

## Решение задачи определения ориентации объективов бинокля с помощью инерциальных датчиков

© В.В. Латонов<sup>1</sup>, Н.В. Беляков<sup>2</sup>, А.А. Петров<sup>2</sup>, Т.А. Семенихин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НЦМУ «Сверхзвук», Москва, 119234, Россия,

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, 119234, Россия

*Рассмотрено устройство, имеющее форму бинокля, которое состоит из двух твердых тел — объективов, связанных общей осью вращения. Приведено решение задачи абсолютного и относительного позиционирования каждого объектива этого устройства с помощью акселерометров, датчиков угловых скоростей и датчиков Холла, установленных в объективах. Для решения поставленной задачи разработан алгоритм, основанный на фильтре Маджвика. По этому алгоритму поступающие со всех датчиков данные используются для определения ориентации обоих объективов. Помимо информации, поступающей с датчиков, при решении задачи используется информация о геометрической связи, наложенной на систему, — общей оси вращения обоих объективов. Для верификации разработанного алгоритма использована система видеонализа ARTrack. Результаты работы фильтра верифицированы с помощью записей, полученных с системы видеонализа.*

**Ключевые слова:** трекинг, виртуальная реальность, акселерометр, датчик угловых скоростей, магнитометр, фильтр Маджвика

**Введение.** Устройства визуальной имитации необходимы для подготовки операторов сложных систем [1, 2]. Они позволяют имитировать зрительные образы, которые возникают перед глазами оператора при выполнении различных сложных задач.

Для работы устройств визуальной имитации часто приходится решать задачу отслеживания одного или нескольких подвижных объектов внутри небольшого помещения. Подобные задачи остаются актуальными для индустрии виртуальной реальности (VR), поскольку при погружении человека в виртуальную среду необходимо отслеживать положение его тела, а также предметов, с которыми он взаимодействует.

**Постановка задачи.** Устройство визуальной имитации имеет вид бинокля. В каждом объективе установлен дисплей, на который выводится изображение. Предполагается, что это устройство будет использоваться для имитации осмотра окружающей местности, как при использовании настоящего бинокля. Это устройство также может использоваться при управлении камерами по типу бинокля робота-лунохода, чтобы транслировать ему действия, совершаемые с биноклем на Земле, в целях их повторения роботом. Для этого требуется, чтобы выводимое на дисплеи изображение обновлялось в режиме реального времени в зависимости от положений объективов бинокля и можно было детектировать изменение их взаимного расположения.

Решаемая в работе задача — выведение алгоритма, позволяющего с помощью имеющихся в устройстве датчиков определять абсолютную ориентацию объективов бинокля в заданной неподвижной системе координат, а также относительную ориентацию объективов в двух подвижных системах координат, связанных с объективами.

**Обзор существующих работ.** Для решения задачи ориентации в обоих объективах установлены трехосный датчик угловых скоростей (ДУС), трехосный акселерометр и трехосный магнитометр (датчик Холла). Определение ориентации объективов относительно друг друга сводится к задаче выставки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) на подвижном основании, которая была детально исследована многими авторами. Эта задача часто рассматривается в работах, посвященных навигационным системам, предназначенным для авиации. Однако в авиационной индустрии нередко используются внешние измерения в дополнение к инерциальным датчикам. Например, в работе [3] для выставки БИНС на борту самолета используются измерения спутниковой навигационной системы, а в [4] — также системы воздушных сигналов и астросистемы.

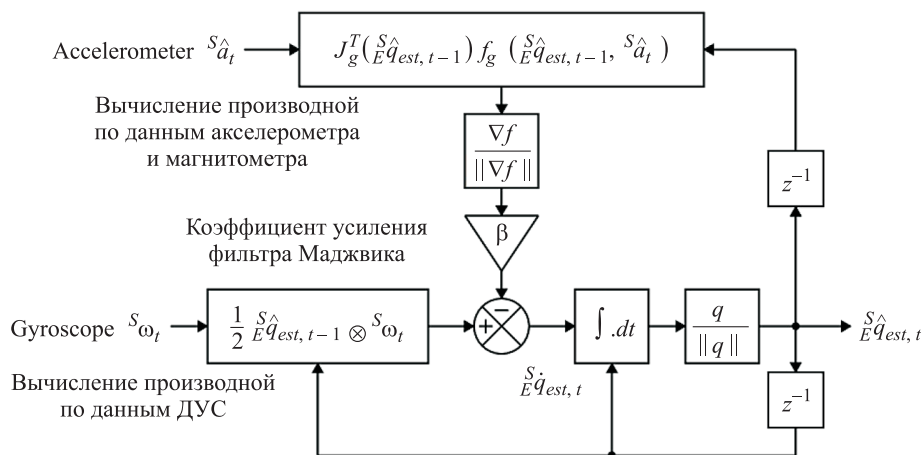


Рис. 1. Схема фильтра Маджвика

Кроме того, задача определения взаимной ориентации объективов сводится к задаче ориентации двух тел, связанных одной или двумя общими степенями свободы. Существует ряд работ, посвященных трекингу дву- и трехзвенников, в том числе в приложении к VR-задачам. В частности, в работе [5] рассмотрена задача трекинга трехзвенника со степенями свободы, свойственными человеческому пальцу, а в работе [6] изложена разработка перчатки, отвечающей за отслеживание положения руки человека. В решении применялся известный фильтр — фильтр Маджвика (Madgwick), схема которого приведена на рис. 1. В предлагаемой работе сделан акцент на статьи,

в которых выведены формулы для общего случая и для случая фильтрации данных, полученных с ДУС, акселерометра и магнитометра [7–11].

**Подход к решению.** Для решения задачи отслеживания ориентации объективов бинокля используются датчики, установленные в объективах. Применяется алгоритм оценки ориентации объективов с помощью данных, поступающих с датчиков.

Используем представление ориентации тела в качестве кватернионов. Верификацию разработанного алгоритма проводим с помощью системы видеоанализа ARTrack. На каждом объективе закреплены световозвращающие маркеры, положение которых в ходе экспериментов фиксировалось инфракрасными камерами. Измерения системы видеоанализа принимали как эталонные. С ними сравнивали результаты оценки ориентации, полученной с помощью разработанного алгоритма.

Идея оптимального алгоритма состоит в использовании данных предварительного испытания, в котором объективы и бинокль вращались вокруг оси симметрии бинокля. Вычисленная в этом опыте ось симметрии использовалась во всех последующих опытах для нахождения ориентации окуляров относительно друг друга.

Один из объективов выбирался ведущим — в алгоритме вычисляется именно его абсолютная ориентация, после чего ориентацию второго объектива находили уже относительно ведущего. Для этого был вычислен угол поворота вокруг оси симметрии ведущего объектива так, чтобы он совпадал по ориентации со вторым, причем, выбор того, какой из объективов взять ведущим, был произвольным.

Данные с используемых датчиков GY-80 и GY-801 получены с помощью плат Arduino Nano, запрограммированных в соответствующей среде Arduino IDE. Анализ данных и моделирование проводились в математическом пакете Wolfram Mathematica. Фильтр Маджвика был написан на языке C++.

Схема датчика GY-80 (взята с сайта электронных компонент AVRrobot.ru) приведена на рис. 2. Он состоит из трехосных акселерометра ADXL345B, магнитометра HMC5883L и ДУС L3G4200D. В состав GY-80 также входят датчик атмосферного давления и термометр, не используемые в задаче.

Качество разработанного алгоритма демонстрируют построенные графики. Точность, обеспечиваемая алгоритмом, позволяет использовать эту систему трекинга для технических комплексов в задачах виртуальной реальности.

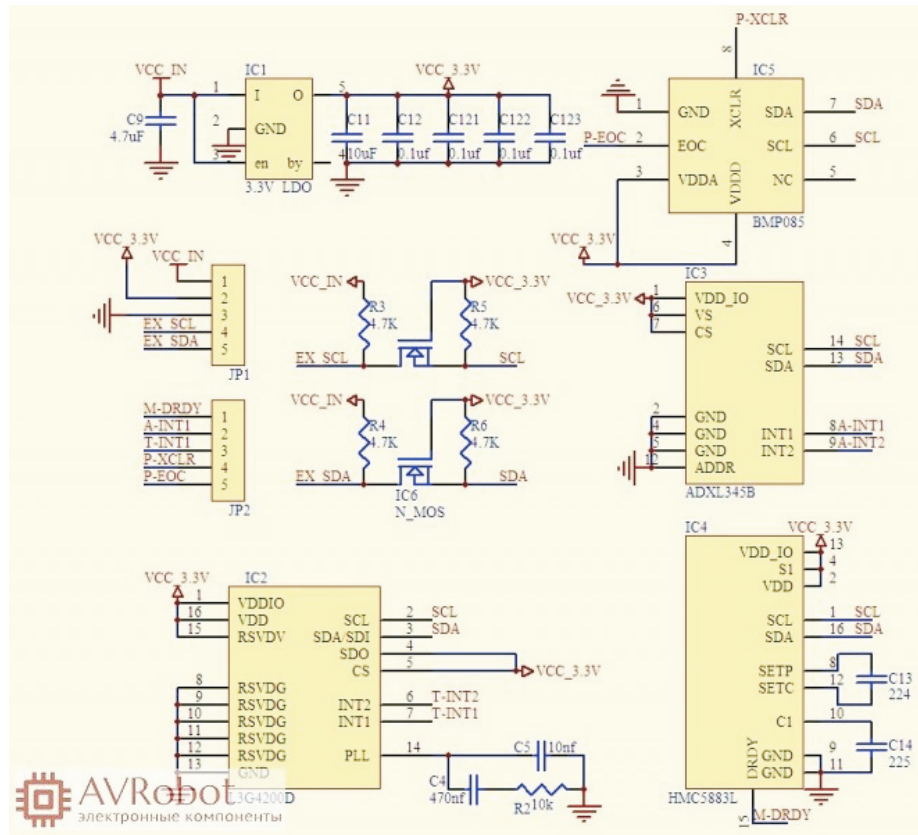


Рис. 2. Схема датчика GY-80 и его компонент

**Вывод уравнений.** Рассмотрим фильтр, который можно применить к данным с датчиков каждого объектива отдельно. Учитывая, что в системах датчиков есть акселерометр, магнитометр и ДУС, можно вычислить две траектории кватернионов двумя способами: первый — по векторам гравитации и магнитной индукции, которые в силу непараллельности однозначно задают ориентацию относительно некоторой глобальной системы координат (ГСК); второй — с помощью уравнения Пуассона, учитывающего угловые скорости с ДУС. В качестве ГСК возьмем систему, обладающую следующими свойствами: вектор гравитации сонаправлен  $Oz$ , вектор магнитной индукции лежит в плоскости  $Oxz$ . Благодаря перечисленным условиям эта система координат определяется единственным образом.

**Фильтр Маджвика.** Введем обозначения для кватернионов:  $Y_k$  — итоговая оценка кватерниона ориентации в момент  $t_k$ ;  $X_k$  — оценка кватерниона ориентации, вычисленная по данным ДУС;  $Z_k$  — оценка кватерниона ориентации, вычисленная по данным акселерометра и магнитометра, также в момент  $t_k$ .

Оценка  $Z_k$  определяется через векторы гравитации  $a_k$  и индукции  $m_k$ . Для определения  $Z_k$  вычислим матрицу поворота  $M_k$ , соответствующую кватерниону  $Z_k$ . Соответствующие столбцы этой матрицы обозначим  $M_k^1, M_k^2, M_k^3$ . В силу выбора ГСК можем записать

$$M_k^3 = \frac{\vec{a}_k}{\|\vec{a}_k\|_2}; \quad M_k^2 = \left[ M_k^3 \times \frac{\vec{m}_k}{\|\vec{m}_k\|_2} \right]; \quad M_k^1 = \left[ M_k^2 \times M_k^3 \right].$$

Из матрицы поворота нетрудно получить соответствующий кватернион.

Положим  $Y_0 = Z_0$ . Вектор угловых скоростей обозначим  $\omega_k$ . Запишем численное приближение уравнения Пуассона:

$$\dot{X}_k = \frac{1}{2} \omega_k \circ Y_k.$$

Для применения фильтра также найдем  $\dot{Z}_k$ . Рассмотрим поле векторов гравитации и магнитной индукции и некоторую вектор-функцию  $f_k$  от аргументов  $a_k$  и  $m_k$ , такую, что  $\dot{Z}_k$  будет параллелен  $\frac{\nabla f_k}{|\nabla f_k|}$  ( $\nabla$  – градиент). Поскольку нет различий в рассуждениях для гравитационного и магнитного полей, функцию  $f_k$  для некоторого поля  $d_k$  определим следующим образом:

$$f_k = \frac{1}{2} Z_k^{-1} \circ d_0 \circ Z_k - d_k.$$

При идеально выбранных  $Z_k$  эта функция равна векторному нулю, так как по определению  $\frac{1}{2} Z_k^{-1} \circ d_0 \circ Z_k$  является записью  $d_0$  в системе координат после поворота, т. е.  $d_k$ , в случае отсутствия шумов. В работе [8] показано, что нуль — точка экстремума этой функции, поэтому решение можно найти градиентным методом. Для следующих вычислений предварительно нормируем векторы гравитации и индукции в каждый момент времени. Исходя из выбора ГСК, после нормировки получим  $a_0 = (0, 0, 1)$ ,  $m_0 = (b_x, 0, b_z)$ . Учитывая это, запишем в один вектор компоненты определенной выше функции  $f_k$ , раскрыв кватернионное произведение, для гравитационного и магнитного полей, подставив вместо  $Z_k$  вычисленные на предыдущем шаге  $Y_k$ :

$$f_k = \begin{pmatrix} 2(Y_{1k}Y_{3k} - Y_{0k}Y_{2k}) - a_{xk} \\ 2(Y_{0k}Y_{1k} + Y_{2k}Y_{3k}) - a_{yk} \\ 2(1/2 - Y_{1k}^2 - Y_{2k}^2) - a_{zk} \\ 2b_x(1/2 - Y_{2k}^2 - Y_{3k}^2) + 2b_z(Y_{1k}Y_{3k} - Y_{0k}Y_{2k}) - m_{xk} \\ 2b_x(Y_{1k}Y_{2k} - Y_{0k}Y_{3k}) + 2b_z(Y_{0k}Y_{1k} + Y_{2k}Y_{3k}) - m_{yk} \\ 2b_x(Y_{0k}Y_{2k} + Y_{1k}Y_{3k}) + 2b_z(1/2 - Y_{1k}^2 - Y_{2k}^2) - m_{zk} \end{pmatrix}.$$

Определим  $J_k$  для удобства вычислений и градиент  $f_k$ , после чего, нормировав результат, найдем направление  $\dot{Z}_k$ :

$$J_k = \begin{pmatrix} -2Y_{2k} & 2Y_{1k} & 0 & -2b_xY_{3k} & -2b_xY_{3k} + 2b_zY_{1k} & 2b_xY_{2k} \\ 2Y_{3k} & 2Y_{0k} & -4Y_{1k} & 2b_zY_{3k} & 2b_xY_{2k} + 2b_zY_{0k} & 2b_xY_{3k} - 4b_zY_{1k} \\ -2Y_{0k} & 2Y_{3k} & -4Y_{2k} & -4b_xY_{2k} - 2b_zY_{0k} & 2b_xY_{1k} + 2b_zY_{3k} & 2b_xY_{0k} - 4b_zY_{2k} \\ 2Y_{1k} & 2Y_{2k} & 0 & -4b_xY_{3k} + 2b_zY_{1k} & -2b_xY_{0k} + 2b_zY_{2k} & 2b_xY_{1k} \end{pmatrix},$$

$$\nabla f_k = J_k f_k; \quad \dot{Z}_k = -\frac{1}{\rho} \frac{\nabla f_k}{|\nabla f_k|}; \quad \dot{Y}_k = \dot{X}_k - \rho \dot{Z}_k,$$

где  $\rho$  — коэффициент усиления фильтра Маджвика. Его вычисляют исходя из дисперсий ДУС, акселерометра и магнитометра. Однако числовой коэффициент  $\rho$ , постоянный при неизменных датчиках, подбирают экспериментально для конкретного набора датчиков.

После определения  $\rho$  вычислим  $Y_k$ :

$$Y_k = Y_{k-1} + (t_k - t_{k-1})\dot{Y}_k.$$

**Алгоритм решения задачи.** На первом шаге необходимо рассчитать кватернионы для каждого объектива отдельно, применяя рассмотренный выше фильтр. После этого произвольно выберем один из объективов ведущим ( $q_{1k}$ ,  $q_{2k}$  — кватернионы для ведущего и второго объектива соответственно) и выполним следующие вычисления в первом предложенном алгоритме.

1. Обозначим через  $e$  ось симметрии в системе координат ведущего объектива. Предположим, что она известна. Следовательно, в каждый момент времени можно составить выражение, равное нулю при отсутствии погрешности:

$$q_{1k} - \left( \cos\left(\frac{\varkappa_k}{2}\right), -\sin\left(\frac{\varkappa_k}{2}\right)\vec{e} \right) \circ q_{2k2}.$$

Здесь  $\varkappa_k$  — угол раствора между объективами (относительно начального положения окуляров), на который следует повернуть ведущий

окуляра против хода часовой стрелки вокруг  $e$ , чтобы он совпал со вторым. Угол можно найти, минимизировав эту норму. Суммировав по  $k$ , получим выражение, которое можно минимизировать по  $e$ :

$$\left( \sum_k (|q_{1k} - (\cos(\kappa_k/2), -\sin(\kappa_k/2)\bar{e})^\circ q_{2k}|_2 \mapsto \min_{\kappa_k \in \mathbb{R}}) \right) \mapsto \min_{e \in S_3}.$$

Аргументы  $e$  и  $\kappa_k$ , на которых достигается минимум этого выражения, — ось симметрии и угол раствора в каждый момент времени.

После этого вычислим кватернион для ведущего объектива

$$(q_{1k} + (\cos(\kappa_k/2), -\sin(\kappa_k/2)\bar{e})^\circ q_{2k}) / 2$$

и нормируем его. Ориентацию второго объектива найдем в результате доворота ведущего объектива вокруг оси симметрии на вычисленный угол раствора.

2. Второй алгоритм полностью повторяет первый, за исключением того, что заранее известна ось симметрии. Для ее поиска предварительно проведен опыт, в котором вращение бинокля и объективов происходило только вокруг искомой оси. Ее можно найти двумя независимыми способами, по показаниям акселерометра и магнитометра. Идея в обоих случаях одинакова: так как вектор, измеряемый ими, постоянен, то при вращении ведущего окуляра вокруг фиксированной оси эти векторы образуют боковую поверхность некоторого конуса. Тогда ось симметрии есть перпендикуляр к основанию этого конуса и ее можно найти методом наименьших квадратов:

$$\sum_{t_k} |Ax_k + By_k + Cz_k + 1| \mapsto \min_{A, B, C \in \mathbb{R}}.$$

Если нормировать эти коэффициенты, то они дают ось симметрии. В формуле без ограничения общности свободный член взят равным единице, поскольку маловероятно, что он нулевой; а в остальных случаях на него всегда можно разделить уравнение, благодаря чему существует единственный минимум функции.

**Эксперимент и результаты.** При совершении произвольных вращений для верификации алгоритма использовалась система ARTrack, которая вычисляла эталонный кватернион для трекеров, произвольно закрепленных на объективах. Поэтому добавилась задача о поиске кватерниона взаимной ориентации между эталонным и вычисленным кватернионами. Этот кватернион  $q$  можно найти, проведя предварительные опыты и выполнив следующие вычисления:

$$\left( \sum_k \|q_k^1 - q^{\circ} q_k^2\| \right) \mapsto \min_{q \in S_4},$$

где  $q_k^1, q_k^2$  — вычисленный по датчикам и эталонный кватернионы соответственно.

Два типа движения, из которых складывалось произвольное вращение, приводимое в эксперименте, показаны на рис. 3: первое — относительное движение объективов, однозначно определяемое углом раствора; второе — вращение бинокля, определяемое кватернионом.



Рис. 3. Схема движений для верификации алгоритма

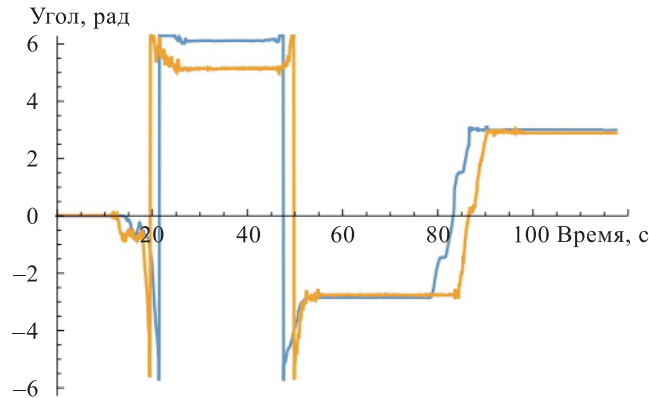
Для того чтобы сравнить вычисленные кватернионы с эталонными, использовался следующий алгоритм: в каждый момент времени выдачи данных датчиков брали пару значений кватернионов — вычисленный кватернион  $q_k^1$  и эталонный  $q_k^2$ . Всего для конкретного опыта получали  $N$  пар. Далее рассчитывали сумму скалярных произведений соответствующих пар кватернионов как обычных четырехмерных векторов  $(q_k^1, q_k^2)$ . Такая сумма равнялась максимум  $N$ , если совпадение было абсолютным, и минимум  $-N$ . В целях обобщения данного значения для любого опыта его нормировали делением на  $2N$  и прибавлением  $1/2$ . Тогда

$$\chi = \frac{1}{2} + \frac{\sum_{i=1}^N (q_i^1, q_i^2)}{2N},$$

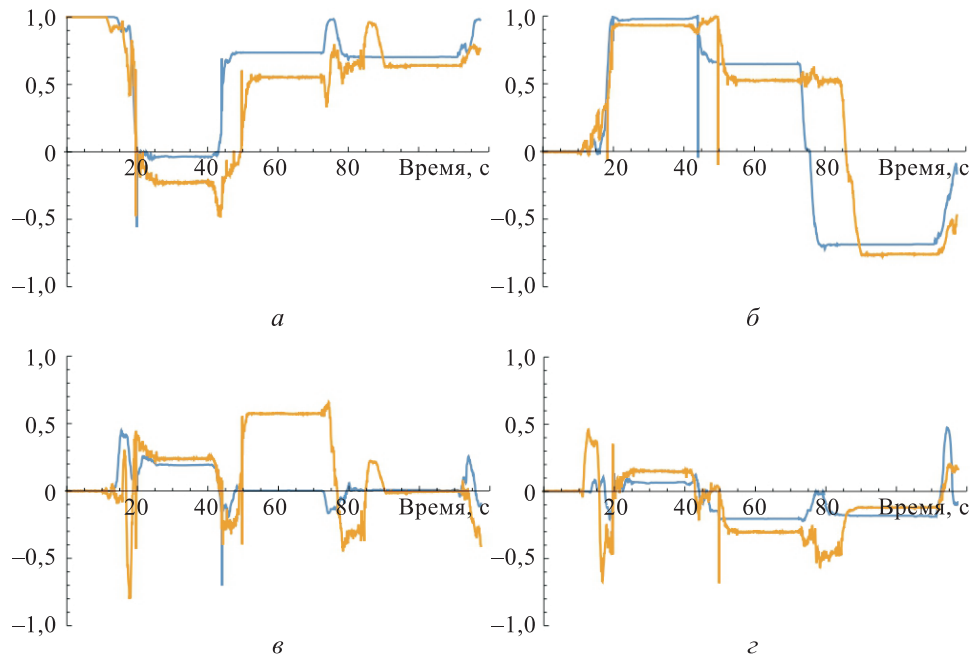
причем  $\chi \in [0, 1]$ ,  $\chi = 1$  — при наилучшей точности вычисления кватернионов,  $\chi < 1/2$  — при плохой.

Для иллюстрации результатов итоговой верификации приведем графики: эталонный и вычисленный углы раствора (рис. 4) и соответствующие компоненты кватерниона для ведущего объектива (рис. 5).





**Рис. 4.** Углы раствора относительно ведущего объектива:  
(—) — эталонный; (—) — вычисленный



**Рис. 5.** Компоненты кватерниона для ведущего объектива:  
*a* — итоговый скаляр; *б* — итоговая первая координата мнимой части; *в* — итоговая вторая координата мнимой части; *г* — итоговая третья координата мнимой части; (—) — эталонный; (—) — вычисленный

Из итоговых результатов можно получить кватернион ориентации для второго объектива ( $q_{1k}$ ,  $q_{2k}$  — кватернионы для ведущего и второго объектива соответственно):

$$q_{2k} = (\cos(\chi_k/2), \sin(\chi_k/2)\vec{e}) \circ q_{1k}.$$

Для каждого объектива была вычислена характеристика точности по приведенным ранее формулам. При использовании фильтра Маджвика итоговая точность для каждого оказалась одинаковой (с точностью до десятых долей процента), равной примерно 91 %. Это свидетельствует о том, что алгоритм можно использовать в реальных задачах.

**Заключение.** Рассмотрен алгоритм поиска ориентации двух объективов, имеющих общую ось симметрии. Полученная в результате вычислений точность алгоритма подтверждает возможность его применения на практике в задачах виртуальной реальности, в том числе в таких, как военные тренажеры. Раннее аналогичная задача решалась, например, при поиске ориентации трехзвенников по геометрическим свойствам, похожим на пальцы или руки человека; в этой задаче звенья обладали некоторой ассиметричностью. В рассмотренной задаче определения ориентации объективов бинокля оба объектива одинаковы; используемый при этом алгоритм можно применить для решения подобных задач, что дает больше свободы при выборе алгоритма в практической задаче, а это может повысить итоговое качество решения.

*Публикация подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020—2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (распоряжение Правительства РФ от 24 октября 2020 г. № 2744-р).*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кручинина А.П., Латонов В.В., Чертополохов В.А. Обзор технологий визуальной имитации в тренажерных системах. *Пилотируемые полеты в космос*, 2019, № 3, с. 89–107.
- [2] Роганов В.Р., Филиппенко В.О. Сравнительный анализ систем имитации визуальной обстановки. *Современные информационные технологии*, 2014, № 19, с. 162–166.
- [3] Салычев О.С., Мкртчян В.И. Подходы к выставке на подвижном основании для бесплатформенной инерциальной навигационной системы авиационного типа различного класса точности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1823>
- [4] Савельев В.М., Антонов Д.А. Выставка бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на подвижном основании. *Электронный журнал «Труды МАИ»*, 2011, № 45. URL: [http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN_2=2)
- [5] Kaczmarek P., Tomczyński J., Marnowski T. EKF-based method for kinematic configuration estimation of finger-like structure using low grade multi-IMU system. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 2016, pp. 552–557. DOI: 10.1109/MFI.2016.7849546
- [6] Henderson E.N. *An inertial measurement system for hand and finger tracking: Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering*. Boston State University, 2011. URL: <https://scholarworks.boisestate.edu/td/233/>

- [7] Zihajehzadeh S., Loh D., Lee M., Hoskinson R., Park E.J. A Cascaded Two-Step Kalman Filter for Estimation of Human Body Segment Orientation Using MEMSIMU. *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014.  
URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6945062>
- [8] Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, 2010, no. 25, pp. 113–118.
- [9] Kaiqiang Feng, Jie Li, Xiaoming Zhang, Chong Shen, Yu Bi, Tao Zheng, Jun Liu. A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm. *Sensors*, 2017. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2146/html>
- [10] Bruckner H.P., Spindeldreier C., Blume H. Modification and fixed-point analysis of a Kalman filter for orientation estimation based on 9-D inertial measurement unit data. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, Osaka, Japan, Jul. 2013, pp. 3953–3956.
- [11] Аль Битар Н., Гаврилов А.И. Интеграция бесплатформенной инерциальной и спутниковой навигационных систем на основе слабосвязанной схемы комплексирования с использованием расширенного фильтра Калмана. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1870>

Статья поступила в редакцию 18.10.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Латонов В.В., Беляков Н.В., Петров А.А., Семенихин Т.А. Решение задачи определения ориентации объективов бинокля с помощью инерциальных датчиков. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 2.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-2-2154>

**Латонов Василий Васильевич** — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник НЦМУ «Сверхзвук». e-mail: [WLatonov@gmail.com](mailto:WLatonov@gmail.com)

**Беляков Никита Викторович** — студент ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова. e-mail: [blood555glory@yandex.ru](mailto:blood555glory@yandex.ru)

**Петров Александр Андреевич** — студент ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова. e-mail: [a.petrov1232@yandex.ru](mailto:a.petrov1232@yandex.ru)

**Семенихин Тимофей Александрович** — студент ФКИ МГУ имени М. В. Ломоносова. e-mail: [ofmafowo@gmail.com](mailto:ofmafowo@gmail.com)

## Determining binocular lenses orientation using inertial sensors: problem solution

© V.V. Latonov<sup>1</sup>, N.V. Belyakov<sup>2</sup>, A.A. Petrov<sup>2</sup>, T.A. Semenikhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>World-class research center “Sverkhzvuk”, Moscow, 119234, Russia,

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234, Russia

*The paper considers a binocular-shaped device, which consists of two solid bodies — lenses connected by a common axis of rotation, and introduces a solution to the problem of the absolute and relative positioning of each of the lenses of the device using accelerometers, angular velocity sensors and Hall sensors installed in each of the lenses. To solve the problem, we developed an algorithm based on the Madgwick filter. The algorithm uses data from all sensors and determines the orientation of both lenses from this data. In addition to the information received from the sensors, the solution of the problem uses information about the geometric relationship imposed on the system — the common axis of rotation of both lenses. The ARTrack video analysis system was used to verify the obtained algorithm. The results of the filter operation were verified using the records received from the video analysis system.*

**Keywords:** tracking, virtual reality, accelerometer, AVS, magnetometer, Madgwick filter

*The paper was prepared within the of the Program of creation and development of the world-class research center “Sverkhzvuk” in 2020–2025 under financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Order of the Government of the Russian Federation dated 24 October 2020 No. 2744-p).*

### REFERENCES

- [1] Kruchinina A.P., Latonov V.V., Chertopolokhov V.A. *Pilotiruemye polety v kosmos — Manned Spaceflight*, 2019, no. 3, pp. 89–107.
- [2] Roganov V.R., Filippenko V.O. *Sovremennyye informatsionnyye tekhnologii (Modern information technologies)*, 2014, no. 19, pp. 162–166.
- [3] Salychev O.S., Mkrtychyan V.I. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 11.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-11-1823>
- [4] Savelev V.M., Antonov D.A. *Trudy MAI (MAI Proceedings)*, 2011, no. 45. Available at: [http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN\\_2=2](http://trudymai.ru/published.php?ID=25497&PAGEN_2=2)
- [5] Kaczmarek P., Tomczyrnski J., Marnkowski T. EKF-based method for kinematic configuration estimation of finger-like structure using low grade multi-IMU system. *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, 2016, pp. 552–557. DOI: 10.1109/MFI.2016.7849546
- [6] Henderson E.N. An inertial measurement system for hand and finger tracking, *Thesis for the degree of Master of Science in Electrical Engineering*. Boston State University, 2011. Available at: <https://scholarworks.boisestate.edu/td/233/>
- [7] Zihajezadeh S., Loh D., Lee M., Hoskinson R., Park E.J. A Cascaded Two-Step Kalman Filter for Estimation of Human Body Segment Orientation Using MEMSIMU. *36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2014. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6945062>
- [8] Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. *Report x-io and University of Bristol (UK)*, 2010, no. 25, pp.113–118.

- [9] Kaiqiang Feng, Jie Li, Xiaoming Zhang, Chong Shen, Yu Bi, Tao Zheng, Jun Liu. A new quaternion-based Kalman filter for real-time attitude estimation using the two-step geometrically-intuitive correction algorithm. *Sensors*, 2017. Available at: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2146/html>
- [10] Bruckner H.P., Spindeldreier C., Blume H. Modification and fixed-point analysis of a Kalman filter for orientation estimation based on 9-D inertial measurement unit data. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* Osaka, Japan, Jul. 2013, pp. 3953–3956.
- [11] Al Bitar N., Gavrilov A.I. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1870>

**Latonov V.V.**, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, World-class research center “Sverkhzvuk”. e-mail: [WLatonov@gmail.com](mailto:WLatonov@gmail.com)

**Belyakov N.V.**, student, Faculty of Cosmic Research, Lomonosov Moscow State University. e-mail: [blood555glory@yandex.ru](mailto:blood555glory@yandex.ru)

**Petrov A.A.**, student, Faculty of Cosmic Research, Lomonosov Moscow State University. e-mail: [a.petrov1232@yandex.ru](mailto:a.petrov1232@yandex.ru)

**Semenikhin T.A.**, student, Faculty of Cosmic Research, Lomonosov Moscow State University. e-mail: [ofmafowo@gmail.com](mailto:ofmafowo@gmail.com)