniya/sistema-nezavisimyix-izmerenij>>. (дата обращения 28.05.2021).
9. Madgwick Sebastian O. H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. University of Bristol, 2010 [Электронный ресурс]: <https://www.researchgate.net/publication/267197884_An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays>.

10. Branko K. Calibration of Kinect-type RGB-D Sensors for Robotic Applications // *FME Transactions*. 2015. Vol. 43, N 1. P. 47—54. DOI:10.5937/fmet1501047K.
11. Hartley R. I., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge, 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685>.
12. Основы стереозрения // Хабр, сообщество IT-специалистов. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://habr.com/ru/post/130300/>>. (дата обращения 31.05.2021).
13. Svalbe I. D. Natural representation for straight lines, the Hough transform on discrete arrays // *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*. 1989. Vol. II, N 9. pp. 286.
14. CamCal 011 Fundamental Matrix. Data Hackers. 2021 [Электронный ресурс]: <<http://datahacker.rs/camera-calibration-essential-matrix-computation>>. (дата обращения 31.05.2021).
15. Ribo M. A new Optical Tracking System for Virtual and Augmented Reality Applications // *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Budapest, 2001.
16. О цветовых пространствах. Хабр, сообщество IT-специалистов. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://habr.com/ru/post/181580/>>. (дата обращения 31.05.2021).
17. Stereo Camera Calibrator App. MathWorks. 2021 [Электронный ресурс]: <<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/stereo-camera-calibrator-app.html>>. (дата обращения 31.05.2021).

Сведения об авторах

Вадим Дмитриевич Мещеряков

— Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, инженер-программист;
E-mail: swedish2015@yandex.ru

Пётр Николаевич Николаев

— канд. физ.-мат. наук; Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, научный сотрудник;
E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Александр Александрович Хусаинов

— магистр; Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, межвузовская кафедра космических исследований; НИЛ-102, инженер-программист;
E-mail: husa142508@gmail.com

Поступила в редакцию 19.01.22; одобрена после рецензирования 03.03.22; принята к публикации 25.04.22.

REFERENCES

1. Kashirin A.V., Glebanova I.I. *Molodoy uchenyy* (Young Scientist), 2016, no. 7(111), pp. 855–867. (in Russ.)
2. https://keldysh.ru/papers/2008/prep38/prep2008_38.html. (in Russ.)
3. Igritsky V.A., Mayorova V.I. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2011, no. 13, pp. 16. (in Russ.)
4. Meitu Ye, Jin Liang, Leigang Li, Boxing Qian, Maodong Ren, Mingkai Zhang, Wang Lu, Yulong Zong, *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, no. (6)146, pp. 106697. DOI:10.1016/j.optlaseng.2021.106697.
5. Jinzhao Yang, Peter Tse, *Measurement*, 2021, no. 175(365), pp. 109104. DOI:10.1016/j.measurement.2021.109104.
6. <https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturalnogo-modelirovaniya/>. (in Russ.)
7. <https://spacetest.ru/index.php?id=orient>. (in Russ.)
8. <https://sputnix.ru/ru/oborudovanie/elementi-stenda-polunaturalnogomodelirovaniya/sistema-nezavisimyix-izmerenij>. (in Russ.)
9. Madgwick Sebastian O.H., *University of Bristol*, 2010, https://www.researchgate.net/publication/267197884_An_efficient_orientation_filter_for_inertial_and_inertialmagnetic_sensor_arrays.
10. Branko K. *FME Transactions*, 2015, no. 1(43), pp. 47–54. DOI:10.5937/fmet1501047K.
11. Hartley R.I., Zisserman A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge, 2003, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811685>.
12. <https://habr.com/ru/post/130300/> (in Russ.)
13. Svalbe I.D. *IEEE Trans. on Pattern Analysis Machine Intelligence*, 1989, no. 9(II), pp. 286.
14. *CamCal 011 Fundamental Matrix*, 2021, <http://datahacker.rs/camera-calibration-essential-matrix-computation>.
15. Ribo M. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, 2001.
16. <https://habr.com/ru/post/181580/>. (in Russ.)
17. *Stereo Camera Calibrator App*, MathWorks, 2021 <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/stereo-camera-calibrator-app.html>.

Data on authors

- Vadim D. Meshcheryakov** — Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Engineer-Programmer; E-mail: swedish2015@yandex.ru
- Petr N. Nikolaev** — PhD; Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Researcher; E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru
- Alexander A. Khusainov** — M. Sc.; Samara University, Inter-University Department of the Space Researches; Research Laboratory 102, Engineer-Programmer; E-mail: husa142508@gmail.com

Received 19.01.22; approved after reviewing 03.03.22; accepted for publication 25.04.22.