

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135

Лукьянов Е.А., \*Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б.

Донской государственный технический университет

\*E-mail: mpebiser@gmail.com

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

**Аннотация.** Определение параметров пространственной ориентации объектов представляет собой актуальную проблему и имеет важнейшее значение для различных отраслей науки и техники. В большинстве случаев это осуществляется с помощью информационно-измерительных систем, измеряющих положение, ориентацию и параметры движения управляемого объекта. Мобильные робототехнические системы широко используют методы инерциальной навигации. Отладка таких систем обычно требует создания испытательного стенда и экспериментального тестирования разработанных решений инерциальной навигации. Сократить временные и финансовые затраты при проектировании и разработке систем, использующих инерциальную навигацию, возможно, если большую часть экспериментов и проверок выполнять на основе математической модели. Поэтому, методы построения виртуальных датчиков для моделирования пространственного движения робототехнических систем представляют интерес, как и практическое применение таких датчиков при исследовании робототехнических систем.

Статья посвящена решению задач создания виртуального датчика для инерциальной навигации, содержащего трехкоординатные акселерометры и гироскопы в среде моделирования CoppeliaSim. Выполнена проверка работы такого датчика в тестовых примерах с линейными и вращательными перемещениями, оценены ошибки определения таким датчиком ускорений и угловых скоростей.

**Ключевые слова:** мобильный робот, манипулятор, гироскоп, акселерометр, обработка сигналов, математическая модель

**Введение.** Определение пространственной ориентации роботов, их рабочих органов является необходимой задачей, решаемой системой управления роботом. Для этого могут использоваться различные методы [1]. Основными недостатками оптических методов являются необходимость должного освещения и организации внешней среды, а также потребность в значительных вычислительных ресурсах. Определение пространственного положения легко реализуется при использовании датчиков, имеющих кинематические связи с «неподвижными» и «перемещающимися» звеньями. Однако, если устройство перемещается в пространстве по сложной траектории, применение «контактных методов» невозможно. Именно это определяет проблему измерения параметров ориентации и движения тел в пространстве [2]. В этом случае ориентация объектов и параметры их перемещения могут быть определены на основе методов инерциальной навигации [2–4]. На основе датчиков ускорения и гироскопов [5, 6], можно решать задачи оценки пространственной ориентации и перемещения объекта [7]. В зависимости от специфики и особенностей мобильных устройств, подход к решению этих задач сенсорно-информационной подсистемой может быть различным [8, 9], как и алгоритмы вычислений [10–12].

Известно [12], что методы вычисления линейных и угловых перемещений на основе измерения ускорений и угловых скоростей обладают методическими, расчетными и измерительными погрешностями. Минимизация этих погрешностей обеспечивается как на этапах проектирования, так и на этапах отладки и тестирования. Есть часть задач обеспечения точности сенсорно-информационной системы, связанная с датчиками, их сигналами и начальной обработкой этих сигналов (смещения, линеаризация и пр.). Есть часть задач, связанная с алгоритмическим обеспечением процесса определения положения, ориентации и перемещений тел. Какие-то из этих задач могут быть решены только в составе реальной измерительной системы, установленной на объекте, движение и ориентацию которого требуется контролировать [12]. Другие могут решаться с использованием макетов или экспериментальных стендов. Однако, проектирование и изготовление стенда для отладки разрабатываемого программно-аппаратного комплекса требует значительных финансовых и временных затрат. Поэтому эффективным может являться применение методов исследования и проектирования на основе виртуального моделирования [13].

Сократить затраты и время разработки возможно при использовании виртуальных стендов и моделей реальных устройств [13]. Виртуальная

модель должна соответствовать физическому объекту и быть оснащена необходимыми датчиками. В этом случае алгоритмы и программы, разработанные и проверенные на виртуальной модели можно использовать в реальном устройстве. В данной статье рассматривается разработка сенсорной подсистемы для определения пространственной ориентации и угловых перемещений объекта.

**Методы, оборудование, материалы.** В качестве материалов при подготовке данной статьи были использованы публикации об исследованиях в области навигации и управления робототехническими системами, статьи о решении задач инерциальной навигации в реальных мобильных и промышленных роботах, а также результаты собственных работ по созданию элементов и программного обеспечения для систем инерциальной навигации. Используемые методы – методы математического моделирования физических систем линейного и вращательного движения, решения дифференциальных уравнений пространственного движения твердых тел и оценки погрешности результатов математического моделирования. Программные средства, использованные при проведении исследований, результаты которых изложены ниже – пакеты CoppeliaSim и Matlab.

**Объект исследования, цели и задачи исследования.** Целью исследования являлось создание виртуального датчика, позволяющего при моделировании робототехнических и других систем, реализующих координатные перемещения, моделировать системы инерциальной навигации. Для этого решены задачи разработки трехкоординатных датчиков ускорений и трехкоординат-

ных датчиков угловых скоростей, разработки алгоритмов, вычисляющих значения гироскопов и акселерометров, экспериментальной проверки точности значений виртуального датчика. Объектом исследования является процесс движения звеньев робота (твердых тел) и процесс измерения действующих ускорений и угловых скоростей посредством виртуального датчика.

### Основная часть.

**Выбор среды моделирования.** Выбор среды моделирования [14, 15] осуществлялся на основе таких критериев, как наличие и возможность использования виртуальных датчиков, точность моделирования процессов движения твердых тел, наличие различных решателей систем дифференциальных уравнений. В настоящее время CoppeliaSim является одним из лучших симуляторов [15], обладает развитыми средствами интеграции моделей с внешними программно-аппаратными решениями.

**Создание 3D модели стенда.** Среда CoppeliaSim имеет инструменты [16–18] для создания объектов любой сложности. Однако, более удобным является объединение возможностей конструкторской САПР и среды моделирования. В этом случае в системе автоматического проектирования создается устройство, представляющее собой сборку из нескольких деталей, способных перемещаться друг относительно друга. Эта сборка экспортируется в формате **urdf** (*universal robotic description format*) [18]. Этот файл импортируется в CoppeliaSim как виртуальная модель устройства. На рисунке 1 показан результат создания виртуального стенда для исследования возможностей систем инерциальной навигации.

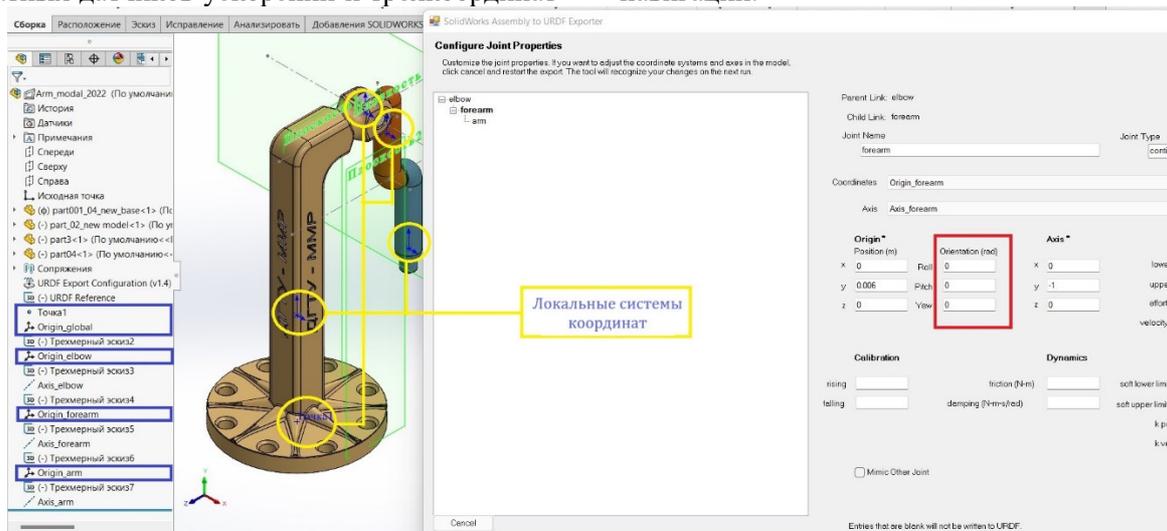


Рис. 1. Виртуальный стенд, полученный из urdf-сборки

После расположения «вручную» виртуальных двигателей и датчиков, модель может использоваться для экспериментов.

**Построение виртуального акселерометра.** Акселерометр – это устройство (датчик), измеряющий полное ускорение, поэтому даже если

устройство статично, оно будет измерять гравитационное ускорение [19]. На рис. 2 представлен

типовой акселерометр, измеряющий силы взаимодействия шарика, обладающего массой со стенками датчика.

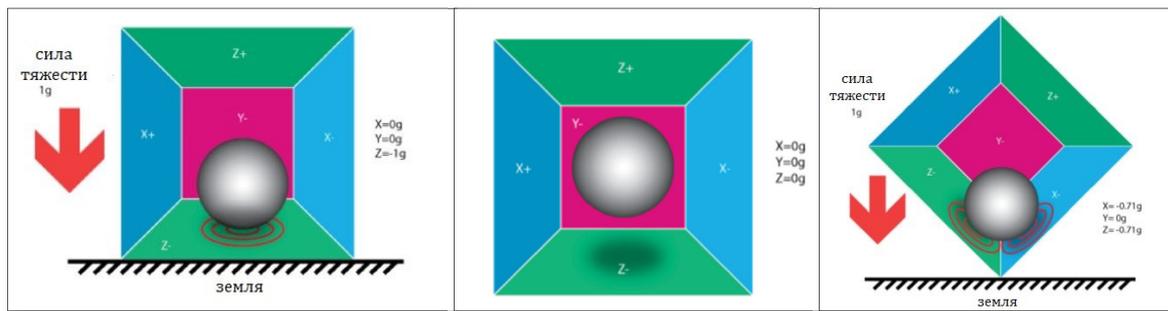


Рис. 2. Представление акселерометра: (а) в неподвижном состоянии, (б) в свободном падении, (в) при повороте на 45 градусов

Общий вектор ускорения, измеряемый датчиком, содержит как гравитационное составляющую, так и ускорения от движения датчика.

В CoppeliaSim датчик ускорения может быть создан с использованием трехкоординатного датчика (рис. 3), который измеряет силы, действующие на пробную массу.

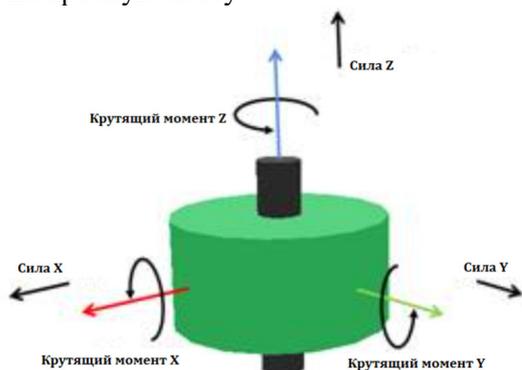


Рис. 3. Ориентация осей при измерении действующих сил и моментов

На значения сил, действующих вдоль трех координатных осей, можно рассчитать ускорения, зная массу, закрепленную на датчике. Примем массу, использованную в датчике, равной 1 г, тогда ускорение объекта определится следующим образом

$$acc = \frac{F}{m}; \quad (1)$$

где  $acc$  – ускорение в  $m/c^2$ ,  $F$  сила в [Н] и  $m$  масса в [кг].

Трехкоординатный датчик ускорений на основе датчика сил, созданный в CoppeliaSim при тестировании показал значительные ошибки измерения ускорений. Это обнаружено при моделировании характерных процессов разгона/свободного падения/торможения как при однокоординатном перемещении, так и при одновременном движении по нескольким координатам. Таким

образом построение виртуальных датчиков ускорения в пакете CoppeliaSim на основе датчиков сил авторами не рекомендуется.

Дальнейшие исследования выполнялись с использованием виртуального трехкоординатного датчика ускорений, построенного на основе анализа изменения скоростей тела (основания) датчика.

Пусть  $v_0$  и  $v_1$  – два вектора скорости датчика, полученные за интервал времени  $dt$  в глобальной системе координат,  ${}^g_sR$  – матрица вращения системы координат датчика относительно глобальной системы координат, а  $g$  – вектор действующего гравитационного ускорения. Вектор ускорения датчика  $acc$  в системе координат датчика (вдоль его осей) будет:

$$a = \frac{dv}{dt}; \quad (2)$$

$$a_{glob} = a + g; \quad (3)$$

$$acc = {}^g_sR^{-1} * a_{glob}; \quad (4)$$

где  $a$  – вектор ускорения линейного перемещения датчика в глобальной системе координат;

$acc$  – вектор ускорения, измеренный датчиком в его системе координат.

Программный скрипт, вычисляющий численные значения ускорений в проекции на координатные оси виртуального датчика, выполняет преобразование в соответствии с уравнениями 2–4 с интервалом времени вычислений, совпадающим с интервалом времени моделирования.

**Построение виртуального гироскопа.** В CoppeliaSim имеется возможность с помощью программного интерфейса получать текущие значения угловых скоростей объектов сцены в глобальной системе координат. Гироскоп – это датчик для измерения угловой скорости вращающихся объектов, осуществляемый в локальной системе координат датчика [20]. При моделировании систем инерциальной навигации нужен

виртуальный гироскоп, «сигнал» которого соответствовал бы скорости вращения «корпуса датчика» относительно осей системы координат, связанной с датчиком.

При создании виртуального датчика использован метод вычисления угловых скоростей твердого тела на основе изменения его пространственного расположения [20, 21]. Предположим,

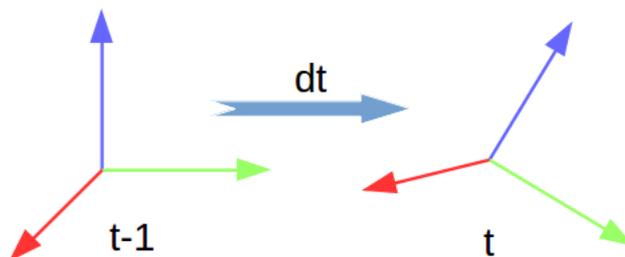


Рис. 4. Изменение пространственной ориентации объекта в процессе моделирования

Для любого объекта сцены [18, 19] можно получить матрицу вращения в текущем моменте времени.

$$R = Rz(\psi) \cdot Ry(\theta) \cdot Rx(\varphi); \quad (5)$$

где  $R$  – матрица вращения,  $Rx(\varphi)$ ,  $Ry(\theta)$ ,  $Rz(\psi)$  – матрицы вращения вокруг осей X, Y и Z соответственно.

Зная изменения значений матрицы вращения в последовательные моменты времени моделирования, можно получить углы Эйлера [21, 22], определяющие пространственную ориентацию тела в текущий момент времени. На рисунке 5 показано изменение на интервале времени  $dt$  пространственного положения некоторого тела, описываемое матрицей поворота.

Для представленной ситуации, если известны матрицы вращения  ${}^0_A R$  и  ${}^0_B R$ ,  ${}^A_B R$ , пространственное положение тела в глобальной системе координат или в системе координат другого тела может быть получено следующим образом:

$${}^0_B R = {}^0_A R * {}^A_B R; \quad (6)$$

$${}^A_B R = {}^0_A R^{-1} * {}^0_B R; \quad (7)$$

где  ${}^0_A R$  – матрица вращения системы координат (A) относительно (0),  ${}^0_B R$  – матрица вращения

$$\omega_x = (\psi(t) - \psi(t - 1))/dt, \omega_y = (\theta(t) - \theta(t - 1))/dt, \omega_z = (\varphi(t) - \varphi(t - 1))/dt.$$

Полученные скорости вращения определены в системе координат датчика, что и требуется для модели реального датчика.

Для проверки работоспособности виртуального гироскопа, выполним моделирование движения тела под действием известных вращающих моментов. В этом случае сможем сравнить результаты, полученные аналитически с результатами экспериментальными. Движение тела под действием постоянного момента описывается следующим образом:

$$\omega = \omega_0 + \frac{M_{max}}{I} dt; \quad (8)$$

в процессе моделирования в момент времени  $t-1$  объект занимает определенное положение, описываемую углами Эйлера  $\varphi(t - 1)$ ,  $\theta(t - 1)$ ,  $\psi(t - 1)$ . Через интервал времени моделирования  $dt$  тело займет положение  $\varphi(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\psi(t)$  (рис. 4).

системы координат (B) относительно (0) и  ${}^A_B R$  – матрица вращения системы координат (B) относительно (A).

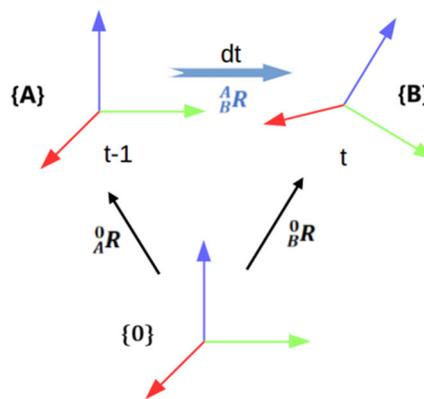


Рис. 5. Изменения ориентации «виртуального» датчика на интервале моделирования

Зная матрицу  ${}^A_B R$ , можно вычислить углы Эйлера, определяющие изменение углового положения тела за интервал времени  $dt$ . При этом скорости вращения  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  «виртуального датчика» относительно осей координат определяются как:

$$t = \frac{I\omega}{M_{max}}; \quad (9)$$

где  $t$  – время разгона [с];

$I$  – момент инерции тела вокруг оси вращения [кг·м<sup>2</sup>];

$M_{max}$  – крутящий момент, действующий на тело [Нм];

$\omega_0$  – начальная угловая скорость [рад/с];

$\omega$  – угловая скорость [рад/с].

Изменяя параметры проведения виртуальных экспериментов, проведем оценку возможных погрешностей разработанных гироскопов и акселерометров.

**Описание моделей и программ.** Целью экспериментов было получение значений трехкоординатного акселерометра и трехкоординатного гироскопа как в статических сценах, при различной ориентации датчиков, так и в динамике – на этапах ускоренных и установившихся движений. Для экспериментов в CorreliaSim были построены виртуальные модели в соответствии с требованиями эксперимента. Разработанное программное обеспечение позволяло управлять по-

ложениями и движениями звеньев модели. Значения, получаемые при моделировании с гироскопов и акселерометров, записывались в файл для их последующей обработки и анализа [22].

**Результаты экспериментов, выводы.**

**а.** Анализ данных датчиков в различных положениях системы (статика). На рисунке 6 показано положение звеньев манипулятора при проведении эксперимента. Виртуальные датчики ускорения и угловой скорости установлены на «предплечье» и на «плече».

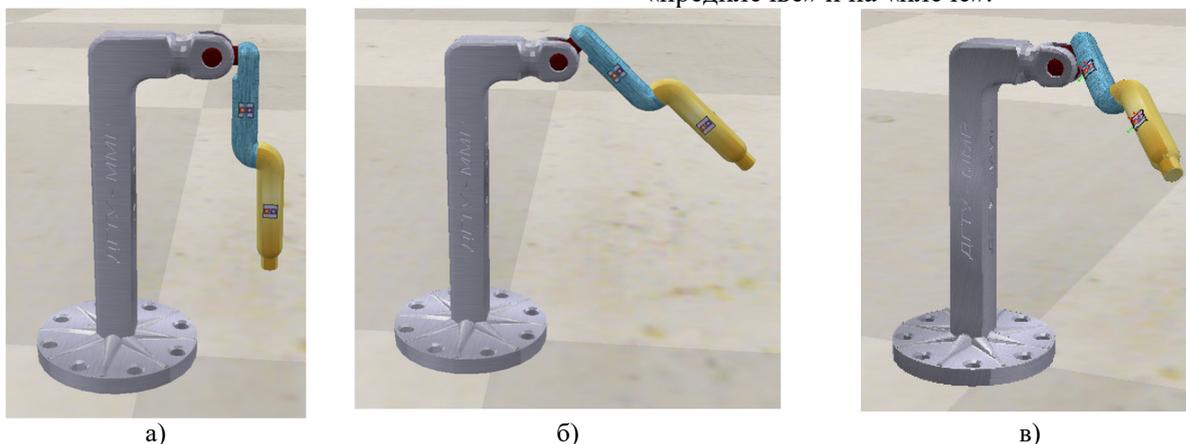


Рис. 6. Статические положения звеньев манипулятора для проверки значений акселерометров и гироскопов

На рисунке 7 показаны «сигналы» датчиков в разных положениях. Скорости перемещения звеньев при переходе из одного положения (позы) в другую выбраны малыми для того, чтобы сделать центростремительное ускорение

пренебрежимо малым. Поэтому изменение ускорений, показанное на графиках, соответствует распределению гравитационного ускорения по трем осям датчика.

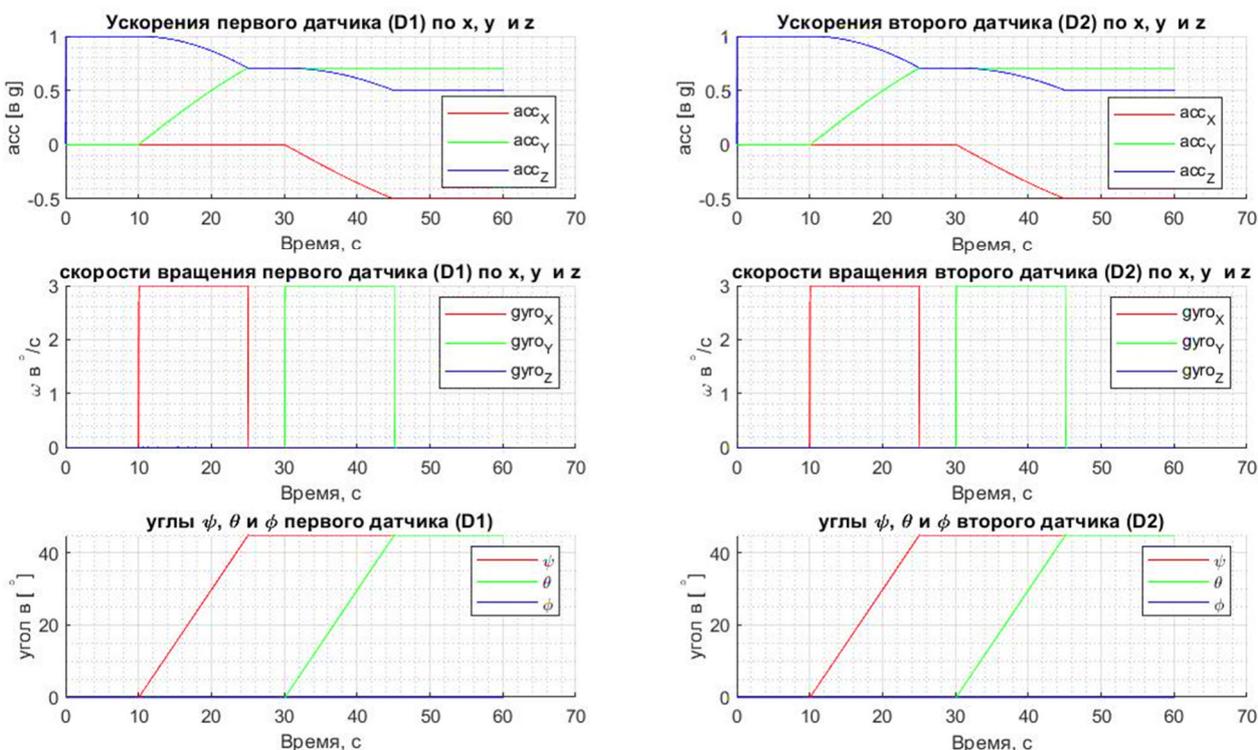


Рис. 7. Значения измеренных значений угловых скоростей и ускорений датчиков D1, D2 в положениях а, б, в

Как видно (рис. 7), при вращении вокруг одной оси гравитационная составляющая

пропорционально распределяется по двум другим перпендикулярным осям. Например, при

вращения (время от 25 до 30 секунд) на угол 45 градусов вокруг оси X получилось значение  $0,71g$  по каждой из двух других осей (рис. 2в, 6б и 7).

На рисунках можно выделить несколько зон, в каждой из которых происходит изменение положения модели или звенья находятся в статичном состоянии. На интервале 0–10 секунд модель статична, на интервале 10–25 секунд модель происходит движение с угловой скоростью 3 град/с вокруг оси X (переход от позы рис. 6а к рис. 6б). Сравнивая значения ускорений, измеряемых акселерометрами в процессе

эксперимента, было установлено, что виртуальные датчики ускорения обладают ошибкой порядка  $1e^{-4}$  м/с<sup>2</sup>, а погрешность гироскопов не превышала величины  $5e^{-4}$  рад/с.

**б.** При проведении второго эксперимента (вертикальный подъем и свободное падение тела) виртуальная модель, представляла собой твердое тело (куб), имеющий массу 5кг. Регистрировались значения ускорений и угловых скоростей тела в статическом его положении и при ускоренном движении. Цель эксперимента – оценка ошибок виртуальных датчиков при ускоренных линейных движениях.

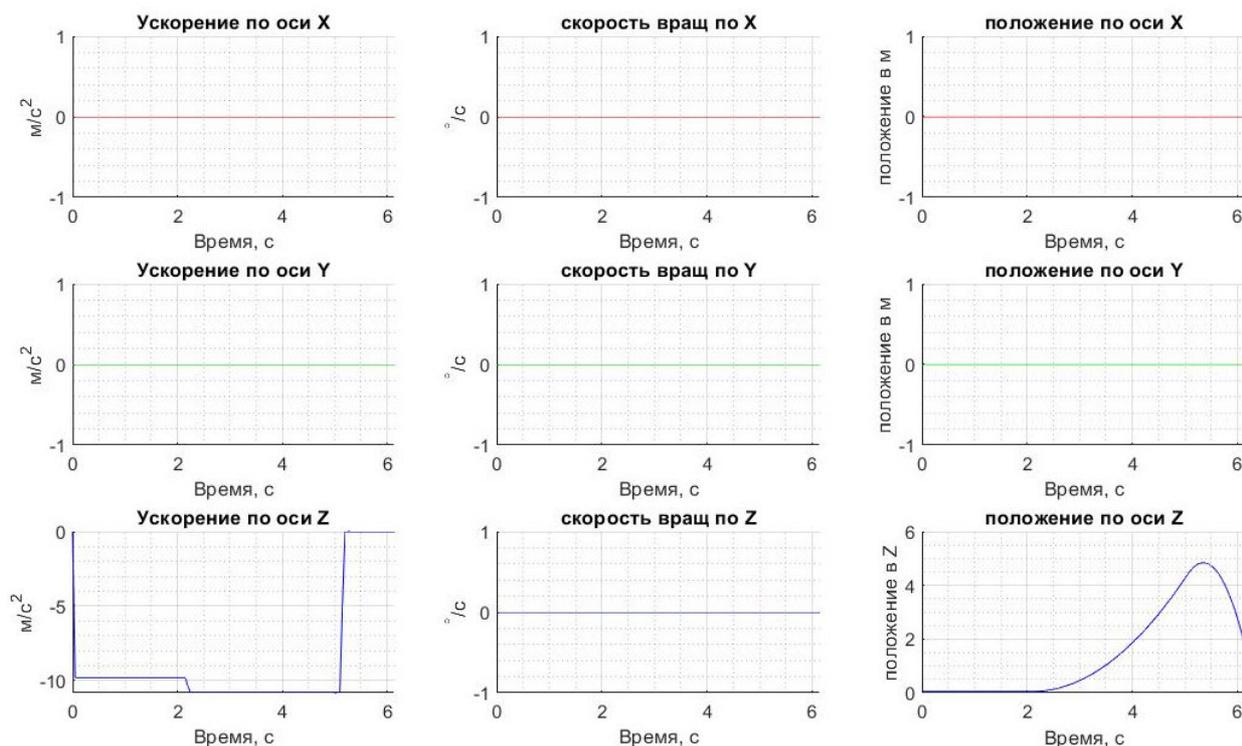


Рис. 8. Результаты эксперимента вертикального подъема и свободного падения

На графике изменения ускорений видно, что на интервале времени от 0 до 2.5 секунд датчик находится в покое – регистрируемое им ускорение равно  $-g$ , значения гироскопов равны 0 – вращений не происходит. После  $t=2.5$  с под действием внешней силы  $F_z = 54.05$  н на массу 5кг происходит ускоренное движение тела вверх. При этом ускорение, регистрируемое датчиком, составляет  $a_z = 1.1g$ . Движение вверх с этим ускорением происходит до момента времени  $t=5$  секунд. После чего внешняя сила исчезает, а тело начинает свободное падение, при котором регистрируется действующее ускорение  $a_z = 0$  (рис. 2б и рис. 8 от 5 с). В течение всего этого эксперимента вращательных движений не происходило. Изменения положения тела в

процессе эксперимента также показаны на рисунке 8.

В данном эксперименте установлено, что возникающие ускорения корректно измеряются виртуальным датчиком и ошибка измерения не превышала  $1e^{-5}$  м/с<sup>2</sup>.

**с** В следующем эксперименте датчик расположен на расстоянии 0,75 м от оси вращения тела, которое вращается с постоянной угловой скоростью  $\pi/4$  рад/с. Оси датчика сориентированы с осями глобальной системы координат (рис. 9). Цель эксперимента – определить наличие и величину ошибки измерения угловых скоростей виртуальных гироскопов при вращении относительно оси Z.

На рисунке 10 показано изменение значений (сигналов) виртуальных датчиков угловых скоростей и ускорений во время эксперимента.

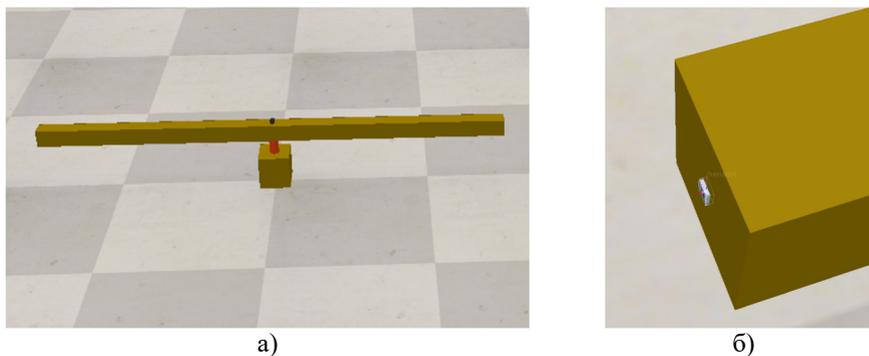


Рис. 9. Виртуальный стенд и положение датчика

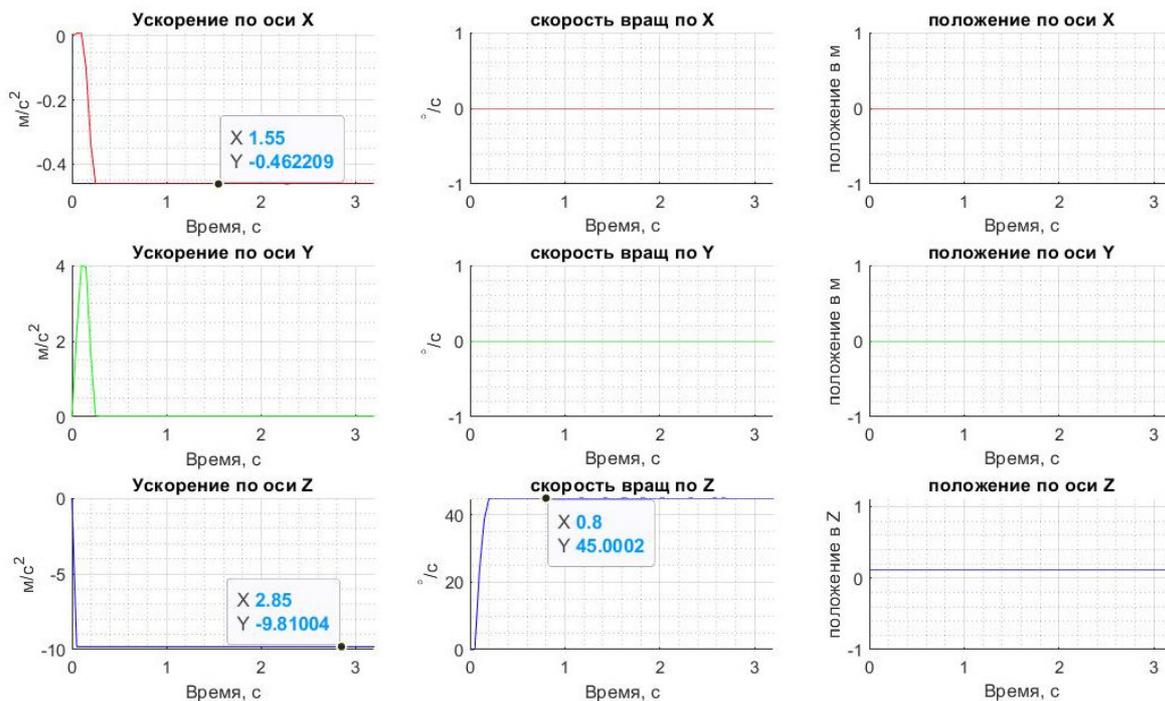


Рис. 10. Результат вращения вокруг оси z

При постоянной угловой скорости возникает радиальное ускорение  $a_r = -r \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$ , в данном случае его расчетное значение равно  $0.463 \text{ м/с}^2$ . Значения, полученные датчиком, соответствуют расчетным значениям, с погрешностями не более  $1e^{-4}$  как для ускорений, так и для угловых скоростей.

с. В этом эксперименте использовалась та же модель, как и на рисунке 9. Целью эксперимента являлось определить погрешности измере-

ния параметров движения, при ускоренном вращательном движении тела. Полученные экспериментально значения сравнивались с расчетными. Результаты приведены в таблице 1. Размеры вращающегося тела  $1,5 \text{ м} \times 0,05 \text{ м} \times 0,05 \text{ м}$ , момент инерции  $I = 0.265 \cdot m \text{ [м}^2\text{кг]}$ . Масса тела в эксперименте изменялась, как и действующий вращающий момент. Скорость, разгон до которой осуществлялся средой моделирования, указана в таблице.

Таблица 1

**Результаты экспериментов для определения погрешности между временем разгона в Copelliasim и аналитическим расчетным временем разгона**

№	$M_{max}$ [Нм]	$\omega$ [°/с]	$m$ [кг]	Расчётное время в [с] $t = \frac{I\omega}{M_{max}}$	Полученное время в copelliasim $t$ [с]	Погрешность времени разгона $dt$ [с]
1	5	45	10	0.417	0,399	0.018
2	5	45	5	0,208	0,2	0,008
3	5	30	5	0,138	0,15	0,012
4	15	90	5	0,138	0,15	0,012
5	15	45	10	0,138	0,15	0,012
6	15	30	20	0,185	0,2	0,015

На рисунке 11 показаны данные эксперимента, выполнявшегося для проверки виртуального гироскопа.

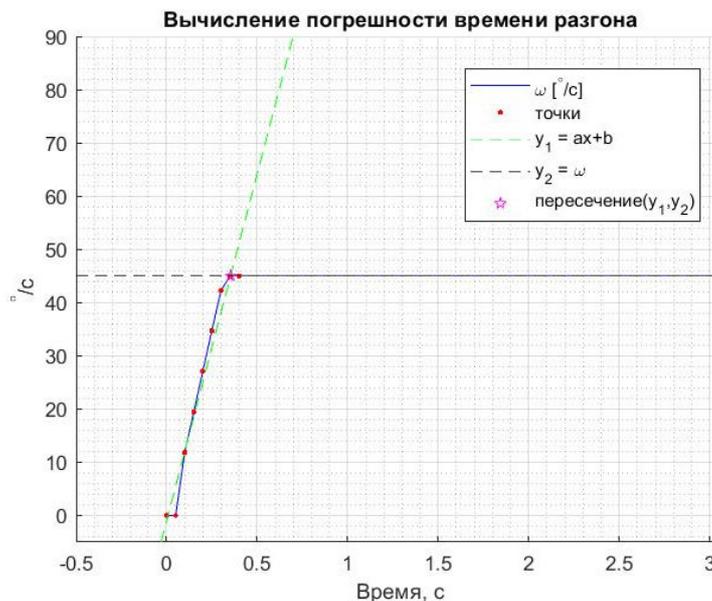


Рис. 11. Время разгона и линейная регрессия для точек во время разгона

Для компенсации ошибок определения времени окончания разгона выполнялась линеаризацию скорости вращения на этапе разгона. Уравнение прямой  $y_1$  (линейная регрессия) пересекается с линией заданного значения скорости (рис. 11) в некоторый момент времени. Полученное теоретическое время разгона и время разгона, определенное из эксперимента, позволяют оценить ошибку применения виртуальных гироскопов в динамической системе на примере окончания переходного процесса.

**Выводы.** Выполненная разработка и тестирование виртуальных акселерометров и гироскопов позволяют сделать следующие выводы:

1. Современные среды физического моделирования робототехнических систем имеют программный инструментарий, используя который возможно создание оригинальных виртуальных датчиков. В пакете CoppeliaSim разработанные авторами трехкоординатные акселерометры и гироскопы могут использоваться для решения задач инерциальной навигации при моделировании и исследовании реальных систем.

2. Применение виртуальных датчиков должно осуществляться после проверки их сигналов реально ожидаемым. Как и любая математическая модель разработанные датчики могут иметь ограниченную область измеряемых ускорений и угловых скоростей. При превышении допустимых значений адекватность модели не

обеспечивается, и ошибка может быть значительной.

3. Проведенные эксперименты показали результаты, позволяющие использовать разработанные виртуальные датчики для моделирования и исследования систем инерциальной навигации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алешкин В.В., Здражевский Р.А., Голованов П.Н., Марусич В.О. Методы и алгоритмы коррекции кинематических уравнений в задаче определения ориентации объекта // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Том 22, № 9. С. 494–504. DOI: 10.17587/mau.22.494-504
2. Robert B., Krzysztof J. Determining of an object orientation in 3D space using direction cosine matrix and non-stationary Kalman filter // Archives of Control Sciences. 2016. Vol. 26. No. 2. Pp. 223–244. DOI: 10.1515/acsc-2016-0013
3. Алексей Г. Применение МЭМС-технологии в навигации // компоненты и технологии. 2014. Том 153, № 4. С. 65–69.
4. Бутаков Н.А. Применимость инерциальных систем навигации в мобильных устройствах // International Journal of Open Information Technologies. 2014. Vol. 2 (5).
5. Жмудь В.А., Кузнецов К.А., Кондратьев Н.О., Трубин В.Г., Трубин М.В. Акселерометр и гироскоп MPU6050: первое включение на STM32 и исследование показаний в статике // Автоматика и программная инженерия. 2018. Том 25, № 3. С. 9–22.
6. Liang X., Xiaochi H., Yuanyuan Y., Ao S.,

- Xuan Y., Jiabin D., Shuai D. Research on IMU-Based Motion Attitude Acquisition and Motion Recognition // IEEE Sensors Journal. 2024. Vol. 24, Iss. 13. Pp. 20786–20793. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3394903
7. Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б. Оценка ошибок инерциальной навигации от параметров движения объекта // Актуальные проблемы науки и техники. 2023. С. 820–821.
8. Маммадов А.З. Модель инерциальной навигации для беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки. 2021. Том 86, № 5. С. 5–9. DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11683
9. Вагнер Й.Ф. Об измерении параметров движения спортсменов с помощью гироскопов и акселерометров. Технические аспекты // Гироскопия и навигация. 2017. Том 25, № 3. С. 3–31. DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.3.003-031
10. Kristel C., Leonardo B. A Comparative Analysis of Sensor Fusion Algorithms for Miniature IMU Measurements // International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. 2023. Pp. 239–244. DOI: 10.1109/ISITIA59021.2023.10220994
11. Abdullah E O., Mustafa E.A. A Practical Implementation of a Low-Cost 6-DOF IMU by Kalman Algorithm // European Journal of Science and Technology. 2021. Iss. 32. Pp. 167–170. DOI: 10.31590/ejosat.1040765
12. Sebastian O.H., Samuel W., Ruth T., Jane B., Christos K., Ravi V. An Extended Complementary Filter for Full-Body MARG Orientation Estimation // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2020. Vol. 25, Iss. 4. Pp. 2054–2064. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2992296
13. Rabab B., Laszlo D., Gyorgy K. Simulation and trajectory optimization of collaborating robots by application of solidworks and matlab software in industry 4.0. // Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2020. Vol. 18, iss. 4.
14. Mikhail I., Stanislav M., Sergei S. Robot description formats and approaches: Review // International Conference «Nonlinearity, Information and Robotics» (NIR). 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/NIR52917.2021.9666120
15. Andrew F., Jie W., Joshua A.M. How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion // ScienceDirect (Elsevier). 2022. Vol. 120. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102629
16. Zander B., Manuel L. Scripting Farming Simulator with Lua: Unlocking the Virtual Fields // Springer Nature. 2023. Pp. 45–83. DOI: 10.1007/979-8-8688-0060-3
17. Yan Z., Bin F., Guofeng Z., Xueming B. The Application of CoppeliaSim EDU in Robot Course Teaching // Journal of Education and Educational Research. 2024. Vol. 7. No. 1. DOI: 10.54097/as82qn67
18. Daniella T., Peter C. Understanding URDF: A Dataset and Analysis // IEEE Robotics and Automation Letters. 2024. Vol. 9, Iss. 5. Pp. 4479–4486. DOI: 10.1109/LRA.2024.3381482
19. Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Использование акселерометра ADXL335 для определения угла отклонения от вертикали // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2. С. 68–72.
20. Матвеев В.В., Кисловский Е.Ю., Мильченко Д.Н., Распопов В.Я., Телухин С.В., Погорелов М.Г., Лихошерст В.В. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Том 20, № 7. С. 437–442. DOI: 10.17587/mau.20.437-442
21. Eric R., Surya P., Marc F. CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520
22. Солонина А.И., Клионский Д.М., Меркучева Т.В., Перов С.Н. Цифровая обработка сигналов и MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 512 с.

#### Информация об авторах

**Лукьянов Евгений Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры робототехники и мехатроники. E-mail: lukeygan@gmail.com. SPIN РИНЦ:1047-6600. ORCID: 0000-0002-6363-6511. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

**Мпенгеле Эрик Бисамба**, аспирант, кафедра робототехники и мехатроники. E-mail: mpebiser@gmail.com. ORCID: 0009-0005-7500-5978. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

**Алхалили Алак Сабах Бадри**, аспирант, кафедра робототехники и мехатроники. E-mail: alaqsabah@yahoo.com. Донской государственный технический университет. Россия, 344000, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, площадь Гагарина, д. 1.

Поступила 25.10.2024 г.

© Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б., 2025

**Lukyanov E.A., \*Mpengele E.B., Alkhalili Alak S.B.**

Don State Technical University

\*E-mail: mpebiser@gmail.com

## CREATION OF A VIRTUAL SENSOR FOR MODELING INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS

**Abstract.** Determination of spatial orientation parameters of objects is an actual problem and is of crucial importance for various branches of science and technology. In most cases, this is done with the help of information-measuring systems that measure the position, orientation, and motion parameters of the controlled object. Mobile robotic systems widely use methods of inertial navigation. Debugging of such systems usually requires creation of a test bench and experimental testing of developed inertial navigation solutions. It is possible to reduce time and financial costs in the design and development of systems using inertial navigation if most of the experiments and tests are based on a mathematical model. Therefore, the methods of building virtual sensors for modeling the spatial motion of robotic systems become interesting, as well as the practical application of such sensors in the study of robotic systems.

The article is devoted to solving the problems of creating a virtual sensor for inertial navigation containing three-axis accelerometers and gyroscopes in the CoppeliaSim modeling environment. The work of such sensor was checked in linear and rotational displacement test cases, and the errors in determining acceleration and angular velocity by such sensor were evaluated.

**Keywords:** mobile robot, manipulator, gyroscope, accelerometer, signal processing, mathematical model

### REFERENCES

1. Aleshkin V.V., Zrazhevsky R.A., Golovanov P.N., Marusich V.O. Methods and Algorithms for Correcting Kinematic Equations in the Problem of Determining the Orientation of an Object [Metody i algoritmy korrektsii kinematicheskikh uravnenij v zadache opredeleniya orientatsii ob"ekta]. *Mechanics, Automation, Control*. 2021. Vol. 22, No. 9. Pp. 494–504. DOI: 10.17587/mau.22.494-504. (rus)
2. Robert B., Krzysztof J. Determining of an object orientation in 3D space using direction cosine matrix and non-stationary Kalman filter. *Archives of Control Sciences*. 2016. Vol. 26. No. 2. Pp. 223–244. DOI: 10.1515/acsc-2016-0013
3. Alexey G. Application of MEMS-technology in navigation [Primenenie MEMS-tekhnologii v navigatsii]. *Components and technologies*. 2014. Vol. 153, No. 4. Pp. 65–69. (rus)
4. Butakov N.A. Applicability of inertial navigation systems in mobile devices [Primenimost' inercial'nykh sistem navigatsii v mobil'nykh ustroystvakh]. *International Journal of Open Information Technologies*. 2014. Vol. 2, No. 5. (rus)
5. Zhmud V.A., Kuznetsov K.A., Kondratyev N.O., Trubin V.G., Trubin M.V. Accelerometer and Gyroscope MPU6050; the First Inclusion on STM32 and the Study of its Indications in Statics [Akselerometr i giroskop MPU6050: pervoe vklyuchenie na STM32 i issledovanie pokazanij v statike]. *Automation and software engineering*. 2018. Vol. 25, No 3. Pp. 9–22. (rus)
6. Liang X., Xiaochi H., Yuanyuan Y., Ao S., Xuan Y., Jiabin D., Shuai D. Research on IMU-Based Motion Attitude Acquisition and Motion Recognition. *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, Iss. 13. Pp. 20786–20793. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3394903
7. Lukyanov E.A., Mpengele E.B. Estimation of inertial navigation errors from the object motion parameters [Ocenka oshibok inercial'noj navigatsii ot parametrov dvizheniya ob"ekta]. *Actual problems of science and technology*. 2023. Pp. 820–821. (rus)
8. Mammadov A.Z. Model inertial navigation for unmanned aerial vehicles [Model' inercial'noj navigatsii dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov]. *Universum: Technical Sciences*. 2021. Vol. 86, No. 5. Pp. 5–9. DOI: 10.32743/UniTech.2021.86.5.11683. (rus)
9. Wagner J.F. About Motion Measurement in Sports Based on Gyroscopes and Accelerometers an Engineering Point of View [ob izmerenii parametrov dvizheniya sportsmenov s pomoshch'yu giroskopov i akselerometrov. *Tekhnicheskie aspekty*]. *Gyroscopy and Navigation*. 2017. Vol. 25, No 3. Pp. 3–31. DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.3.003-031. (rus)
10. Kristel C., Leonardo B. A Comparative Analysis of Sensor Fusion Algorithms for Miniature IMU Measurements. *International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications*. 2023. Pp. 239–244. DOI: 10.1109/ISITIA59021.2023.10220994
11. Abdullah E.O., Mustafa E.A. A Practical Implementation of a Low-Cost 6-DOF IMU by Kalman Algorithm. *European Journal of Science and*

Technology. 2021. Iss. 32. Pp. 167–170. DOI: 10.31590/ejosat.1040765

12. Sebastian O.H., Samuel W., Ruth T., Jane B., Christos K., Ravi V. An Extended Complementary Filter for Full-Body MARG Orientation Estimation. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2020. Vol. 25, Iss 4. Pp. 2054–2064. DOI: 10.1109/TMECH.2020.2992296

13. Rabab B., Laszlo D., Gyorgy K. Simulation and trajectory optimization of collaborating robots by application of solidworks and matlab software in industry 4.0. Academic Journal of Manufacturing Engineering. 2020. Vol. 18, iss. 4.

14. Mikhail I., Stanislav M., Sergei S. Robot description formats and approaches: Review. International Conference «Nonlinearity, Information and Robotics» (NIR). 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/NIR52917.2021.9666120

15. Andrew F., Jie W., Joshua A.M. how to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion. ScienceDirect (Elsevier). 2022. Vol. 120. DOI: 10.1016/j.simpat.2022.102629

16. Zander B., Manuel L. Scripting Farming Simulator with Lua: Unlocking the Virtual Fields. Springer Nature. 2023. Pp. 45–83. DOI: 10.1007/979-8-8688-0060-3

17. Yan Z., Bin F., Guofeng Z., Xueming B. The Application of CoppeliaSim EDU in Robot Course Teaching. Journal of Education and

Educational Research. 2024. Vol. 7, No. 1. DOI: 10.54097/as82qn67

18. Daniella T., Peter C. Understanding URDF: A Dataset and Analysis. IEEE Robotics and Automation Letters. 2024. Vol. 9, Iss. 5. Pp. 4479–4486. DOI: 10.1109/LRA.2024.3381482

19. Fedorov D.S., Ivoilov A.Yu., Zhmud V.A., Trubin V.G. The Use of Accelerometer ADXL335 for the Determination of Angle of Departure from Vertical Line [Ispol'zovanie akselerometra ADXL335 dlya opredeleniya ugla otkloneniya ot vertikali]. Automation and Software Engineering. 2014. No. 2. Pp. 68–72. (rus)

20. Matveev V.V., Kislovsky E.Yu, Milchenko D.N., Raspopov V.Ya., Telukhin S.V., Pogorelov M.G., Likhosherst V.V. Tracking System of Moving Objects on MEMS-Gyroscopes [Sistema soprovozhdeniya podvizhnykh ob"ektov na MEMS-giroskopah]. Mechatronics, automation, control. 2019. Vol. 20, No. 7. Pp. 437–442. DOI: 10.17587/mau.20.437-442. (rus)

21. Eric R., Surya P., Marc F. CoppeliaSim (formerly V-REP): a Versatile and Scalable Robot Simulation Framework. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2013. Pp. 1321–1326. DOI: 10.1109/IROS.2013.6696520

22. Solonina A.I., Kliensky D.M., Merkucheva T.V., Perov S.N. Digital Signal Processing and MATLAB [ifrovaya obrabotka signalov i MATLAB]. SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 512 p.

#### Information about the authors

**Lukyanov, Evgeny A.** PhD, Associate Professor of Robotics and Mechatronics Department. E-mail: lukevgan@gmail.com. SPIN RINZ:1047-6600. ORCID: 0000-0002-6363-6511. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1.

**Mpengele, Eric B.** PhD student, Department of Robotics and Mechatronics. E-mail: mpebiser@gmail.com. ORCID: 0009-0005-7500-5978. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don region, Gagarin Square, 1.

**Alkhalili Alak, Sabah B.** PhD student, Department of Robotics and Mechatronics. E-mail: alaqsabah@yahoo.com. Don State Technical University. Russia, 344000, Rostov-on-Don, Rostov-on-Don region, Gagarin Square, 1.

Received 25.10.2024

#### Для цитирования:

Лукьянов Е.А., Мпенгеле Э.Б., Алхалили Алак С.Б. Создание виртуального датчика для моделирования систем инерциальной навигации // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 3. С. 125–135. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135

#### For citation:

Lukyanov E.A., Mpengele E.B., Alkhalili Alak S.B. Creation of a virtual sensor for modeling inertial navigation systems. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 3. Pp. 125–135. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-3-125-135