

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041257**(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.09.30

(21) Номер заявки
201900576

(22) Дата подачи заявки
2019.12.04

(51) Int. Cl. **G01C 21/18** (2006.01)
G05D 1/08 (2006.01)
G06F 3/0346 (2006.01)

(54) СПОСОБ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПРИБОРА В ПРОСТРАНСТВЕ

(43) **2021.06.30**

(96) **2019000128 (RU) 2019.12.04**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"МИКС" (RU)**

(56) RU-C2-2253092
US-A1-20160363460
EP-A1-1901153
RU-C2-2565597
US-A1-20130301905

(72) Изобретатель:
**Морозов Арсений Леонидович,
Нигматуллин Равиль Рашидович,
Вдовин Алексей Юрьевич, Тарасов
Максим Леонидович, Христофоров
Станислав Викторович, Масленников
Глеб Германович (RU)**

(74) Представитель:
Котлов Д.В. (RU)

(57) Изобретение относится к области измерительной техники и предназначено для вычисления ориентации объекта в пространстве. Технический результат заключается в преодолении недостатков известных из уровня техники решений, т.е. потребление меньших вычислительных ресурсов; обеспечение сходимости вычислений за один отсчет. Компьютерно-реализуемый способ вычисления ориентации в пространстве, выполняющийся на вычислительном устройстве, содержащий процессор, посредством которого осуществляются этапы, на которых: а) получают измерения акселерометра и гироскопа; б) осуществляют вычисление кватерниона; в) осуществляют вычисление оценки текущей ориентации; г) выполняют нормировку оценки текущей ориентации; д) осуществляют вычисление градиента целевой функции; е) выполняют нормировку градиента; ж) осуществляют вычисление корректировочной ориентации; з) выполняют корректировку ориентации; и) выполняют нормировку откорректированной ориентации; к) проверяют условие превышения заранее заданного порогового значения корректировочной ориентации; л) осуществляют проверку условия превышения номера текущей ориентации максимального количества корректировок; м) выдают нормированное значение ориентации на выход алгоритма в случае выполнения хотя бы одного из условий к) или м).

041257 B1

041257 B1

Область техники

Настоящее техническое решение относится к области вычислительной техники, в частности, к области измерительной техники и предназначено для вычисления ориентации объекта в пространстве.

Уровень техники

Задача трехосевых датчиков угловой скорости, а именно гироскопов, измерять изменение угла со временем. Интегрируя по времени эти измерения получают ориентацию.

Гироскопы на базе микроэлектромеханических сенсоров (МЭМС) имеют высокий уровень случайных шумов и сдвиги нуля, меняющиеся со временем. Интегрирование этих погрешностей приводит к быстрому возрастанию ошибки, что делает такой подход непригодным для большинства задач.

Для компенсации этих ошибок и уточнения измерений вводят, дополнительно к гироскопам, трехосевые акселерометры.

Акселерометр измеряет кажущееся ускорение, которое является векторной разностью ускорения движения и ускорения свободного падения. При отсутствии движения кажущееся ускорение равно ускорению свободного падения, ориентация которого известна.

Таким образом, в состоянии покоя акселерометр можно использовать для вычисления ориентации, относительно ускорения свободного падения. Однако акселерометры, как и гироскопы, подвержены воздействию случайных шумов, а также во время движения кажущееся ускорение перестает быть равно ускорению свободного падения, так как появляется составляющая ускорения движения.

Задачей вычисления ориентации на базе МЭМС акселерометров и гироскопов является оптимальная фильтрация измерений от обоих источников информации - акселерометров и гироскопов - для получения точного моментального значения ориентации. Так

же, с практической точки зрения, желательно, чтобы решение данной задачи требовало минимального количества вычислений и минимальной частоты дискретизации датчиков.

Наиболее простым и очевидным способом решения данной задачи является переключение между датчиками: если угловая скорость или ускорение движения больше некоторого заданного значения, то ориентация вычисляется по гироскопу, если меньше - по акселерометру.

Недостатком данного подхода является низкая точность при малых амплитудах движения, а также при длительном движении.

Из уровня техники известно решение, которое описывает способ определения ориентации блок инерциальных измерителей (US20160327396A1, опублик. 10.10.2016). В данном способе угловая скорость и кажущиеся ускорения сравниваются с пороговыми значениями и на основе этого принимаются решения об участии измерений от акселерометра и гироскопа в вычислении ориентации.

Кроме того, на текущем уровне техники наиболее распространенными являются способы на основе фильтра Калмана.

Различные модификации фильтра Калмана широко применяются в коммерческих продуктах:

MTi-1 Series, MTi-10 Series, MTi-100 Series, MTi-600 Series от Xsens [1];

Ellipse Micro Series, Ellipse 2 Series, Ekinox Series, Apogee Series от SBG-Systems [2];

VN-100/110, VN-200/210, VN-300/310 от Vectornav [3];

Bosch Sensortec FusionLib от Bosch-Sensortec [4];

Embedded Motion Driver от Invensense [5] и др.

Данный подход позволяет точно вычислить ориентацию, однако имеет следующие недостатки: он создает большую вычислительную нагрузку на процессор, что ведет к повышению энергопотребления и увеличению стоимости всего изделия, так как требуется достаточно мощный процессор;

необходима высокая частота дискретизации измерений датчиков, что также ограничивает применимость данного способа по следующим причинам:

а) с увеличением частоты дискретизации увеличивается энергопотребление и датчика, и процессора, который его опрашивает;

б) некоторые, в частности, высокотемпературные датчики работают только на низкой частоте дискретизации, недостаточной для корректной работы способов на основе фильтра Калмана;

в) с повышением частоты дискретизации увеличивается уровень шумов датчика, что ведет к снижению точности вычисления ориентации.

Известен способ вычисления ориентации с использованием комплиментарного фильтра и метода наименьших квадратов, описанный в патенте US 7089148B1, опублик. 16.10.2004. Недостатком этого способа является аппроксимация методом наименьших квадратов, что создает большую вычислительную нагрузку на процессор.

Наиболее близким к заявленному решению является способ, раскрытый в патенте US 9068843B1, опублик. 30.06.2015, а также в отчете Себастьяна О. Х. Маджвика (Sebastian O. H. Madgwick) "An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/Magnetic Sensor Arrays. Report x-io and University of Bristol (UK)".

Данный способ основан на использовании метода градиентного спуска для вычисления ориентации по акселерометру и комплиментарного фильтра для объединения вычислений ориентации по акселерометру и гироскопу. Данный способ является одним из наиболее эффективных с точки зрения требований к вычислительным ресурсам.

Недостатком данного подхода является низкая скорость сходимости результатов вычисления ориентации в следующих случаях:

- если угловая скорость выходит за диапазон измерения датчиков;
- если реальная ориентация успевает измениться между измерениями датчиков;
- при перезагрузке прибора.

Для того, чтобы скорость сходимости была приемлемой, ставят датчики с более высоким диапазоном и увеличивают частоту дискретизации. Повышение диапазона измерений ведет к снижению точности, увеличение частоты дискретизации ведет к повышению уровня шумов и энергопотребления.

Кроме того, не все результаты вычисления ориентации, которые появляются на выходе алгоритма, соответствуют реальной ориентации, так как при каждом изменении реальной ориентации требуется какое-то количество итераций алгоритма и, соответственно, отсчетов, чтобы обеспечить сходимость вычисляемой ориентации.

Другим недостатком данного способа является то, что коэффициент β регулирует две характеристики - разрешающую способность и скорость сходимости вычислений - что ведет к невозможности удовлетворить требования к обоим характеристикам сразу.

Сущность изобретения

Технической проблемой, на решение которой направлено заявленное техническое решение, является создание компьютерно-реализуемого способа вычисления ориентации прибора в пространстве, который охарактеризован в независимом пункте формулы.

Технический результат заключается в разработке такого способа вычисления ориентации на основе измерений микроэлектромеханических датчиков акселерометров и гироскопов, который преодолест недостатки известных из уровня техники решений, т.е. потребует меньших вычислительных ресурсов; обеспечит сходимость вычислений за один отсчет; точность результата вычислений не будет зависеть от диапазона измерений и частоты дискретизации датчиков.

В предпочтительном варианте реализации заявлен компьютерно-реализуемый способ вычисления ориентации прибора в пространстве, включающий в себя этапы, на которых:

- а) получают измерения акселерометра и гироскопа;
- б) осуществляют вычисление кватерниона, описывающего скорость изменения ориентации в земной системе координат;
- в) осуществляют вычисление оценки текущей ориентации путем интегрирования кватерниона;
- г) выполняют нормировку оценки текущей ориентации;
- д) осуществляют вычисление градиента целевой функции, причем при первой корректировке для вычисления градиента используется нормированная оценка ориентации, полученная в пункте г) при последующих корректировках, для вычисления градиента используется нормированная ориентация, вычисленная в пункте и) при предыдущих корректировках;
- е) выполняют нормировку градиента;
- ж) осуществляют вычисление корректировочной ориентации путем умножения нормированного градиента на шаговый коэффициент;
- з) выполняют корректировку ориентации путем вычитания из вычисленной ориентации корректировочной ориентации, причем при первой корректировке в качестве вычисленной ориентации используется нормированная оценка ориентации, полученная в пункте г) при последующих корректировках, в качестве вычисленной ориентации используется нормированная ориентация, вычисленная в пункте и) при предыдущих корректировках;
- и) выполняют нормировку откорректированной ориентации;
- к) проверяют условие превышения заранее заданного порогового значения корректировочной ориентации;
- л) осуществляют проверку условия превышения номера текущей ориентации максимального количества корректировок;
- м) выдают нормированное значение ориентации на выход алгоритма в случае выполнения хотя бы одного из условий к) или л); повтор пунктов с д) по л) до тех пор, пока не выполнится хотя бы одно из условий.

Описание чертежей

Реализация изобретения будет описана в дальнейшем в соответствии с прилагаемыми чертежами, которые представлены для пояснения сути изобретения и никоим образом не ограничивают область изобретения.

К заявке прилагаются следующие чертежи:

Фиг. 1 иллюстрирует оси измерений;

фиг. 2 иллюстрирует упрощенную схему заявленного способа.

Детальное описание изобретения

В приведенном ниже подробном описании реализации изобретения приведены многочисленные детали реализации, призванные обеспечить отчетливое понимание настоящего изобретения. Однако квалифицированному в предметной области специалисту будет очевидно, каким образом можно использо-

вать настоящее изобретение, как с данными деталями реализации, так и без них. В других случаях хорошо известные методы, процедуры и компоненты не были описаны подробно, чтобы не затруднять излишне понимание особенностей настоящего изобретения.

Кроме того, из приведенного изложения будет ясно, что изобретение не ограничивается приведенной реализацией. Многочисленные возможные модификации, изменения, вариации и замены, сохраняющие суть и форму настоящего изобретения, будут очевидными для квалифицированных в предметной области специалистов.

Для достижения указанного выше технического результата в качестве настоящего изобретения предлагается способ обработки измерений инерциальных микроэлектромеханических акселерометров и гироскопов для вычисления ориентации в пространстве.

Первым этапом в заявленном решении является получение измерений акселерометра и гироскопа.

После чего на основе измерений гироскопа вычисляется оценка текущей ориентации. С помощью оценки текущей ориентации и измерений акселерометра вычисляется корректировочная ориентация, которая является произведением шагового коэффициента и градиент целевой функции. Целевая функция более подробно будет описана в заявленном решении ниже.

Далее полученная ранее оценка текущей ориентации корректируется путем вычитания корректировочной ориентации. После этого проверяются условия прекращения корректировки путем проверки выполнения двух условий:

меньше ли корректировочная ориентация заранее заданного порогового значения (первое условие); и превысило ли количество корректировок некоторое заранее заданное максимальное количество корректировок (второе условие).

Если ни одно из условий не выполнилось, то вычисление корректировочной ориентации и корректировка повторяются снова.

На всех корректировках, кроме первой, вместо оценки ориентации, полученной с помощью измерений гироскопа, используется откорректированная ориентация, вычисленная на предыдущей корректировке.

Если выполнилось хотя бы одного из условий прекращения корректировки, то корректировка завершается. Полученный результат поступает на выход алгоритма.

Особенностью заявленного решения является то, что в данном алгоритме отсутствуют требования к частоте дискретизации датчиков, поэтому датчик может подбираться исходя из других, более важных характеристик, таких как, например: точность, размер, стоимость и т.д.

Ещё одной особенностью заявленного решения является то, что при превышении угловой скорости диапазона измерений гироскопа не потребуется дополнительных отсчетов, чтобы обеспечить сходимость вычислений. Сходимость обеспечивается за счет итеративных корректировок внутри алгоритма.

Ещё одной особенностью этого способа является то, что шаговый коэффициент задается как константа. Значение этой константы выбирается эмпирически исходя из того, позволяет ли выбранный коэффициент добиться требуемой точности.

Ещё одной особенностью заявленного решения является то, что максимально возможное количество итераций градиентного спуска выбирается исходя из вычислительной мощности процессора и из скорости сходимости алгоритма с выбранным шаговым коэффициентом.

Ещё одной особенностью этого способа является то, что пороговое значение условия завершения корректировок выбирается исходя из требуемого разрешения по ориентации.

Опционально допускается исключение проверки на превышение количества совершенных корректировок некоторого заранее заданного максимального количества корректировок. В таком случае корректировка будет происходить до тех пор, пока корректировочная ориентация не станет меньше некоторого заранее заданного порогового значения.

Опционально допускается, чтобы шаговый коэффициент задавался переменной, которая увеличивается, если корректировочная ориентация больше некоторого дополнительного порога (для увеличения скорости вычислений); уменьшается, если корректировочная ориентация меньше некоторого другого дополнительного порога (для увеличения точности вычисленной ориентации).

В заявленном решении для представления ориентации используются углы Эйлера, матрицы поворота и кватернионы.

При вычислении углов Эйлера и матриц поворота используются прямые и обратные тригонометрические функции, которые требуют большое количество математических операций.

Вычисление кватерниона, описывающего ориентацию в пространстве, требует примерно в 100 раз меньшее количество математических операций.

Многие существующие способы для вычисления ориентации используют кватернионы. При необходимости, после вычисления кватерниона, описывающего ориентацию, этот кватернион может быть преобразован в углы Эйлера или матрицу поворота.

В заявленном решении, с целью минимизации требований к вычислительным ресурсам, для вычисления ориентации также используются кватернионы. Математика кватернионов хорошо известна и не рассматривается в данном изобретении. Поэтому известные формулы, связанные с операциями между

кватернионами, даны без вывода.

Ориентация прибора показывает, на сколько оси ортогонального базиса прибора (далее оси прибора) отклонены от осей земной системы координат. Если развернуть прибор так, чтобы его оси совпали с осями земной системы координат, то ось Z прибора будет направлена вертикально вверх, от Земли, а оси X и Y будут направлены туда, куда были направлены оси X и Y прибора в момент начала измерений. При этом необязательно, чтобы на момент начала измерений ось Z прибора совпадала с осью Z земной системы координат (начальное положение осей X и Y прибора определяет направление осей X и Y земной системы координат).

Для осуществления заявленного способа необходимы измерения трех-осевого акселерометра и трех-осевого гироскопа или с набора акселерометров и гироскопов, обеспечивающих измерения по трем ортогональным осям. Измерения акселерометра и гироскопа должны быть приведены к осям прибора. Взаимное расположение осей акселерометра и гироскопа показано на фиг. 1.

Кватернион, описывающий текущее значение ориентации, обозначается ${}^S\hat{q}$. Верхний индекс в обозначении указывает систему координат, относительно которой задан кватернион, нижний индекс указывает опорную систему координат. Индекс "S" обозначает систему координат прибора, а индекс "D" - земную систему координат.

В заявленном решении способ начинается с получения измерений акселерометра и гироскопа. Вектора измерений акселерометра и гироскопа, выраженные в форме кватернионов m_a и m_ω соответственно, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} m_a &= [0 \quad ax \quad ay \quad az] \\ m_\omega &= [0 \quad \omega x \quad \omega y \quad \omega z] \end{aligned} \quad (1)$$

Следующим этапом осуществляют вычисление оценки текущей ориентации прибора в пространстве с помощью измерений гироскопа. Для этого необходимо вычислить кватернион ${}^D\dot{q}$, описывающий скорость изменения ориентации в земной системе координат. Точка над обозначением кватерниона показывает, что данный кватернион описывает скорость.

Кватернион ${}^D\dot{q}$ вычисляется согласно известному выражению:

$${}^D\dot{q} = \frac{1}{2} {}^S\hat{q} \otimes m_\omega \quad (2)$$

где ${}^S\hat{q}$ - это кватернион, описывающий текущую ориентацию прибора в пространстве.

Оценка ориентации ${}^D\hat{q}_{\omega,t}$ в момент времени t вычисляется путем интегрирования ${}^D\dot{q}$ по времени:

$${}^D\hat{q}_{\omega,t} = {}^D\hat{q}_{t-1} + {}^D\dot{q} \Delta t = {}^D\hat{q}_{t-1} + \frac{1}{2} {}^S\hat{q}_{t-1} \otimes m_\omega \Delta t \quad (3)$$

Вычисленная оценка ориентации ${}^D\hat{q}_{\omega,t}$ нормируется к единице.

Акселерометр измеряет кажущееся ускорение, которое является разностью ускорения движения и ускорения свободного падения.

В моменты, когда прибор неподвижен, акселерометр измеряет вектор ускорения свободного падения. Координаты вектора ускорения свободного падения известны в земной системе координат, таким образом можно вычислить положение системы координат прибора относительно земной системы координат.

В предложенном способе это решается задачей оптимизации. Известная ориентация ускорения свободного падения в земной системе координат, выраженная через кватернион ${}^Eg^{(5)}$, преобразуется в систему координат прибора с помощью искомой ориентации прибора ${}^S\hat{q}$, что должно быть равно измерению акселерометра m_a

$$f({}^S\hat{q}, {}^Eg, m_a) = {}^S\hat{q}^* \otimes {}^Eg \otimes {}^S\hat{q} - m_a \approx 0 \quad (4)$$

$${}^Eg = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad (5)$$

${}^S\hat{q}$ является решением уравнения

$$\min_{{}^S\hat{q} \in \mathbb{R}^4} f({}^S\hat{q}, {}^Eg, m_a) \quad (6)$$

Для решения задачи оптимизации используется метод градиентного спуска, так как является одним из наиболее эффективных. Функция (4) выступает в качестве целевой функции. Согласно этому методу ориентация вычисляется с помощью уравнения:

$${}^S\hat{q}_i = {}^S\hat{q}_{i-1} - \beta \nabla f({}^S\hat{q}_{i-1}, {}^Eg, m_a), i = 1, 2, 3..N \quad (7)$$

где β является шаговым коэффициентом, регулирующим скорость сходимости и разрешение по ориентации, ∇f - градиент целевой функции, N - максимальное количество итераций. Градиент ∇f вычисляется согласно уравнениям:

$$\nabla f(\hat{q}_D, \hat{g}, m_a) = J^T(\hat{q}_D, \hat{g}) f(\hat{q}_D, \hat{g}, m_a) \quad (8)$$

$$f(\hat{q}_D, \hat{g}, m_a) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - ax \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_4) - ay \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - az \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$J^T(\hat{q}_D, \hat{g}) = \begin{bmatrix} -2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & -4q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (10),$$

где $J(\hat{q}_D, \hat{g})$ - Якобиан целевой функции, q_1, q_2, q_3, q_4 являются элементами кватерниона $\hat{q}_D = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]$.

Таким образом, полное выражения для всех элементов

$$\begin{aligned} \nabla f &= [s1 \ s2 \ s3 \ s4]: \\ s1 &= 4q_1 q_3^2 + 2q_3 ax + 4q_1 q_2^2 - 2q_2 ay \\ s2 &= 4q_2 q_4^2 - 2q_4 ax + 4q_1^2 q_2 - 2q_1 ay - 4q_2 + 8q_2 q_2^2 + 8q_2 q_3^2 + 4q_2 az \\ s3 &= 4q_1^2 q_3 + 2q_1 ax + 4q_3 q_4^2 - 2q_4 ay - 4q_3 + 8q_3 q_2^2 + 8q_3 q_3^2 + 4q_3 az \\ s4 &= 4q_2^2 q_4 + 2q_2 ax + 4q_3^2 q_4 - 2q_3 ay \end{aligned} \quad (11)$$

∇f нормируется. Выражение (12) является корректировочной ориентацией $\hat{q}_{err}$.

$$\hat{q}_{err} = \beta \frac{\nabla f}{|\nabla f|} \quad (12)$$

Шаговый коэффициент β может задаваться как переменная: большее значение, если ∇f велико, для ускорения сходимости, меньшее значение, если ∇f мало, для увеличения разрешения вычисляемой ориентации.

В предложенном способе при первой итерации градиентного спуска вместо предыдущего значения ориентации $\hat{q}_0$ используется оценка ориентации, полученная с помощью измерений гироскопа:

$$\hat{q}_D = \hat{q}_\omega \quad (13)$$

В заявленном решении с помощью уравнения (12) вычисляется корректировочная ориентация, а с помощью уравнения (14) осуществляется корректировка (уравнение (14) является следствием подстановки (12) в (7)). Таким образом, одна корректировка ориентации является одной итерацией градиентного спуска):

$$\hat{q}_i = \hat{q}_{i-1} - \hat{q}_{err,i}, i=1,2,3..N, \hat{q}_0 = \hat{q}_\omega \quad (14)$$

Откорректированная ориентация $\hat{q}_i$ нормируется.

Корректировка будет происходить до тех пор, пока i не станет равно N , где N - максимальное количество корректировок. Для минимизации вычислений введено дополнительное условие, которое позволяет прекратить корректировку ориентации, прежде чем i станет равно N . Этим дополнительным условием прекращения корректировки является требование того, чтобы $\hat{q}_{err,i}$ было меньше некоторого заранее заданного порогового значения ε :

$$\hat{q}_{err,i} < \varepsilon \quad (15)$$

Корректировка будет происходить до тех пор, пока не выполнится одно из условий (16):

либо количество совершенных корректировок станет равно максимальному количеству корректировок N ,

либо корректировочная ориентация $\hat{q}_{err,i}$ станет меньше порогового значения ε . ε задается исходя из необходимой точности вычисления ориентации.

$$(i = N) \vee (\hat{q}_{err,i} < \varepsilon) \quad (16)$$

Упрощенная блок-схема предложенного компьютерно-реализуемого способа вычисления ориентации в пространстве (200) представлена на фиг. 2:

На этапе (201) получают измерения акселерометра и гироскопа. После чего на этапе (202) осуществляют вычисление оценки текущей ориентации на основе измерений гироскопа.

Далее на этапе (203) выполняют вычисление корректировочной ориентации с помощью измерений акселерометра. После чего на этапе (204) выполняют корректировку ориентации.

И на этапе (205) проверяют условие прекращения корректировки и выдают результат откорректированной ориентации (206).

Заявленный способ не ограничивается компьютерной реализацией аппаратной части и может быть реализован как с использованием компьютеров, так и в средствах микропроцессорной или иной вычислительной техники, главным требованием к которым будет являться способность ввода измерений акселерометров и гироскопов и произведение описанных вычислений.

В настоящих материалах заявки было представлено предпочтительное раскрытие осуществление заявленного технического решения, которое не должно использоваться как ограничивающее иные, частные воплощения его реализации, которые не выходят за рамки испрашиваемого объема правовой охраны

и являются очевидными для специалистов в соответствующей области техники.

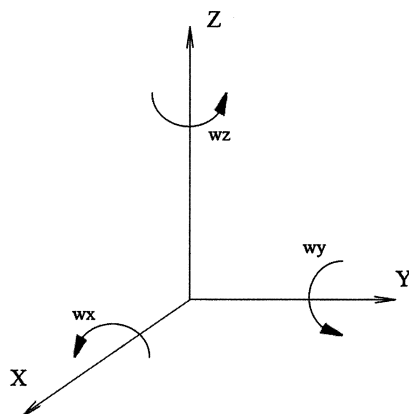
Ссылки

- [1] Сайт компании Xsens - <https://www.xsens.com/>.
- [2] Сайт компании SBG-Systems - <https://www.sbg-systems.com/>.
- [3] Сайт компании Vectornav - <https://www.vectomav.com>.
- [4] Сайт компании Bosch-sensortec - <https://www.bosch-sensortec.com/>.
- [5] Сайт компании Invensense - <https://www.invensense.com/>.
- [6] Sebastian O. H. Madgwick "An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/Magnetic Sensor Arrays. Report x-io and University of Bristol (UK)", 30.04.2010.

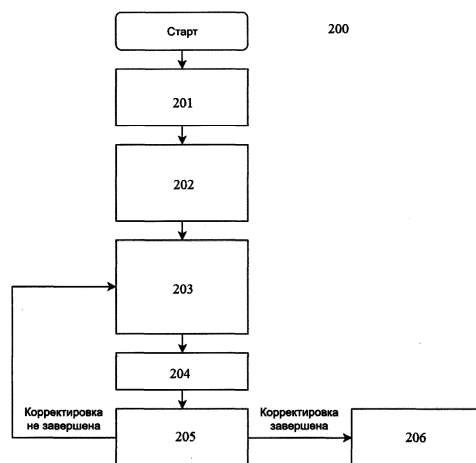
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Компьютерно-реализуемый способ вычисления ориентации в пространстве, выполняющийся на вычислительном устройстве, содержащий процессор, посредством которого осуществляются этапы, на которых:

- а) получают измерения акселерометра и гироскопа;
- б) осуществляют определение кватерниона, описывающего скорость изменения ориентации в земной системе координат посредством измерений гироскопа;
- в) осуществляют определение оценки текущей ориентации путем интегрирования кватерниона;
- г) выполняют нормировку оценки текущей ориентации;
- д) осуществляют определение градиента целевой функции посредством измерений акселерометра, причем при первой корректировке для определения градиента используется нормированная оценка ориентации, полученная в п. г), при последующих корректировках для определения градиента используется нормированная ориентация, полученная в пункте и) при предыдущих корректировках;
- е) выполняют нормировку градиента;
- ж) осуществляют определение корректировочной ориентации путем умножения нормированного градиента на шаговый коэффициент;
- з) выполняют корректировку ориентации путем вычитания из полученной ориентации корректировочной ориентации, причем при первой корректировке в качестве полученной ориентации используется нормированная оценка ориентации, полученная в пункте г) при последующих корректировках, в качестве полученной ориентации используется нормированная ориентация, полученная в пункте и) при предыдущих корректировках;
- и) выполняют нормировку откорректированной ориентации;
- к) проверяют условие превышения заранее заданного порогового значения корректировочной ориентации;
- м) выдают нормированное значение ориентации на выход алгоритма в случае выполнения хотя бы одного из условий к) или м); повтор пунктов с д) по л) до тех пор, пока не выполнится хотя бы одно из условий.



Фиг. 1



Фиг. 2

