

◆ ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ ◆

УДК 531.383
DOI 10.17285/0869-7035.2017.25.3.003-031

Й. Ф. ВАГНЕР

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ СПОРТСМЕНОВ С ПОМОЩЬЮ ГИРОСКОПОВ И АКСЕЛЕРОМЕТРОВ. ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Инерциальные датчики являются эффективнейшими инструментами для измерения параметров движения. Они широко известны в транспортных приложениях и позволяют получать подробные данные о местоположении, ориентации, скорости и ускорении объекта. Благодаря современным технологиям навигационные системы на базе таких датчиков становятся все компактнее, легче и дешевле. По этой причине анализ параметров движения спортсменов становится новой перспективной областью их применения. Основываясь на данных за последние десятилетия, автор рассматривает внедрение и типовое применение инерциальных и комплексных навигационных систем в сфере спорта и биомеханики.

Ключевые слова: измерение параметров движения, биомеханика, многокомпонентные системы, интегрированные системы.

1. Введение

История применения гироскопов делится на несколько периодов. Первый характеризуется появлением волчка, ставшего одной из популярнейших игрушек на многие столетия. В качестве второго можно назвать время, когда гироскоп с кардановым подвесом стал объектом пристального изучения со стороны

Вагнер Йорг Ф. Доктор наук, профессор, Институт статики и динамики воздушно-космических аппаратов, Университет Штутгарта, Германия.

Статья по докладу на XXIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2016.

Научный редактор перевода к.т.н. Б. С. Ривкин.

Гироскопия и навигация. Том 25, № 3 (98), 2017

физики; эта эпоха началась с момента изобретения прибора в начале XIX века. Третий исторический период пришелся на первую половину XX века, когда гироскопические приборы, главным образом механические, становятся стандартным навигационным оборудованием на самолетах и кораблях [1]. После Второй мировой войны наступила эпоха инерциальных датчиков и сложных высокоточных электромеханических систем. Около четырех десятилетий назад возникла тенденция к повышению функциональности и надежности этих устройств при снижении затрат, уменьшении массы и снижении трудоемкости обслуживания, что привело к появлению оптических гироскопов и бесплатформенных систем на их основе. С этого момента начался пятый период. Последний этап, продолжающийся по настоящее время, ознаменовался появлением на рынке приблизительно в 1990-х гг. микроэлектромеханических систем (МЭМС) для гироскопов; при этом процесс уменьшения габаритов продолжается: разработка миниатюрных датчиков и средств электроники привела к созданию беспрецедентно маленьких, легких и недорогих инерциальных измерительных блоков (ИИБ), а также (как правило, в сочетании с приемниками глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС) интегрированных навигационных систем. Благодаря смартфонам, оснащенным МЭМС-ИИБ, гироскопы стали такими же популярными, каким до этого был только волчок.

В то время как в классической навигации подвижных объектов точность и надежность играют более важную роль, чем другие характеристики, например размеры, масса и стоимость, существуют области применения навигационного оборудования, где предъявляются прямо противоположные требования. К таким областям относятся, в первую очередь, спорт, отдых и другие повседневные занятия (вплоть до возможного повсеместно распространенного маршрута), которые открывают невиданные возможности для массового рынка инерциальных датчиков. С другой стороны, в спорте, как и в медицине, далеко не всегда можно использовать обычные, не слишком высококачественные инерциальные датчики. Это относится, главным образом, к биомеханическим исследованиям и диагностике. Типичными примерами являются такие области применения, как анализ выступлений и соревнований в спорте, а также клиническая диагностика, контроль реабилитации и исследование усвоения моторных навыков в медицине.

Актуальным трендом в области измерений параметров движения человека являются так называемые *сети носимых нательных датчиков* (часто в сочетании со средствами беспроводной связи [2]). С точки зрения инерциальных технологий это означает, что для регистрации биомеханических движений используется не один, а несколько ИИБ, размещенных на различных участках тела человека. При этом десять и более небольших датчиков обычно прикрепляют к специальной облегчающей одежде, которую надевает испытуемый [3]. Создание рабочей или спортивной одежды со вшитыми в нее скрытыми инерциальными датчиками – всего лишь вопрос времени.

В научной биомеханике более привычно использование акселерометров, тогда как гироскопы пока находятся на стадии популяризации. Распространению гироскопов препятствует тот факт, что при использовании инерциальных датчиков необходимо тщательным образом учитывать (нелинейный) характер вращательного движения, а также хорошо знать математику для кинематического анализа. Знание таких вопросов не вполне характерно для научных специалистов в области медицины и спорта. В свою очередь, специалисты по инерциальным датчикам и системам, которые могли бы обеспечить квалифицированное применение данной технологии в области биомеханики, больше со-

средоточены на транспортных технологиях и геодезии. Таким образом, настоящая статья является своего рода попыткой привлечь внимание специалистов к новой сфере применения этой техники, научная и коммерческая роль которой неуклонно растет. Настоящая работа в значительной мере основывается на обзоре научных статей из спортивных и медицинских изданий в инженерно-технической интерпретации.

В разделе 2 обсуждаются требования, современные области применения и растущая роль инерциальных датчиков в биомеханике, сформировавшиеся за последние 50 лет. Применение в спорте за последние 20 лет и дополнительные аспекты применения в его отдельных видах более подробно обсуждаются в разделе 3. Раздел 4 посвящен ряду технических вопросов. Наконец, завершает статью раздел 5, в котором представлены некоторые обобщения и выводы.

2. Инерциальные датчики в биомеханике

Вполне естественно, что в биомеханических научных исследованиях, посвященных многочисленным видам повседневной деятельности, используются передовые методы измерения параметров движения. Как правило, исследуемые движения совершаются с низкой частотой и являются трехмерными. Следовательно, современные средства пилотирования и навигации сами собой напрашиваются для регистрации таких сложных движений. Помимо общепринятых систем фотограмметрии (которые в основном фиксируют движение меток и используют несколько камер) и приемников ГНСС, ставших привычными за последние 15 лет, особое внимание уделяется акселерометрам и гироскопам. Кроме того, все большее распространение получают интегрированные системы, сочетающие в себе инерциальные датчики и датчики магнитного поля.

Инерциальные и другие навигационные датчики не случайно подходят для применения в биомеханике. Эти устройства могут работать по аналогии с органами вестибулярного аппарата, зрения, слуха, а также отражать тактильные ощущения во всем теле и конечностях. Это относится как к людям, так и к высшим животным. Однако если быть точным, физиологические датчики, как и датчики навигационных систем, являются средствами измерения лишь отдельных компонентов более сложных движений. К таким компонентам относятся, например, углы пространственного положения, расстояния до заданных точек или компоненты векторов, в частности ускорение и угловая скорость. В физиологии соответствующие импульсы нервных окончаний поступают в мозг все вместе и создают у каждого человека максимально точное восприятие своего текущего (сложного) состояния движения и ориентации в пространстве [4]. Применительно к интегрированным навигационным системам параллелизм или эквивалентность этого процесса обычно обеспечивается сочетанием различных датчиков или комплементарной фильтрацией [5].

Использование интегрированных навигационных систем для управления транспортными средствами является распространенной современной технологией. Как уже говорилось, в последние десятилетия такие системы постепенно становились меньше, легче, экономичнее и дешевле. Сегодня они рассматриваются в качестве альтернативного инструмента для решения задач измерений в биомеханике, где требуются нездражающие и неинвазивные измерительные элементы. Однако биомеханические конструкции обычно не представляют собой единое жесткое тело с 6 степенями свободы, каковым является классиче-

ская модель транспортного средства. Это системы со множеством тел. С другой стороны, существуют возможности для превращения интегрированных навигационных систем в *интегрированные системы измерения движения* для таких многокомпонентных структур с пространственно разнесенными инерциальными датчиками (т.е. с сетью датчиков) [6]. Первые простые образцы уже реализованы в биомеханике [7]. Подобно инерциальным и интегрированным навигационным системам, такие обобщенные системы измерения основаны на использовании акселерометров и гироскопов в качестве центральных помехоустойчивых датчиков.

2.1. Специальные требования к датчикам и современный уровень их развития

С учетом всего вышесказанного становится понятно, почему инерциальные датчики давно применяются в традиционной биомеханике: вскоре после того, как в 1920-х гг. были разработаны акселерометры для рабочего использования в инженерно-технической сфере [8], начали появляться первые научно-исследовательские статьи о характере ускорений при ходьбе [9, 10]. Дальнейшее продвижение в области биомеханики, тем не менее, в течение десятилетий оставалось достаточно скудным. Дж. Моррис [11] отметил этот факт в 1973 г.: большинство попыток использования акселерометров и гироскопов заканчивалось неудачей из-за несовершенства передатчиков. Датчики и системы для навигации были чересчур большими и тяжелыми; пьезоэлектрические акселерометры для анализа вибрации машин предназначались для высокочастотных измерений и были неспособны регистрировать параметры в стационарном состоянии. При более подробном рассмотрении данных исследования Дж. Морриса можно сформулировать условия для применения инерциальных датчиков в биомеханике. Эти требования, *первый* постулат его работы, актуальны и по сей день:

1. датчики должны быть небольшими, легкими, неинвазивными и не слишком дорогими;
2. нижний предел диапазона частот для датчиков должен составлять 0 Гц;
3. должно быть учтено влияние гравитации на выходные данные акселерометра;
4. датчики должны быть пригодны для использования за пределами лабораторий и для практического применения в медицине (то есть обеспечивать возможность обработки данных в режиме реального времени);
5. датчики должны быть простыми в эксплуатации;
6. использование датчиков должно иметь преимущества по сравнению с гониометрией и фотограмметрией.

Очевидно, что МЭМС-датчики отвечают всем этим требованиям. До их появления на рынке и, следовательно, резкого увеличения объемов соответствующих исследований в области спорта и медицине (см. раздел 2.3) ученые-биомеханики часто приходили к мысли о создании собственных акселерометров. Как правило, такие датчики представляли собой чувствительную массу, подвешенную к упругой балке, с тензометрическими или пьезокерамическими датчиками в качестве чувствительных элементов [11, 12]. Существовали даже разработки, в которых предусматривалось прикрепление датчиков на глаза [13].

Работа Дж. Морриса коротко затрагивает ряд других немаловажных вопросов применения инерциальной технологии в биомеханике и поэтому представляет особый интерес. Его замечания относительно гироскопов составляют *вто-*

рой постулат его статьи; на них явно повлиял тот факт, что в начале 1970-х гг. инерциальные навигационные системы строились на основе платформ с карданным подвесом, поскольку бесплатформенные технологии на тот момент еще не появились. В связи с этим Дж. Моррис отмечает, что гироскопы могут использоваться только для измерения очень малых угловых скоростей, свойственных транспортным средствам, и не годятся для таких движений, как ходьба. Поэтому он полагает, что для измерения вращательного движения в биомеханике должны использоваться *ИИБ на основе только акселерометров*. Подобная точка зрения, наряду с разработкой соответствующих ИИБ и алгоритмов, существует и сегодня [11, 14–18]. Тем не менее такие ИИБ не могли доминировать в биомеханике и представляют собой «просто аналитический эксперимент» [19]. Это неудивительно, поскольку утверждение А.Х. Цорна [20] о том, что для создания такого рода ИИБ «устойчивость и разрешающая способность существующих акселерометров пока недостаточны», до сих пор актуально в отношении МЭМС-датчиков.

Третий постулат статьи Дж. Морриса содержит сравнение инерциальных датчиков со средствами гониометрии и фотограмметрии, которые на сегодняшний день рассматриваются как *золотой стандарт* [19] в биомеханике. Инерциальные датчики легче использовать вне искусственно созданных лабораторных условий (то есть в естественной среде, что немаловажно); они позволяют избежать численного дифференцирования сигнала для вычисления скорости и ускорения (иногда в биомеханике это делают также с помощью измерений ГНСС [21]). Вместе с тем Дж. Моррис отмечает проблему увеличения погрешности при определении угловой ориентации и местоположения с использованием численного интегрирования сигналов инерциальных датчиков. Тщательное изучение литературы показало, что в последних статьях дается уточнение его оценки с точки зрения современного состояния биомеханики [22–25]: было установлено, что превосходный уровень погрешности определения угловой ориентации до 2° и местоположения до 5 см вполне достижим при использовании МЭМС-гироскопов и акселерометров в отличие от фотограмметрии и гониометрии. Однако в этих работах также отмечается, что надежность измерения биомеханических параметров с помощью инерциальных датчиков сильно варьируется, для ее повышения требуется более глубокая техническая проработка [26]: «Поскольку трехмерная кинематика достаточно сложна для понимания и требуется разработка автоматизированных алгоритмов, уровень знаний и опыта могут играть важную роль в определении и устранении источников погрешностей» [19].

Последнее предложение – призыв к техническим специалистам в области инерциальных систем оказать поддержку в решении данного вопроса, который ведет нас к *четвертому* аспекту рассматриваемой проблемы, связанному с конструкцией датчика и алгоритмами обработки сигнала. Первая сложность заключается в том, что при сравнении инерциальных датчиков со средствами фотограмметрии и гониометрии не рассматривается вариант с интегрированными системами, сочетающими в себе все эти принципы осуществления измерений, хотя в настоящее время такое технически осуществимо. [27]. Вышедшие в 1960-х гг. в свет работы Р.Э. Калмана о комплементарной фильтрации, возможно, были чересчур новаторскими для Дж. Морриса; однако на сегодняшний день фильтры Калмана и интегрирование различных видов датчиков уже оценены по достоинству в биомеханике [19, 22]. Это касается и основ бесплатформенной технологии, включая использование кватернионов и матриц перехода [28–30]. Тем

не менее интегрированные системы в данной области науки пока представлены только небольшими курсовертикалями, появившимися несколько лет назад [19, 25]. Исключение составляет разработка специальных бесплатформенных алгоритмов, которой занимался Дж. Моррис [11], или системы на основе фильтра Калмана [29, 31]. Дрейф при численном интегрировании часто можно устранить только с помощью (высокочастотной) фильтрации, а оценка смещения нуля датчика выполняется в фазе покоя в начале и в конце измерений [11, 19, 32]. Соответственно, даже в последних аналитических работах [19, 25] в основном представлены лишь различные примеры первичных реализаций систем в рамках многокомпонентной системы, описанной автором [6]. С другой стороны, текущие исследования в области биомеханики хорошо знакомы с такими вопросами, как кинематическое моделирование, состав комплекта датчиков и их размещение [33–35], специальная выставка ИИБ [36, 37], ширина спектра и шаг дискретности сигнала [38], выбор специальных форм фильтра Калмана [29, 34], а также составление общего руководства по конфигурациям систем [34] и обеспечению качества данных [26]. Все эти вопросы крайне интересны для технических специалистов в области инерциальной навигации.

К сожалению, широкое распространение ИИБ, особенно в смартфонах, создает иллюзию, будто это простые сенсорные устройства, которые можно носить в кармане брюк, как кошелек, и которые могут качественно измерять параметры движения. Сложившаяся ситуация отражает дилемму, уже давно ждущую разрешения. Она описана Дж. Моррисом следующим образом: *«Причина недостаточного применения существующих методов состоит в том, что эти методы либо слишком сложны, либо просты, но в результате дают слишком мало информации»*. Недавнее высказывание С. Сессы очень точно характеризует проблему [39]: *«Ряд ученых-биомехаников предпочитают использовать видео- и фотодатчики и априори отвергают инерциальные датчики, потому что они «неточные» или «ненадежные», скрывая при этом, что их лабораторные исследования кратковременны и проводятся в ограниченных условиях. Но есть и ученые, которые работают с большими группами, выборочно надевают инерциальные датчики на бедро или запястье отдельных людей и получают статистические данные, не обращая внимания на их разнообразие в своих исследованиях. Я думаю, что этот разброс можно преодолеть путем терпеливой работы над поиском точного алгоритма, что, несомненно, является очень трудной задачей»*. Другими словами, размещение инерциальных датчиков на нежесткой механической конструкции – крайне актуальная задача современной науки [25].

Приведенные цитаты подводят нас к пятому постулату статьи Дж. Морриса: интегрирование различных типов датчиков – всего лишь подготовительный этап анализа и интерпретации полученных данных. Если обработка сигнала осуществляется современными методами, определение параметров движения будет высококачественным и комплексным (например, запись абсолютного движения центра масс всего тела и относительного движения частей тела [40]). Процессы анализа движения должны происходить на одинаковом уровне и включать такие аспекты, как нелинейная динамика, стохастические процессы, специальные системы показателей и отбор признаков. Это формирует дальнейший уровень интегрирования данных [41]. Такие методы (превосходящие современный технический уровень [42]) редки и имеют узкую сферу применения [43–47]. Несмотря на это, происходит формирование общей теории [48, 49], которая может вытеснить все еще преобладающую простую статистику.

Наконец, примечателен *шестой* аспект статьи Дж. Морриса. Крепление ИИБ на спортивном снаряде, например велосипеде или копье, сегодня не вызывает затруднений; намного сложнее прикрепить ИИБ к телу человека или животного. Обычно инерциальные датчики крепятся к телу с помощью пояса или ленты. Однако в этом случае движение мягкой ткани между сенсорным устройством и костью может создавать помехи и увеличивать неопределенность результатов измерений [50]. При проведении сопоставительного фотограмметрического анализа оптических меток, прикрепленных к коже и кости вместо ИИБ, разница величин углового положения частей тела составляла до 8° [51, 52]. Что касается повторяемости и качества измерений, то инерциальные датчики должны быть выставлены по анатомической, привязанной к костям, системе координат [19], то есть фактически их необходимо фиксировать непосредственно на кости исследуемой части тела [53], а это весьма затруднительно по медицинским и этическим соображениям.

2.2. Акселерометрия и влияние гравитации

Один из основных терминов в статье Дж. Морриса – «акселерометрия» – означает применение акселерометров в научных исследованиях [54]. В области навигации этот термин используется редко и описывает, скорее, определение качественных параметров, например, шагов пешеходов с помощью этих датчиков [55]. Однако в биомеханике этот термин широко употребляется для всех методов измерений, выполняемых, главным образом, с помощью акселерометров.

Несмотря на требование 3, приведенное выше, использование акселерометров без точного учета влияния гравитации (то есть акселерометрия без известной величины угла между осями датчика и вектором локальной гравитации) довольно часто можно наблюдать в биомеханических исследованиях. В разделах 2.3 и 3.1 данное положение разбирается детально, однако сначала необходимо остановиться на физических предпосылках.

На рис. 1 представлен известный базовый принцип работы акселерометра. Подвижную массу прикрепляют к корпусу датчика с помощью пружины и амортизатора, чьи функции выполняют механические или электрические элементы. Если корпус датчика ускоряется по входной оси или поле локальной гравитации имеет компонент, параллельный этой оси, то масса будет стремиться выйти из состояния равновесия. Чувствительный элемент фиксирует этот эффект и создает сигнал датчика. Свойства массы, пружины, амортизатора и иногда чувствительного элемента определяют амплитудно-частотные характеристики датчика.

Если, как показано в верхней части рис. 2, ускорение корпуса датчика составляет, например, $0,5\text{ g}$ и направлено

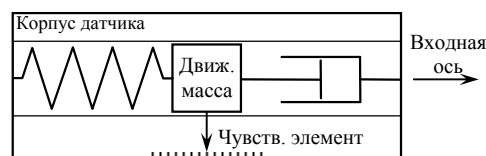


Рис. 1. Принцип действия акселерометра

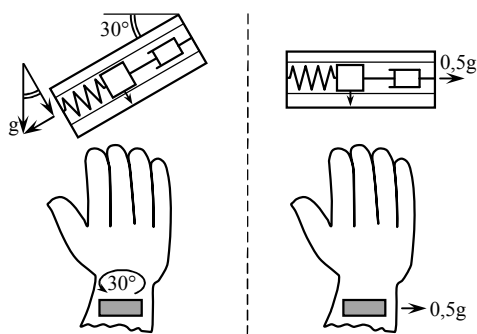


Рис. 2. Одиночный акселерометр, надеваемый на запястье

вправо (1 g – гравитация Земли) или если он вращается против часовой стрелки на угол 30° в гравитационном поле 1 g, сигналы измерений будут идентичными. В биомеханике такая ситуация возникает, когда акселерометр прикреплен к запястью испытуемого, подобно наручным часам (см. рис. 2). Это означает, что одиночный акселерометр формирует одинаковый сигнал при вращении запястья и его горизонтальном ускорении, и эти параметры невозможно разделить.

Вместе с тем измерение ускорений без учета углового положения входной оси датчика относительно гравитационного поля не так уж неверно. При модальном тестировании, то есть при определении динамических свойств вибрирующих объектов (например, самолета), акселерометры обычно используются именно таким образом [56]. Это допустимо по двум причинам:

- амплитуда вибраций и, следовательно, нежелательных вращений акселерометра очень мала;
- интересующий нас диапазон частот начинается с величины значительно большей, чем 0 Гц. В этом случае амплитуда предполагаемого нежелательного периодического вращения акселерометра на несколько порядков меньше, чем амплитуда одновременного измеряемого ускорения по входной оси (амплитуда a гармонического ускорения – это амплитуда d соответствующего смещения или вращения, умноженная на квадрат угловой частоты ω : $a = d \omega^2$).

В биомеханике эти условия удовлетворяются, например, при измерении свойств материалов, в частности поглощающих свойств мягких тканей [57]. Другими допустимыми применениями могут быть качественный, часто спектральный, анализ периодических движений, например ходьбы [58], или сонификация (звуковая окраска – *прим. ред.*) компонентов движения для улучшения тактильного восприятия [59]. Однако при анализе движения во временной области, играющей важную роль, эти два предварительных условия, как правило, не выполняются. Стоит заметить, что данному факту зачастую уделяется мало внимания в соответствующих исследованиях. До появления в конце 1990-х гг. МЭМС-гироскопов такой подход был вынужден применен в биомеханике. Сегодня он уже устарел, но продолжает существовать.

Чтобы продемонстрировать последствия данного упущения, используется традиционный метод оценки энергозатрат движущихся объектов [60]. Основная идея этого метода (который представляет собой альтернативу методу заполнения анкет участниками испытаний) заключается в использовании акселерометра, надеваемого на запястье, бедро или голову, для опосредованной фиксации и определения характеристик ускорения и замедления всех частей тела. В отличие от одиночных акселерометров, показанных на рис. 2, сегодня в основном используются модули акселерометров с тремя ортогональными осями измерений. Сомнительность таких измерений, тем не менее, легко продемонстрировать на примере простого эксперимента с вытягиванием руки вперед: можно непосредственно почувствовать, что горизонтальные колебания запястья с амплитудой 0,5 g требуют гораздо больше энергии, чем периодическое вращение запястья с одинаковой частотой и амплитудой 30° . Однако акселерометр не фиксирует эту разницу.

Разумеется, предпринимаются попытки уменьшить влияние гравитации без использования гироскопов. К ним относятся корректировка показаний блока акселерометров по среднему направлению измеренного вектора ускорения в конце периода измерений (предполагается, что это направление совпадает

с направлением силы тяжести) [61] или измерение вектора ускорения $[a_x \ a_y \ a_z]^T$, вычисление нормы вектора и затем вычитание g [62]:

$$a_{\text{истинн}} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} - g.$$

Такие способы не имеют ни физического, ни математического обоснования. Они представляют собой попытку максимального использования измерений при ограниченных ресурсах. Поэтому неудивительно, что результаты, полученные с помощью таких измерений, весьма неопределенны. По некоторым данным, даже различные модели устройств с акселерометрами, изготовленные одним и тем же производителем, могут давать разные результаты в одном и том же эксперименте [63, 64]. В связи с этим появляются абсолютно противоречивые выводы относительно акселерометрии: «акселерометры не способны определять количественные параметры движения в плавании» [65] и «трехосевые акселерометры можно использовать для точного и надежного измерения параметров движения пловца» [66].

Вывод прост: «Несмотря на преимущества объективных измерений, некоторые методы и устройства, в том числе акселерометрия, непригодны для количественного определения параметров движения...» [65]. В настоящее время у исследователей появилась надежда, что использование Больших Данных на основе первичной информации позволит найти выход из сложившейся ситуации [67]. И все-таки статистика и распознавание образов вряд ли смогут в значительной степени компенсировать пренебрежение влиянием гравитации. Более того, в имеющейся литературе не были обнаружены сведения о наличии исследований, в которых результаты традиционной акселерометрии сравнивались бы с результатами измерений, улучшенных за счет использования гироскопов для компенсации гравитации. Обзор научных публикаций представлен ниже и основывается на более чем 49500 статей в области биомеханики и спорта, а также инерциальной и навигационной технологии.

2.3. История развития

Несмотря на заключительное утверждение предыдущего раздела, ежегодное количество научных статей об измерении параметров физической деятельности с помощью акселерометрии за последние 25 лет выросло от почти нуля до нескольких сотен [67]. При этом публикационная активность в области науки и техники тоже значительно усилилась за это время. Таким образом, статистические показатели требуют более пристального внимания, предметом которого должно стать и применение гироскопов. Первым это сделал «*Journal of biomechanics*», периодическое издание с мировым авторитетом, давними традициями, освещающее широкий ряд проблем. Журнал предлагает большое количество публикаций – более 9800 (полных) статей в 49 томах, вышедших в свет с 1968 по 2016 г. Интернет-страница журнала имеет удобную систему поиска материалов [www.jbiomech.com, вход выполнен в июне 2017 г.]. Из полнотекстовой базы журнала были выбраны статьи, в заголовке, реферате или ключевых словах которых присутствовало одно из следующих слов: *акселерометр, акселерометрия, гироскоп, ИИБ, инерциальный, навигация*.

Поиск по полному тексту не велся, чтобы получить подборку статей, посвященных, главным образом, инерциальным датчикам. Из всех найденных работ

были отобраны те, где измерение параметров движения было темой или методом исследования. В результате получился набор из 164 публикаций, которые затем были сгруппированы по годам и подсчитаны. Наконец, ежегодное количество отобранных статей было поделено на общее ежегодное число статей, чтобы вычислить годовую долю. Общее количество статей в год выросло с примерно 50 в 1960-х гг. до 500 в настоящее время.



Рис. 3, а. Статьи об измерении параметров движения инерциальными датчиками

На рис. 3, а показаны результаты анализа данных. Первой особенностью приведенной схемы являются значительные колебания на графике, связанные с небольшим ежегодным числом статей (всего от 0 до 3) до 1999 г. Этот год отмечен как точка перелома на кривой общей тенденции: ситуация до и после 1999 г. настолько отличается, что эти периоды отмечены двумя разными (прямыми) линиями (с 1968 по 1999

и с 2000 по 2016 гг.). В первые три десятилетия средняя доля статей практически не меняется, а затем начинается ее значительный рост.

Год 1999 выбран неслучайно. Он относится к периоду, когда на рынке появились доступные по цене инерциальные МЭМС-датчики [68]. В это время были проведены исследования, на базе которых возник бизнес компании Xsens [69, 70]. Эта фирма первой начала выпускать малогабаритные и недорогие ИИБ, представляющие собой курсовертикали на основе гироскопов, акселерометров и магнетометров. По сравнению с другими марками коммерческих ИИБ для биомеханики, такими как *Actigraph*, *Activinsights*, *Actiwave*, *Catapult*, *Freeemg*, *Intersense*, *Invensense*, *Microstrain*, *Myon*, *Noraxon*, *Physilog*, *Sensewear*, *Trivisio*, *Yeitechnology/Yost Labs*, Xsens гораздо чаще упоминалась в 164 статьях (Xsens – 19 раз, Physilog – 11 раз, Microstrain – 4, Actigraph – 2, Invensense – 1, Catapult – 1, Activinsights – 1).

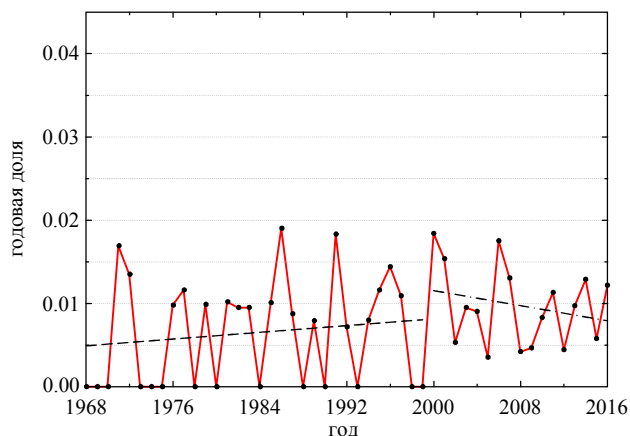


Рис. 3, б. Статьи об измерении параметров движения инерциальными датчиками без применения гироскопов

На рис. 3, а пунктирной линией красного цвета обозначена доля статей, посвященных акселерометрии без использования гироскопов. Она сильно расходится с главной кривой в период после 2000 г. Очевидно, что ситуация в данной отрасли после 1999 г. отличается от ситуации с применением ИИБ. На рис. 3, б это показано более подробно: медленный рост до 2000 г. благодаря посте-

пенному уменьшению массогабаритных характеристик акселерометров перешел в фазу медленного снижения, которое показывает, тем не менее, что позиции чистой акселерометрии все еще сильны.

Рост применения гироскопов, тем не менее, не означает, что данная технология используется последовательно и обдуманно: в ряде недавних статей вообще не говорится о гироскопах – на них есть только косвенные указания, например торговое название сенсорного устройства (например, [71]). Другой случай – недавняя статья, где цитируются несколько работ, посвященных новейшим гироскопам, однако затем обсуждается метод измерений только посредством акселерометров без каких-либо обоснований [72]. Ввиду этих обстоятельств можно ожидать, что ИИБ будет описываться просто как *черный ящик*, а трехмерное измерение углового положения и векторов в трехмерном пространстве будет таким же простым, как измерение скалярных параметров типа мощности или температуры. Это никоим образом не отражает реальное положение дел в современной инерциальной навигации.

3. Особенности ситуации в спорте

3.1. Вклад спортивных наук

Вопросы, рассмотренные в разделах 2.1 и 2.2, касались биомеханики в целом, а цифры, приведенные в разделе 2.3, являются показательными для всей этой области науки. Чтобы отдельно охарактеризовать направление спортивной биомеханики, эти показатели определены еще раз, но на основе данных из материалов, посвященных именно спорту. В частности, это *Европейская база данных спортивной науки* (EDSS), в которой аккумулируются все материалы, представляемые на ежегодных конгрессах Европейского колледжа спортивной науки (ECSS). Это собрание известно во всем мире, отличается широтой предметной области и содержит большое количество рефератов – свыше 27300 материалов 21 конгресса за период с 1996 по 2016 гг. Интернет-страница ECSS имеет удобную систему поиска нужных материалов по заголовкам и ключевым словам [sport-science.org, последний в систему – в июне 2017 г.].

Применив тот же алгоритм поиска, как и описанный в разделе 2.3, и отобрав из всех найденных материалов статьи, в которых измерение параметров движения заявлено в качестве темы или метода исследований, мы получили 109 рефератов. Для них был также выполнен пересчет по годам. Наконец, каждый из полученных годовых показателей разделили на годовое количество всех материалов.

На рис. 4 представлены результаты описанного анализа данных. Чтобы понять разницу между рис. 3, *а* и рис. 3, *б*, полезно вспомнить особую роль инерциальных датчиков в спорте согласно определению М. Норриса с соавторами [34]: «*акселерометры и гироскопы стали мостом между тренерской и научно-практической деятельностью*». Это означает, что, как уже говорилось выше, использование инерциальной технологии не должно предполагать слишком глубоких познаний в сенсорной физике и математике.

Первое различие между рис. 4 и рис. 3, *а* заключается в меньшей доле в годовом объеме публикаций. Это связано с тем, что EDSS охватывает широкий спектр спортивных методик (включая, например, общественные науки). Второе различие более существенно: мы снова можем видеть деление на два периода. С учетом того что пики 1998 и 2000 гг. обусловлены появлением только одного дополнительного реферата, первый период можно охарактеризовать практиче-

ски полным отсутствием применения инерциальных датчиков. На втором этапе отмечается значительный подъем, который, однако, в данном случае начинается примерно в 2004 г., а не в 2000-м, как на рис. 3, а.

На рис. 4 имеется также пунктирная линия красного цвета. Она показывает долю рефератов, в которых упомянуты гироскопы. На протяжении всего второго периода отмечается расхождение этой линии с главной кривой. Хотя доля материалов, где с упоминаются гироскопы, стабильно увеличивается, главным образом с 2005 г., чистая акселерометрия все же преобладает (в общей сложности 84 из 109 рефератов). Такого спада, как на рис. 3, б, не отмечается.



Рис. 4. Рефераты из EDSS, посвященные измерению параметров движения спортсменов с помощью инерциальных датчиков

Соответственно, подсчет брендов коммерческих блоков инерциальных датчиков показал, что доля серийных систем оказалась выше; при этом явно преобладают модули акселерометраов Actigraph: этот товарный знак упоминается в 23 рефератах, Xsens – в 10, Catapult – в 6, Omron – в 3, Sensewear – в 3, Noraxon – в 1 и Physilog – в 1.

Другими интересными аспектами являются цели исследований, использование данных и виды спорта, упоминаемые в рефератах. Как видно из табл. 1, наиболее важная область исследований – испытания датчиков и конфигурация измерительной системы; за ними следует проблема оценки энергозатрат. Только 30% работ посвящено анализу модели движения. Соответственно, табл. 2 демонстрирует низкий уровень использования данных комплексирования различных видов датчиков, это подтверждает мнение С. Сессы, что «разнообразие таких данных пренебрегают» [39].

Табл. 3 показывает, какова в процентном соотношении доля наиболее часто встречающихся в рефератах предметов исследований (в некоторых рефератах говорится о нескольких предметах исследований). Что удивительно, «неспецифические» движения являются темой примерно половины всех материалов. Это еще раз говорит о сложностях при работе с данными, выходящими за рамки статистических. Кроме того, в большей части рефератов речь идет о чистой акселерометрии, например, использовании блока из трех акселерометров, надеваемого на запястье. Вторая по популярности тема, ходьба и бег, является классической; за ней следуют 22% более узких дисциплин, среди которых в равной степени представлены как популярные виды спорта, в частности велоспорт, так и более редкие, например прыжки с трамплина.

Т а б л и ц а 1

Области исследований в рефератах EDSS

Область	Доля рефератов
Пригодность, размещение, надежность датчиков	35,8%
Физическая активность, энергозатраты объектов	29,4%
Количественный анализ характера одного движения	18,3%
Качественный анализ характера движений, определение вида деятельности	11,9%
Прочие	4,6%

Т а б л и ц а 2

Использование данных по информации из рефератов EDSS

Использование данных	Доля рефератов
Статистика с необработанными данными (то есть сигналами датчиков)	77,1%
Статистика с данными, полученными при интегрировании датчиков производителем систем	11,0%
Интегрирование специфических данных или численное интегрирование авторами	5,5%
Входные данные для имитации многокомпонентного объекта, другие базовые исследования	4,6%
Прочие	1,8%

Т а б л и ц а 3

Темы исследований, упоминаемые в рефератах EDSS

Тема	Доля рефератов
Физическая активность, в том числе фитнес, аэробика и повседневная деятельность	43,1%
Ходьба и бег	32,1%
Лыжный спорт	6,4%
Велоспорт	4,6%
Фигурное катание, конькобежный спорт, катание на роликовых коньках	4,6%
Хоккей	3,7%
Плавание	2,8%
Гребля	0,9%
15 других видов спорта	22,0%

3.2. Вклад инерциальной технологии и теории навигации

Чтобы ответить на вопрос, почему комплексирование различных видов датчиков и навигационные алгоритмы так мало применяются в спорте, необходимо понять, какую роль играет спорт на конференциях, где такие алгоритмы и инерциальные датчики обсуждаются подробно. В этой связи был предпринят аналогичный поиск публикаций материалов с мероприятий, посвященных инерциальным и интегрированным системам навигации. Ввиду того что базы данных, сопоставимой по размеру с EDSS, не существует, были изучены доклады со следующих пользующихся мировым авторитетом регулярных конференций, также проводившихся в период с 1996 по 2016 гг. (в порядке убывания количества найденных докладов):

- ION GNSS / ION GPS (ежегодно);
- ION International/National Technical Meeting (ежегодно);
- Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (МКИНС) (ежегодно);
- IEEE/ION PLANS (раз в 2 года с 1996 г.);
- DGON Inertial Sensors and Systems / Symposium Gyro Technology (ежегодно);
- IEEE Inertial Sensors & Systems (ежегодно с 2014 г.).

Количество докладов составляет в сумме более 12300. Из них были отображены работы, в которых упоминаются инерциальные датчики и присутствует хотя бы одно из следующих слов: *спортсмен, биомеханический, биомеханика, ходьба, медицинский, медицина, реабилитация, спорт, виды спорта, носимый*.

Поиск материалов конференций ION (www.ion.org), IEEE (ieeexplore.ieee.org) и DGON [68] выполнялся по полным текстам, МКИНС (www.elektroprigor.spb.ru/cnf/econf) – по заголовкам и рефератам или по полным текстам, в зависимости от доступности (такая стратегия поиска была наиболее универсальной из всех возможных вариантов; последний вход в систему – в июне 2017 г.). Из всех найденных материалов были отобраны работы, в которых спорт или общая биомеханика упоминались в качестве предмета или метода исследований. Решение о выборе доклада о пешеходной навигации, которая здесь является пограничным случаем, принималось исходя из того, присутствовала ли в тексте биомеханическая тематика, например многокомпонентная модель ноги или детальная схема походки.

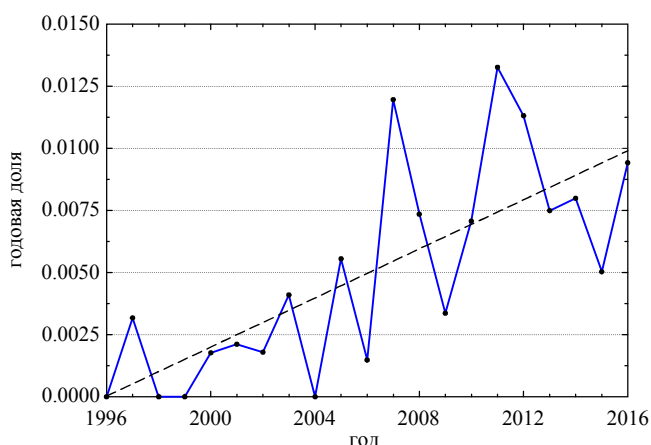


Рис. 5. Доклады навигационного научного сообщества, в которых упоминаются спорт или биомеханика

В итоге было отобрано 65 докладов, которые также были пересчитаны по годам. И снова показатель за каждый год поделили на количество всех полных докладов за тот же период. На рис. 5 представлены результаты анализа. Самая большая амплитуда кривой соответствует низкому среднему количеству докладов в год, которое составляет 3,1. Следовательно, увидеть переход

от первого периода ко второму достаточно сложно. Тем не менее все же заметно, что тенденция к росту начинается примерно с 2000 г. Любопытно, что ход пунктирной линии, показывающей общую тенденцию, практически не связан с тем, какой стартовый год был выбран для ее формирования (1996, 2000 или 2003 гг.). Применение аппроксимации по методу параболы для периода с 1996 по 2016 г. привело к аналогичному результату. Более того, на рис. 5 нет кривой, обозначающей чистую акселерометрию, поскольку доля таких докладов была незначительной (12,3%).

Был произведен подсчет брендов разработчиков коммерческих блоков инерциальных датчиков, о которых говорится в отобранных работах. Чаще всего встречаются упоминания об изделиях Xsens, Invensense и Microstrain, использу-

емых, например, в транспортной технике: 10, 6 и 2 соответственно. Напротив, приборы других производителей, предназначенные почти исключительно для спорта и биомеханики, практически не упоминаются. Сложившуюся ситуацию нельзя назвать благоприятной: она отражает не только низкий уровень научной оценки инерциальных датчиков [73]. Поскольку их данные могут иметь очень большое значение для здоровья спортсменов (ушибы головы в хоккее, травмы в футболе или велоспорте, нагрузки на ноги в лыжном спорте или волейболе и т.п. [15, 38, 74–76]), необходимы специальные медицинские стандарты для инерциальных устройств измерения параметров движения [77], которые на сегодняшний день отсутствуют.

В табл. 4 перечислены самые распространенные темы исследований, освещаемых в докладах. Неудивительно, что пешеходная навигация имеет наибольшее распространение. К важным темам также относится классификация движений, например, для поддержки рабочих процессов или для систем безопасности для пожилых людей. Доля применений в спорте в целом составляет только 21,6%. Проектирование измерительных систем и датчиков, применяемых в области спорта или биомеханики, пока не играют большой роли.

Т а б л и ц а 4

Темы исследований в докладах об инерциальных датчиках и навигации

Тема	Доля докладов
Пешеходная навигация	40.0%
Классификация движений	23.1%
Проектирование измерительных систем и датчиков	23.1%
<i>Лыжный спорт</i>	7.7%
<i>Ходьба и положение тела</i>	4.6%
<i>Бег</i>	3.1%
Обзоры	3.1%
<i>Велоспорт</i>	3.1%
<i>Гребля</i>	1.5%
<i>4 других вида спорта</i>	6.2%

3.3. Первые проекты с гироскопами

Из рис. 4 не следует делать вывод о том, что гироскопы в спорте начали применяться только в 2005 г. Самый ранний пример их использования в данном направлении, который удалось найти в процессе нашего исследования, – гироскопическая система, применявшаяся во время катания на лыжах в Калифорнийском университете в Беркли в 1983 г. [76, 78]. (Табл. 3 и 4 показывают, что этот вид спорта остается привлекательным до сегодняшнего дня.) Один комплект из трех механических гироскопов размером с яйцо (*модель UST № 400, US Time Corp.*) пристегивался к тазу лыжника, второй – к ботинку. К сожалению, ни в одной из статей не приводятся графики или подробные измерения, выполнявшиеся при этом. Сигналы гироскопа использовались для статистической корреляции с выходными данными других датчиков при анализе нагрузок на ногу.

Вскоре после этого группа ученых при университетах Бохума и Штутгарта (Германия) начала использовать гироскопы для изучения параметров движения при езде на велосипеде и гребле. Объектом исследования этой группы была

способность удерживать равновесие, например, при перевозке детей на велосипеде в транспортных потоках [79]. В 1989 г. эта работа привела к созданию инерциальной системы на основе трех небольших датчиков угловой скорости *Teldix RWK 100* (диапазон измерений ± 100 °/с) [80, 81]. На рис. 6 показана эта система, а также ее размещение в лодке для академической одиночной гребли. В велоспорте эту систему привинчивали к раме велосипеда. Хотя масса каждого гироскопа составляла всего 125 г, адаптация к конкретным требованиям (корпус, герметичность, питание, формирование сигнала) привела к увеличению массы системы до 1,2 кг. Несколько лет спустя стали использоваться первые гироскопы *Murata* на основе МЭМС. При этом масса снизилась примерно в 5 раз.

Эта гироскопическая система использовалась только как короткопериодная гировертикаль. Калибровка гироскопов проводилась классическим способом на поворотном стенде. Используя фазы покоя, погрешности гироскопа также корректировали в начале и в конце таких измерений и затем линейно интерполировали. Для некоторых углов, таких как углы килевой и бортовой качки гребной лодки, численное интегрирование сигналов гироскопа дополняли применением высокочастотного фильтра с известным допущением, что среднее значение этих углов равно нулю. (Такие стратегии до сих пор применяются в биомеханике [19, 26, 32].) Несмотря на простоту этого подхода, была доказана польза измерений с помощью гироскопов в велоспорте и гребле (и был положен конец эпохе господства акселерометров, которые на протяжении двух десятилетий считались передовыми средствами измерений в гребле [82]). В качестве примера на рис. 7 показаны реальные измерения угловой скорости и углы рыскания, полученные с помощью системы, представленной на рис. 6. Очевидно, что на килевую качку и рыскание влияют одиночные ударные воздействия, порождаемые работой весел, тогда как бортовая качка имеет более стохастический характер. При этом легко отличить начинающих гребцов от опытных.

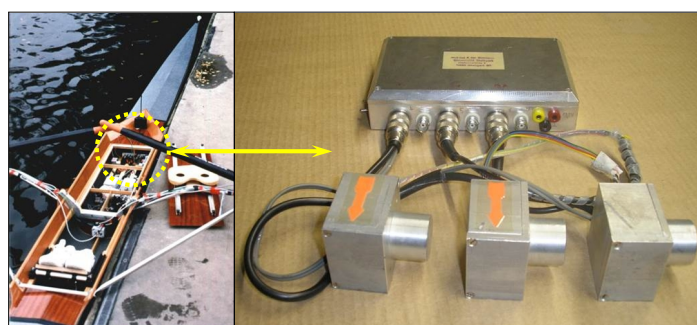


Рис. 6. Первая трехосная гироскопическая система для гребли и велоспорта

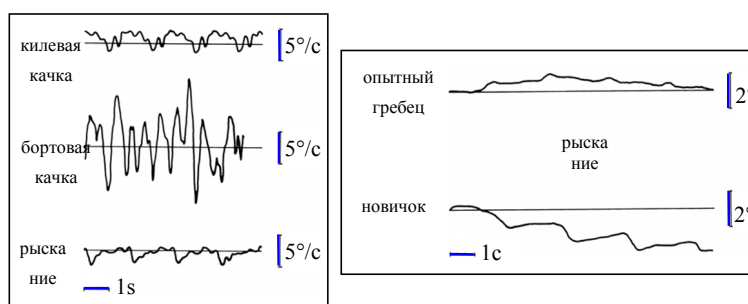


Рис. 7. Гребля: угловая скорость (слева) и угол рыскания (справа)

Будучи участником этой исследовательской группы, автор с тех пор следил за процессом распространения гироскопов в гребле. Его можно проиллюстрировать цитированием первой публикации [80] о системе измерения на рис. 6. Сформированный автором список содержит 44 работы – диссертации, статьи и книги, которые ссылаются на эту публикацию с 2003 г. (без самоцитирования). На рис. 8 показано количество цитирований в год.

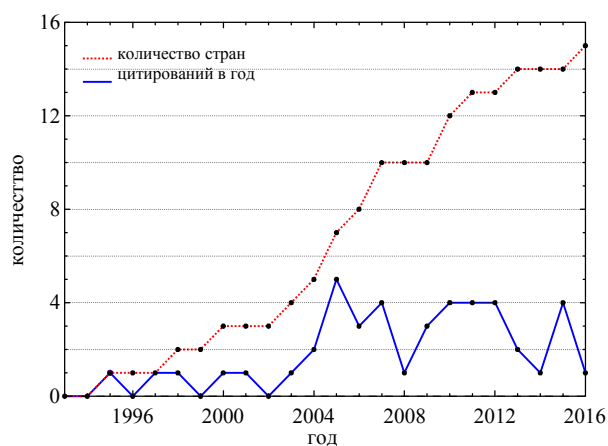


Рис. 8. Распространение первой статьи об использовании гироскопов в гребле

Как видно из рис. 4, можно выделить два периода: первый – с низким средним показателем цитирования до 2002 г., второй – с более высоким. На рис. 8 приведено также общее количество стран, где были выпущены публикации, цитирующие данную работу. Как видно из графика, процесс распространения этого метода измерения все еще продолжается.

Кроме того, статьи, цитирующие названную публикацию, позволяют проследить важные технические этапы, связанные с распространением этого метода измерения, с 1993 г.

1. Полное одобрение подхода (не найдено каких-либо критических замечаний).
2. Оснащение измерительной системы датчиками на основе МЭМС в 2000 г. [83].
3. Распространение подхода на другую спортивную дисциплину (байдарка) в 2009 г. [84].
4. Внедрение полной долгопериодной гировертикали в 2011 г. [85].
5. Параллельное использование трех гировертикалей и многомодульной модели лодки в 2011 г. [85].
6. Первое использование полной инерциально-спутниковой навигационной системы в 2012 г. [86].
7. Первый систематический обзор систем измерения и анализ результатов в 2015 г. [87].

Приведенный выше список отражает устойчивое совершенствование метода измерения различными научными группами по всему миру, нередко в рамках диссертационных проектов. Причина недостаточно быстрого развития таких исследований связана с ограниченным финансированием по сравнению, например, с навигационными системами в аэрокосмической отрасли. Кроме того, до сегодняшнего дня этот метод измерения ассоциируется с изучением проблемы сохранения равновесия [88].

3.4. Актуальные области применения

Судя по последним работам, новых применений гироскопов в спорте не так уж много, хотя публикуется огромное количество исследовательских работ. Ниже мы более подробно остановимся на тех видах спорта, в которых в настоящее время уделяется особое внимание инерциальным датчикам. В обзоре в основном использованы работы не старше трех лет.

В связи с тем что волнение воды значительно затрудняет оптическое изучение движения, интересной областью применения гироскопов является *плавание*. В [89] авторы дают подробный обзор и рассматривают такие аспекты, как различные фазы движения пловца, кинематику суставов, например локтевых, позиционирование датчика и выделение признаков движения. По их мнению, достоинства инерциальных датчиков, применяемых в плавании, еще недостаточно хорошо изучены. Кроме того, они утверждают следующее:

- инерциальные датчики обладают огромным потенциалом для практического использования в тренировках по плаванию;
- диапазон измерения для инерциальных датчиков должен составлять $\pm 2 \text{ g}$ и $\pm 1500 \text{ }^\circ/\text{с}$;
- частота дискретизации должна составлять не менее 20 Гц;
- эти характеристики не зависят от положения корпуса датчика;
- область текущих исследований – точное определение скорости плавания;
- следует рассмотреть возможность установки нескольких ИИБ на разные участки тела;
- до сих пор сигналы низкого уровня обрабатываются с использованием, например, фильтра Баттерворта и окна Хэмминга;
- необходимо выйти за рамки этого уровня и перейти к более сложной обработке сигналов и анализу данных (например, с помощью фильтра Калмана);
- тренерам по плаванию нужна помощь в выборе подходящей системы для индивидуальной оценки параметров плавания; существует также высокий спрос на современные инструменты анализа.

Эти аспекты актуальны в той или иной форме для *всех спортивных дисциплин*. В. Камомилла и др. [26] подтверждают, в частности, три последних пункта в приведенном обзоре, посвященном использованию гировертикали в спорте. В их работе также говорится о том, что в большинстве случаев калибровка и выставка ИИБ осуществляются недостаточно точно. Кроме того, они дают базовый набор рекомендаций по работе с этими блоками датчиков в спортивных приложениях.

На этом фоне следует отметить, что в *конном спорте*, который характеризуется особенно сложной кинематической структурой лошади и всадника, эта техника уже применяется. Исследования проводятся применительно, например, к измерению силы, тренажерам для жокеев, изучению взаимодействия между седлом и лошадью и доказательства применимости концепции кинематического анализа [90–92]. Однако недавний обзор подтверждает, что использование инерциальных датчиков в этой области все еще находится в начальной стадии [93].

Другая сфера применения с еще более высоким уровнем кинематической сложности – *командные виды спорта*. В этом случае модель спортсмена, как правило, представляет собой материальную точку с 3 степенями свободы [94]. Количество степеней свободы удваивается при добавлении параметра пространственного положения, что в результате дает, например, 66 степеней свободы для стандартной футбольной команды. Поэтому для одного спортсмена обычно регистрируются лишь небольшое количество параметров. Они используются, например, для определения характера движений одного спортсмена или всей команды. Однако эти подходы несопоставимы с известными методами кооперативной навигации группы транспортных средств. Особую область применения в командном спорте представляют мячи, оснащенные ИИБ [95].

Вполне естественно, что с помощью инерциальных датчиков изучаются прыжки с трамплина, поскольку они имеют некоторое отношение к аэронавтике. В отличие от самолета, который можно смоделировать как единое жесткое или упругое тело, лыжи и лыжники, прыгающие с трамплина, представляют собой летящую многокомпонентную систему. Поэтому в этом виде спорта обязательно нужно использовать сеть из нескольких ИИБ. Современные научные исследования направлены на уменьшение количества сигналов от многих датчиков параметров движения до необходимого минимума в дополнение к установленным видеосистемам [96, 97].

Ходьба и бег являются традиционным предметом исследования. Для измерений в этой области используются различные средства – от одного датчика до нескольких гировертикалей, распределенных по разным сегментам многокомпонентной структуры нижних конечностей [19]. Анализируемые параметры варьируются от отдельных величин, таких как частота шагов или ослабление ударных воздействий в направлении от ног к голове, до изучения различных способов ходьбы с несколькими степенями свободы [34]. Одни и те же методы измерения можно использовать как для нижних, так и для верхних конечностей [25], что позволяет исследовать, например, движения при метании спортивных снарядов с помощью инерциальных датчиков.

Изучив материалы, отобранные для настоящей статьи, автор обнаружил 50 спортивных дисциплин, в рамках которых ведутся исследования с использованием инерциальных датчиков. Однако это число является лишь оценкой снизу, поскольку лыжи, бег и т.д. не разбивались на отдельные дисциплины.

Наконец, чтобы завершить обзор этого раздела, следует упомянуть исследования [99] и [100], посвященные проблемам реабилитации спортсменов.

4. Некоторые технические вопросы

Обзоры, подобные приведенному в предыдущем разделе, содержат разнообразные таблицы, которые сортируют большое количество опубликованных материалов по таким критериям, как количество и тип используемых датчиков, измеряемые кинематические параметры или области применения. Помимо чистой акселерометрии, они затрагивают только гировертикали и приводят наиболее значимые источники погрешностей этих устройств:

- влияние гравитации и дрейфа на численное интегрирование;
- ферромагнитные возмущения;
- недостаточная точность знания углов между осями датчика и анатомическими осями [19, 25, 101];
- погрешности из-за высокой динамики [94, 102].

Согласно этим обзорам, «было предложено множество алгоритмов для компенсации влияния данных проблем» [102]; они отражают большой опыт исследователей, но не привели к формированию системного подхода к компоновке измерительных систем для спорта. Лишь в незначительном количестве статей авторы пытаются объяснить и систематизировать алгоритмы гировертикали и компоновку датчиков гировертикали. Обсудим связанные с этим технические вопросы с опорой на рис. 9.

Блок-схема на рис. 9 представляет основную идею совместной обработки сигналов датчиков, используемых в различных вариантах измерения параметров движения. Блок 1 обозначает рассматриваемый движущийся объект. На не-

го воздействуют ускорения и угловые скорости, формируя входные данные $\mathbf{u}(t)$. Интересующее нас результирующее движение описывается вектором состояния движения $\mathbf{x}(t)$. Измерение вектора \mathbf{u} является обычно задачей ИИБ. С учетом \mathbf{x} и \mathbf{u} блок 2 генерирует второй набор сигналов датчиков, формируя $\mathbf{y}(t)$. Блок 3 содержит кинематическую модель вектора \mathbf{x} . Это набор обычных дифференциальных уравнений (или алгебраических соотношений, выведенных в результате соответствующей дискретизации), позволяющий вычислить оценку $\hat{\mathbf{x}}$ искомого вектора реального состояния движения \mathbf{x} . Блок 4 служит для вычисления оценки $\hat{\mathbf{y}}$ вектора \mathbf{y} (с использованием векторной функции \mathbf{h}). Из-за вычислительных ошибок и погрешностей измерений $\hat{\mathbf{x}}$ и $\hat{\mathbf{y}}$ отличаются от своих реальных значений. Для приведения $\hat{\mathbf{x}}$ к \mathbf{x} используется блок корректировки 5. С учетом возможностей современных компьютерных технологий на качество оценки движения не влияет выбор между использованием состояний погрешностей $\delta\mathbf{x}$ или общих состояний \mathbf{x} [103].

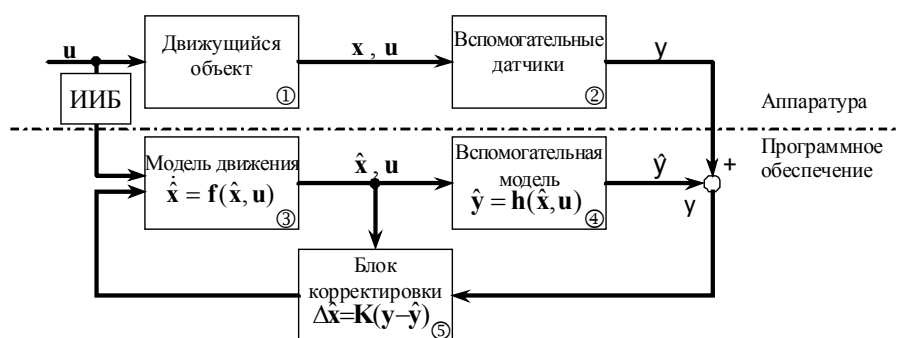


Рис. 9. Принцип интегрирования различных датчиков для комплексного измерения параметров навигации и движения

Из технических обзоров по данной теме [25, 104] следует, что существующие измерительные системы для спорта или общей биомеханики обладают определенной спецификой. Блок 1 соответствует однокомпонентному сегменту и принимается за одно твердое тело, как в навигационной технике, либо имеет многокомпонентную структуру жестких сегментов, соединенных между собой. Вектор \mathbf{x} преимущественно содержит только кватернионы или эйлеровы углы сегментов и дополняющие параметры погрешности, например смещения нулей для инерциальных датчиков. Блок 2 обычно содержит инклинометры и магнитометры. В нем также часто присутствуют приемники ГНСС и оптические системы, но их сигналы обычно не попадают в вектор \mathbf{y} и анализируются отдельно.

За исключением гиростабилизированных платформ, которые слишком тяжелы для спорта, блок 3, как правило, содержит бесплатформенный алгоритм для гировертикали или для построения полной ИНС. Последний очень редко встречается в биомеханике, тогда как гировертикали в настоящее время преобладают над чистой акселерометрией [104] (но не в спорте, рис. 4). Блок 4 чаще всего содержит один из четырех алгоритмов, основанных на векторном преобразовании величин в связанной с вектором силы тяжести системе координат в систему на базе линий магнитного поля [30].

Теоретическая база построения блока 5 довольно разнообразна, начиная с отсутствия каких-либо действий ($\mathbf{K} = \mathbf{0}$), что справедливо для короткопериод-

ных движений, и заканчивая наблюдателями Люэнбергера и несколькими вариантами фильтров Калмана. Следует также упомянуть алгоритмы на основе нелинейных решений, которые включают фильтрацию нижних частот y (подчеркивая ее долговременную точность) и фильтрацию верхних частот \hat{x} (подчеркивая кратковременную точность u).

Особенности блоков 3 и 5 требуют некоторых дополнительных замечаний:

- обычная бесплатформенная модель для блока 3 является чисто кинематической и точной, если не считать погрешностей инерциальных датчиков. Кроме того, при расчете \hat{x} возникают вычислительные погрешности. Существуют проверенные алгоритмы для этого блока, охватывающие даже аварийно-спасательные задачи и действующие для широкого диапазона динамики всех видов транспортных средств (при условии достаточного диапазона датчиков, ширины полосы пропускания и частоты дискретизации);
- часто утверждается, что динамика человека настолько отличается от динамики транспортных средств, что данные проверенные алгоритмы не подходят для биомеханики [25]. Хотя доказательств этому утверждению найти не удалось, оно доминирует, что привело к появлению многочисленных вариантов построения векторов x и f ;
- крайне важно, что данное утверждение можно опровергнуть тем, что во многих работах, посвященных спорту или общей биомеханике, в отношении блока 3 отсутствует адекватное кинематическое моделирование, основанное на численном методе или тщательный выбор датчика. Это приводит к неизбежным ошибкам, которые в основном не являются стохастическими, а систематически зависят от регистрируемого движения [25, 31, 105];
- согласно другому наблюдению, в известных учебниках редко упоминаются или подробно обсуждаются бесплатформенные системы [5, 106]. Возможно, это связано с чрезмерно высоким требованием к базовому знанию математики. В соответствующих исследованиях И. Лопес-Нава и А. Муньос-Мелендес [104] утверждают, что до 90% рассмотренных работ выполнено на достаточно низком научно-техническом уровне, а А. Куэста-Варгас и др. [22] отмечают невысокое метрологическое качество большинства исследований;
- в этой связи неудивительно, что раз пригодность фильтра Калмана для регистрации движения иногда отрицается [105], то проводится анализ многочисленных альтернатив и только около 50% исследований применяют этот метод комплексирования различных датчиков [104]. С другой стороны, превосходство фильтра Калмана для использования в блоке 5 является общепризнанным [30, 107].

Это не единственные причины, по которым конструкции систем, представленные на рис. 9, отличаются таким разнообразием в спорте и биомеханике. Другая причина – путаница в использовании технических терминов. Например, такие выражения, как «6-степенной ИИБ» или «9-осный ИИБ», употребляются «вокруг и около» гировертикали, которая фиксирует только 3 степени свободы вращения твердого тела. Данные термины означают блоки датчиков с 6 и 9 независимыми сигналами соответственно, и некоторые ошибочно полагают, будто магнитометр является инерциальным датчиком [25, 95]. Другой важный пример: «комплексная система» не всегда предполагает, что в ней происходит интегрирование сигналов датчиков; это может означать только то, что она также регистрирует физиологические параметры, такие как частота сердечных сокращений [94].

А. Филиппески и др. [25] называют очень важную причину разнообразия вариантов гировертикали в биомеханике: *«Следует отметить, что результаты оценки всегда зависят от метода оценивания, однако в настоящее время используется большое количество таких методов. Следовательно, трудно провести объективное сравнение результатов в разных публикациях»*. Имеется в виду, что для биомеханических применений настоятельно необходимы стандарты испытаний и оценки гировертикалей и другого оборудования с инерциальными датчиками, но их пока нет.

На основании всего вышесказанного будет справедливо отметить, что для спорта и других областей биомеханики общее представление о возможностях и ограничениях инерциальной технологии еще не вполне сформировалось. По этой причине ключевые элементы инерциальной навигационной техники, такие как гировертикаль, модели погрешностей [109] или счисление пути движущегося объекта [110], нередко изобретаются заново.

5. Выводы

Принимая во внимание требования к использованию инерциальных датчиков в биомеханике, приведенные в разделе 2.1, становится очевидным, что появление технологии МЭМС на рынке стало поворотным событием. Соответственно, уже почти 15 лет наблюдается постоянный рост количества исследований и работ по внедрению инерциальной технологии в сфере спорта и медицины. Судя по числу публикаций в тематических журналах и материалах конференций, а также по разнообразию приложений в рассматриваемой области, эти исследования отнюдь не достигли уровня насыщения. Вполне возможно, что в будущем ИИБ будут массово использоваться в отдельных видах спорта, трудовой деятельности и здравоохранении (уже сегодня объем продаж компании Catapult Group International Ltd, известного производителя специализированных профессиональных ИИБ, составляет несколько тысяч приборов в год [111]).

Тем не менее за этими многообещающими перспективами кроются некоторые критически важные аспекты, требующие тщательного изучения, которые можно проиллюстрировать на примерах из области спорта [112–114].

- Обращение с инерциальными датчиками и интегрированными системами навигации, а также обработка результатов измерений достаточно сложны и требуют соответствующего знания теории систем и трехмерной кинематики. С другой стороны, если достаточное удобство в их использовании не будет обеспечено путем инженерно-технической проработки, то это приведет, во-первых, к неправильному использованию инерциальных систем, а во-вторых, к неоправданным ожиданиям. Поэтому необходимо срочно заполнить *«пробел, из-за которого тренеры и практикующие специалисты все еще далеки от применения данной технологии»* [26].
- Инерциальные системы для биомеханики ставят очень интересные технические задачи перед специалистами в данной области. Часто эти измерительные устройства предъявляют достаточно высокие требования к выставке или кинематике многокомпонентных структур.
- Постоянный контроль за людьми с помощью инерциальных систем поднимает этические и юридические вопросы, такие как равные возможности в соревновательных видах спорта и врачебная тайна.

- Инерциальные системы в спорте могут иметь эффект плацебо. Поэтому оценка эффективности в спорте и медицине требует наличия уместных методов диагностики.

Эти ключевые проблемы могут иметь адекватные решения, однако для этого требуются надежные и точные измерительные системы.

Чтобы наиболее полно охарактеризовать ситуацию с использованием инерциальных датчиков в спорте, будет небесполезно рассмотреть еще и экономический аспект. Между спортсменами и спортивными организациями, с одной стороны, и предприятиями, продающими специализированные инерциальные измерительные системы, – с другой, существует целая система взаимоотношений. В ее основе лежит сложная структура спроса и предложения, которую можно назвать «ансамблем ресурсов» [115]: в настоящее время применение инерциальных датчиков в спорте – дань моде со стороны определенной отрасли промышленности. Предприятия этой отрасли получают дополнительные преимущества и приобретают маркетинговую популярность благодаря вниманию общественности, которое связано не столько с техническим качеством изделий, сколько с популярностью определенных видов спорта. Вместе с тем эти предприятия мотивируют прежде всего спортсменов, создавая у них чувство поддержки, без которой они со временем не смогут обходиться.

Поскольку любая мода преходяща, очень важно воспользоваться нынешней популярностью для создания новой устойчивой области применения инерциальных датчиков. При этом, как было отмечено в данной статье и в ряде процитированных публикаций, требуется помощь со стороны инженерно-технических специалистов в области инерциальных систем. Автор еще раз особо подчеркивает эту необходимость.

В сфере транспортных технологий проводятся различные конференции, где происходит обмен научным опытом, все участники говорят на общем техническом языке, а для испытаний и сертификации инерциальных систем существуют специальные стандарты. Для применений в области спорта ничего этого нет. Этот пробел должен быть заполнен в ближайшем будущем.

Благодарность

Автор выражает благодарность Фолькеру Липпенсу из Гамбургского университета и Томасу Хенке из Рурского университета г. Бохума за участие в обсуждениях обзора литературы и помощь в написании статьи. Беате Черански из Штутгартского университета предоставила ценную ссылку на работу [115].

ЛИТЕРАТУРА

Работы, отмеченные *, заслуживают особого внимания в качестве дополнительной литературы.

1. **Broelmann, J.**, *Intuition und Wissenschaft in der Kreiseltechnik* (Intuition and science in gyro technology), München: Deutsches Museum, 2002.
2. **Kopta, V., Farserotu, J., and Enz, C.**, FM-UWB: towards a robust, low-power radio for body area networks, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 5, paper 1043.
3. **Szczęsna, A., Skurowski, P., Lach, E., Pruszowski, P., Pęszor, D., Paszkuta, M., Słupik, J., Lebek, K., Janiak, M., Polański, A., and Wojciechowski, K.**, Inertial Motion Capture Costume Design Study, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 3., paper 612.
4. **Marées, H. de and Mester, J.**, *Sportphysiologie III* (Physiology of sports III), Frankfurt am Main: Diesterweg, 1984.

5. **Titterton, D.H. and Weston, J.L.**, *Strapdown inertial navigation technology*, Stevenage: Institution of Electrical Engineers, 2004, 2nd edition.
6. ***Wagner, J.F.**, Adapting the principle of integrated navigation systems to measuring the motion of rigid multibody systems, *Multibody System Dynamics*, 2004, vol. 11, no. 1, pp. 87–110.
7. **Miezal, M., Taetz, B., and Bleser, G.**, On inertial body tracking in the presence of model calibration errors, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 7, paper 1132.
8. **Walter, P.L.**, The history of the accelerometer, *Sound and Vibration*, 2007, no. 1, pp. 84–92.
9. **Povova, T.**, *The biodynamics of the child's independent walking*, Moscow: Central Scientific Institute of Physical Culture, 1940.
10. **Voigt, R.**, Über den Aufbau von Bewegungsgestalten (About the build of motion forms), *Neue Psychologische Studien* (New psychological studies), 1933, vol. 9, pp. 5–32.
11. ***Morris, J.R.W.**, Accelerometry – A technique for the measurement of human body movements, *Journal of Biomechanics*, 1973, vol. 6, no. 6, pp. 729–736.
12. **Cavagna, G., Saibene, F., and Margaria, R.**, A three-directional accelerometer for analyzing body movements, *Journal of Applied Physiology*, 1961, vol. 16, p. 191.
13. **Thomas, J.G.**, Use of a Piezo-Accelerometer in Studying Eye Dynamics, *Journal of the Optical Society of America*, 1965, vol. 55, no. 5, pp. 534–537.
14. **Baselli, G., Legnani, G., Franco, P., Brognoli, F., Marras, A., Quaranta, F., and Zappa, B.**, Assessment of inertial and gravitational inputs to the vestibular system, *Journal of Biomechanics*, 2001, vol. 34, no. 6, pp. 821–826.
15. **Gwin, J.T., Chu, J.J., McAllister, T.A., and Greenwald, R.M.**, In situ measures of head impact acceleration in NCAA division I men's ice hockey: implications for ASTM F1045 and other ice hockey helmet standards, *Journal of ASTM International*, 2009, vol. 6, no. 6, paper JA1101848.
16. **Llosa, J., Vilajosana, I., Vilajosana, X., Navarro, N., Suriñach, E., and Marquès, J.M.**, REMOTE, a wireless sensor network based system to monitor rowing performance, *Sensors*, 2009, vol. 9, no. 9, pp. 7069–7082.
17. **Djurić-Jovičić, M.D., Jovičić, N.S., and Popović, D.B.**, Kinematics of gait: new method for angle estimation based on accelerometers, *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 11, pp. 10571–10585.
18. **Park, S. and Hong, S.K.**, Angular rate estimation using a distributed set of accelerometers, *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 11, pp. 10444–10457.
19. ***Picerno, P.**, 25 years of lower limb joint kinematics by using inertial and magnetic sensors: A review of methodological approaches, *Gait & Posture*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 239–246.
20. ***Zorn, A.H.**, A merging of system technologies: all-accelerometer inertial navigation and gravity gradiometry, *2002 IEEE Position Location and Navigation Symposium*, Piscataway, NJ: IEEE, 2002, pp. 66–73.
21. **Tsunoda, K.**, The application of a kinematic GPS device to the analysis of aerodynamic force during ski jumping, *22nd annual congress of the European College of Sport Science*, Ferrauti, A., Platen, P., Griminger-Seidensticker, E., Jaitner, T., Bartmus, U., Becher, L., De Marées, M., Mühlbauer, T., Schauerer, A., Wiewelhove, T., and Tsolakidis, E. (eds.), MetropolisRuh: ECSS, 2017, pp. 535–536.
22. ***Cuesta-Vargas, A.I., Galán-Mercant, A., Williams, J.M.**, The use of inertial sensors system for human motion analysis, *Physical Therapy Reviews*, 2010, vol. 15, no. 6, pp. 462–473.
23. **Cahill-Rowley, K. and Rose, J.**, Temporal-spatial reach parameters derived from inertial sensors: Comparison to 3D marker-based motion capture, *Journal of Biomechanics*, 2017, vol. 52, pp. 11–16.
24. **Robert-Lachaine, X., Mecheri, H., Larue, C., and Plamondon, A.**, Validation of inertial measurement units with an optoelectronic system for whole-body motion analysis, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 609–619.
25. ***Filippeschi, A., Schmitz, N., Miezal, M., Bleser, G., Ruffaldi, E., and Stricker, D.**, Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 6, paper 1257
26. ***Camomilla, V., Bergamini, E., Fantozzi, S., and Vannozzi, G.**, In-field use of wearable magneto-inertial sensors for sports performance evaluation, *33 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Colloud, F., Domalain, M., and Monnet, T. (eds.), Konstanz: ISBS, 2015, pp. 1425–1428.
27. **Hartmann, B., Link, N., and Trommer, G.F.**, Indoor 3D position estimation using low-cost inertial sensors and marker-based video-tracking, *2010 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, Piscataway, NJ: IEEE, 2010, pp. 319–326.
28. **Favre, J., Jolles, B.M., Siegris, O., and Aminian, K.**, Quaternion-based fusion of gyroscopes and accelerometers to improve 3D angle measurement, *Electronics Letters*, 2006, vol. 42, no. 11, pp. 612–614.

29. **Cooper, G., Sheret, I., McMillan, L., Siliverdis, K., Sha, N., Hodgins, D., Kenney, L., and Howard, D.**, Inertial sensor-based knee flexion/extension angle estimation, *Journal of Biomechanics*, 2009, vol. 42, no. 16, pp. 2678–2685.
30. ***Sabatini, A.M.**, Estimating three-dimensional orientation of human body parts by inertial/magnetic sensing, *Sensors*, 2011, vol. 11, no.2, pp. 1489–1525.
31. **Ligorio, G., Bergamini, E., Pasciuto, I., Vannozzi, G., Cappelletto, A., and Sabatini, A.M.**, Assessing the performance of sensor fusion methods: application to magnetic-inertial-based human body tracking, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 2, paper 153.
32. **Tong, K. and Granat, M.H.**, A practical gait analysis system using gyroscopes, *Medical Engineering & Physics*, 1999, vol. 21, no. 2, pp. 87–94.
33. **van der Slikke, R.M.A., Berger, M.A.M., Bregman, D.J.J., Lagerberg, A.H., and Veeger, H.E.J.**, Opportunities for measuring wheelchair kinematics in match settings – reliability of a three inertial sensor configuration, *Journal of Biomechanics*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 3398–3405.
34. **Norris, M., Anderson, R., and Kenny, I.C.**, Method analysis of accelerometers and gyroscopes in running gait: A systematic review, *Journal of Sports Engineering and Technology*, 2014, vol. 228, no. 1, pp. 3–15.
35. **Li, Q., Young, M., Naing, V., and Donelan, J.M.**, Walking speed estimation using a shank-mounted inertial measurement unit, *Journal of Biomechanics*, 2010, vol. 43, no. 8, pp. 1640–1643.
36. ***Kong, W., Sessa, S., Zecca, M., and Takanishi, A.**, Anatomical calibration through post-processing of standard motion tests data, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 12, paper 2011.
37. **Chardonens, J., Favre, J., Aminian, K.**, An effortless procedure to align the local frame of an inertial measurement unit to the local frame of another motion capture system, *Journal of Biomechanics*, 2012, vol. 45, no. 13, pp. 2297–2300.
38. **Wu, L.C., Laksari, K., Kuo, C., Luck, J.F., Kleiven, S., Bass, C.R., and Camarillo, D.B.**, Bandwidth and sample rate requirements for wearable head impact sensors, *Journal of Biomechanics*, 2016, vol. 49, no. 13, pp. 2918–2924.
39. **Sessa, S.**, Personal communication, 9 May 2017.
40. **Cappelletto, A., Croce, U.D., Leardini, A., and Chiari, L.**, Human movement analysis using stereophotogrammetry: Part 1: theoretical background, *Gait & Posture*, 2005, vol. 21, no. 2, pp. 186–196.
41. ***Gravina, R., Alinia, P., Ghasemzadeh, H., Fortino, G.**, Multi-sensor fusion in body sensor networks: State-of-the-art and research challenges, *Information Fusion*, 2017, vol. 35, pp. 68–80.
42. ***Buke, A., Gaoli, F., Yongcai, W., Lei, S., and Zhiqi, Y.**, Healthcare algorithms by wearable inertial sensors: a survey, *China Communications*, 2015, vol. 12, no. 4, pp. 1–12.
43. **Rinn, P., Wächter, M., and Peinke, J.**, On the application of the Langevin approach to balance data, *Zur Problematik der Gleichgewichts-Leistung im Handlungsbezug: Theorie, Messtechnik, Datenverarbeitung, Anwendungen* (On the problem of balance performance during actions: theory, measurement technology, data processing, applications), Lippens, V. and Nagel, V. (eds.), Hamburg: Feldhaus, 2016, pp. 44–50.
44. **Gravenhorst, F., Muaremi, A., Draper, C., Galloway, M. and Tröster, G.**, Identifying unique biomechanical fingerprints for rowers and correlations with boat speed? A data-driven approach for rowing performance analysis, *International Journal of Computer Science in Sport*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 4–33.
45. **Avvenuti, M., Cesarini, D., and Cimino, M.G.C.A.**, MARS, a multi-agent system for assessing rowers' coordination via motion-based stigmergy, *Sensors*, 2013, vol. 13, no. 9, pp. 12218–12243.
46. **Özdemir, A.T.**, An analysis on sensor locations of the human body for wearable fall detection devices: principles and practice, *Sensors*, 2016, vol. 16, paper 1161.
47. **Moschetti, A., Fiorini, L., Esposito, D., Dario, P., and Cavallo, F.**, Recognition of daily gestures with wearable inertial rings and bracelets, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 8, paper 1341.
48. ***Gløersen, Ø., Myklebust, H., Hallén, J., and Federolf, P.**, Technique analysis in elite athletes using principal component analysis, *Journal of Sports Sciences*, 2017, to be published
49. **Hafer, J.F. and Boyer, K.A.**, Variability of segment coordination using a vector coding technique: Reliability analysis for treadmill walking and running, *Gait & Posture*, 2017, vol. 51, pp. 222–227.
50. **Zemp, R., List, R., Gülay, T., Elsig, J.P., Naxera, J., Taylor, W.R., and Lorenzetti, S.**, Soft tissue artefacts of the human back: comparison of the sagittal curvature of the spine measured using skin markers and an open upright MRI, *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, no. 4, paper e95426.
51. **Ludewig, P.M., Cook, T.M., and Shields, R.K.**, Comparison of surface sensor and bone-fixed measurement of humeral motion, *Journal of Applied Biomechanics*, 2002, vol. 18, no. 2, pp. 163–170.
52. **Nester, C., Jones, R.K., Liu, A., Howard, D., Lundberg, A., Arndt, A., Lundgren, P., Stacoff, A., and Wolf, P.**, Foot kinematics during walking measured using bone and surface mounted markers, *Journal of Biomechanics*, 2007, vol. 40, no. 15, pp. 3412–3423.

53. **Levine, R.S., King, A.I., and Tennyson, S.A.**, A simplified method of attaching accelerometer packages to bone, *Journal of Biomechanics*, 1979, vol. 12, pp. 47–54.
54. **Norton, F.H. and Allen E.T.**, *Accelerations in flight, Report No. 99*, Hampton, VA: NACA Langley Aeronautical Laboratory, 1921.
55. **Collin, J., Mezentsev, O., and Lachapelle, G.**, Indoor positioning system using accelerometry and high accuracy heading sensors, *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, Fairfax, VA: ION, 2003, pp. 1164–1170.
56. **Ewins, D.J.**, *Modal testing: theory, practice and application*, 2nd ed., Baldock: Research Studies Press, 2000.
57. **Wakeling, J.M. and Nigg, B.M.**, Soft-tissue vibrations in the quadriceps measured with skin mounted transducers, *Journal of Biomechanics*, 2001, vol. 34, no. 4, pp. 539–543.
58. **Smidt, G.L., Arora, J.S., and Johnston, R.C.**, Accelerographic analysis of several types of walking, *American Journal of Physical Medicine*, 1971, vol. 50, pp. 285–300.
59. **Dubus, G.J.**, Evaluation of four models for the sonification of elite rowing, *Journal on Multimodal User Interfaces*, 2012, vol. 5, no. 3, pp. 143–156.
60. **Wong, T.C., Webster, J.G., Montoye, H.J., and Washburn, R.**, Portable accelerometer device for measuring human energy expenditure, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1981, vol. 28, no. 6, pp. 467–471.
61. **Rispens, S.M., Pijnappels, M., van Schooten, K.S., Beek, P.J., Daffertshofer, A., and van Dieën, J.H.**, Consistency of gait characteristics as determined from acceleration data collected at different trunk locations, *Gait & Posture*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 187–192.
62. **Hildebrand, M., van Hees, V.T., Hansen, B.H., Ekelund, U.**, Age group comparability of raw accelerometer output from wrist- and hip-worn monitors, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2014, vol. 46, no. 9, pp. 1816–1824.
63. **Sasaki, J.E., John, D., and Freedson, P.S.**, Validation and comparison of ActiGraph activity monitors, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2011, vol. 14, no. 5, pp. 411–416.
64. **John, D. and Freedson, P.**, ActiGraph and Actical physical activity monitors: a peek under the hood, *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2012, vol. 44, no. 1S, pp. S86–S89.
65. **Hills, A.P., Mokhtar, N., and Byrne N.M.**, Assessment of physical activity and energy expenditure: an overview of objective measures, *Frontier in Nutrition*, 2014, vol. 1, paper 5.
66. **Ganzevles, S., Vullings, R., Beek, P.J., Daanen, H., and Truijens, M.**, Using tri-axial accelerometry in daily elite swim training practice, *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 5, paper 990.
67. **Troiano, R.P., McClain, J.J., Brychta, R.J., and Chen, K.Y.**, Evolution of accelerometer methods for physical activity research, *British Journal of Sports Medicine*, 2014, vol. 48, no. 13, pp. 1019–1023.
68. **Wagner, J.F. and Perlmutter, M.**, The ISS symposium turns 50: trends and developments of inertial technology during five decades. *European Journal of Navigation*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 13–23.
69. **Luinge, H.J.**, *Inertial sensing of human movement*, Enschede: Twente University Press, 2002.
70. **Mayagoitia, R.E., Nene, A.V., Veltink, P.H.**, Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems, *Journal of Biomechanics*, 2002, vol. 35, no. 4, pp. 537–542.
71. **Faber, G.S., Chang, C.C., Kingma, I., Dennerlein, J.T., and van Dieën, J.H.**, Estimating 3D L5/S1 moments and ground reaction forces during trunk bending using a full-body ambulatory inertial motion capture system, *Journal of Biomechanics*, 2016, vol. 49, no. 6, pp. 904–912.
72. **Ma, J., Kharboutly, H., Benali, A., Benamar, F., and Bouzit, M.**, Joint angle estimation with accelerometers for dynamic postural analysis, *Journal of Biomechanics*, 2015, vol. 48, no. 13, pp. 3616–3624.
73. ***Düking, P., Hotho, A., Holmberg, H.-C., Fuss, F.K., and Sperlich, B.**, Comparison of non-invasive individual monitoring of the training and health of athletes with commercially available wearable technologies, *Frontiers in Physiology*, 2016, vol. 7, paper 71.
74. **Charlton, P.C., Kenneally-Dabrowski, C., Sheppard, J., and Spratford, W.**, A simple method for quantifying jump loads in volleyball athletes, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 241–245.
75. **Reynolds, B.B., Patrie, J., Henry, E.J., Goodkin, H.P., Broshek, D.K., Wintermark, M., and Druzgal, T.J.**, Practice type effects on head impact in collegiate football, *Journal of Neurosurgery*, 2016, vol. 124, no. 2, pp. 501–510.
76. **Kuo, C.Y., Louie, J.K., and Mote, C.D.**, Field measurements in snow skiing injury research, *Journal of Biomechanics*, 1983, vol. 16, no. 8, pp. 609–624.
77. **Kurt, M., Laksari, K., Kuo, C., Grant, G.A., and Camarillo, D.B.**, Modeling and optimization of airbag helmets for preventing head injuries in bicycling, *Annals of Biomedical Engineering*, 2017, vol. 45, no. 4, pp. 1148–1160.

78. **Louie, J.K., Kuo, C.Y., Gutierrez, M.D., and Mote, C.D.**, Surface EMG and torsion measurements during snow skiing: Laboratory and field tests, *Journal of Biomechanics*, 1984, vol. 17, no 10, pp. 713–719.
79. **Borgert, O. and Henke, T.**, Motorische Radfahrkompetenz von Kindern und Jugendlichen (Motor competence of children and adolescents). Münster: GUVV Westfalen-Lippe, 1997.
80. **Wagner, J.F., Bartmus, U., and de Marées, H.**, Three-axes gyro system quantifying the specific balance of rowing, *International Journal of Sports Medicine*, 1993, vol. 14, suppl. 1, pp. S35–S38.
81. **Henke, T.**, *Zur biomechanischen Validierung von Komponenten der Fahrtechnik im Straßenradsport* (Biomechanical Validation of Components of Riding Technique in Road Bicycle Racing), Köln: Sport und Buch Strauss, 1994.
82. **Ishiko, T.**, Biomechanics of rowing, *Biomechanics II*, Vredenburg, J. and Wartenweiler, J. (eds.), Basel: Karger Publishers, 1971, pp. 249–252.
83. **Loschner, C., Smith, R., and Galloway, M.**, Intra-stroke boat orientation during single sculling, *18 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Hong, Y., Johns, D.P., and Sanders, R. (eds.), Konstanz: ISBS, 2000, pp. 66–69.
84. **Michael, J.S., Smith, R., and Rooney, K.B.**, Determinants of kayak paddling performance, *Sports Biomechanics*, 2009, vol. 8, no. 2, pp 167–179.
85. **Tessendorf, B., Gravenhorst, F., Arnrich, B., and Tröster, G.**, An IMU-based sensor network to continuously monitor rowing technique on the water, *2011 Seventh International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing*, Piscataway, NJ: IEEE, 2011, pp. 253–258.
86. **Ehmen, H. and Böhmert, W.**, Multidimensionale Erfassung der Ruderbootsbewegung durch hochpräzises INS/GNSS-Messsystem (Multidimensional capture of the rowing boat motion by a high-precision INS/GNSS measurement system), *14. Frühjahrsschule "Informations- und Kommunikationstechnologien in der angewandten Trainingswissenschaft"* (14th spring school "information and communication technologies in applied training science"), Leipzig: IAT, 2012, pp. 29–33.
87. **Reichmann, M.**, Analyse der Ruderbootsbewegung zur Optimierung des Fahrverhaltens des Bootes (Analysis of the rowing boat motion for optimizing the moving performance of the boat), Berlin: Logos, 2015.
88. **Toshiyuki, O., Yuuki, H., Kouichi, K., Yoshihiro, T.**, Evaluation of the motion characteristics of personal water craft and exercise stress of rider in jet sports using accelerometer and electromyography, *22nd annual congress of the European College of Sport Science*, Ferrauti, A., Platen, P., Grimmering-Seidensticker, E., Jaitner, T., Bartmus, U., Becher, L., De Marées, M., Mühlbauer, T., Schauerte, A., Wiewelhoeve, T., and Tsolakidis, E. (eds.), MetropolisRuh: ECSS, 2017, p. 537.
89. ***Mooney, R., Corley, G., Godfrey, A., Quinlan, L.R., and ÓLaighin, G.**, Inertial sensor technology for elite swimming performance analysis: a systematic review, *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1, paper 18.
90. **Walker, A.M., Applegate, C., Pfau, T., Sparkes, E.L., Wilson, A.M., and Witte, T.H.**, The kinematics and kinetics of riding a racehorse: A quantitative comparison of a training simulator and real horses, *Journal of Biomechanics*, 2016, vol. 49, no. 14, pp. 3368–3374.
91. **Martin, P., Cheze, L., Pourcelot, P., Desquilbet, L., Duray, L., and Chateau, H.**, Effect of the rider position during rising trot on the horse's biomechanics (back and trunk kinematics and pressure under the saddle), *Journal of Biomechanics*, 2016, vol.49, no. 7, pp. 1027–1033.
92. **Eckardt, F. and Witte, K.**, Ganzheitliche Bewegungsanalyse des Reiters im Dressurreiten unter Einsatz eines Inertialmesssystems (Comprehensive motion analysis of the rider in dressage riding using an inertial measurement system), *BISp-Jahrbuch Forschungsförderung 2013/14* (BISp-yearbook of research funding 2013/14), Köln: Sportverlag Strauß, 2015, pp. 79–86.
93. **Egan, S., Brama, P., and McGrath, D.**, Mapping the ecological validity of equine gait analysis research: a review of literature 1978–2015, *22nd annual congress of the European College of Sport Science*, Ferrauti, A., Platen, P., Grimmering-Seidensticker, E., Jaitner, T., Bartmus, U., Becher, L., De Marées, M., Mühlbauer, T., Schauerte, A., Wiewelhoeve, T., and Tsolakidis, E. (eds.), MetropolisRuh: ECSS, 2017, p. 145.
94. **Dellaserra, C.L., Gao, Y., Ransdell, L.**, Use of integrated technology in team sports: a review of opportunities, challenges, and future directions for athletes, *Journal of Strength & Conditioning Research*, 2014, vol. 28, no. 2, pp. 556–573.
95. **Ahmad, N., Ghazilla, R.A.R., Khairi, N.M., and Kasi, V.**, Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor applications, *International Journal of Signal Processing Systems*, 2013, vol. 1, no. 2, pp. 256–262.
96. **Schwameder, H.**, Biomechanics research in ski jumping: 1991-2006, *Sports Biomechanics*, 2008, vol. 7, no. 1, pp. 114–136.

97. **Chardonens, J., Favre, J., Cuendet, F., Gremion, G., and Aminian, K.,** A system to measure the kinematics during the entire ski jump sequence using inertial sensors, *Journal of Biomechanics*, 2013, vol. 46, no. 1, pp. 56–62.
98. **van der Slikke, R.M.A., Berger, M.A.M., Bregman, D.J.J., Lagerberg, A.H., and Veeger, H.E.J.,** Opportunities for measuring wheelchair kinematics in match settings; reliability of a three inertial sensor configuration, *Journal of Biomechanics*, 2015, vol. 48, no. 12, pp. 3398–3405.
99. ***Patel, S., Park, H., Bonato, P., Chan L., and Rodgers, M.,** A review of wearable sensors and systems with application in rehabilitation, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2012, vol. 9, no. 1, paper 21.
100. **Wang, Q., Markopoulos, P., Yu, B., Chen, W., and Timmermans, A.,** Interactive wearable systems for upper body rehabilitation: a systematic review, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 2017, vol. 14, no. 1, paper 20.
101. **Iosa, M., Picerno, P., Paolucci, S., and Morone, G.,** Wearable inertial sensors for human movement analysis, *Expert Review of Medical Devices*, 2016, vol. 13, no. 7, pp. 641–659.
102. **Schmidt, M., Wille, S., Rheinländer, C., Wehn, N., and Jaitner, T.,** A wearable flexible sensor network platform for the analysis of different sport movements, *Advances in Human Factors in Wearable Technologies and Game Design*, Ahram, T. and Falcão, C. (eds.), Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 3–14.
103. **Wagner, J.F. and Wieneke, T.,** Integrating satellite and inertial navigation – conventional and new fusion approaches, *Control Engineering Practice*, 2003, vol. 11, no. 5, pp. 543–550.
104. ***I. López-Nava, H. and Muñoz-Meléndez, A.,** Wearable inertial sensors for human motion analysis: a review, *IEEE Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 22, pp. 7821–7834.
105. **Young, A.D.,** Comparison of orientation filter algorithms for realtime wireless inertial posture tracking, *Sixth International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Lo, B. and Mitcheson, P. (eds.), Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 59–64.
106. **Jekeli, C.,** *Inertial navigation systems with geodetic applications*, Berlin, New York: de Gruyter, 2001.
107. **Brückner, H.P., Spindeldreier, C., Blume, H., Schoonderwaldt, E., and Altenmüller, E.,** Evaluation of inertial sensor fusion algorithms in grasping tasks using real input data, *Ninth International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, Yang, G.-Z. (ed.), Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2012, pp. 189–194.
108. **Meng, X., Tao, G., Zhang, Z., Sun, S., Wu J., and Wong, W.C.,** Displacement estimation for different gait patterns in micro-sensor motion capture, *15th International Conference on Information Fusion*, Piscataway, NJ: IEEE, 2012, pp. 1315–1322.
109. **Faber, G.S., Chang, C.-C., Rizun, P., and Dennerlein, J.T.,** A novel method for assessing the 3-D orientation accuracy of inertial/magnetic sensors, *Journal of Biomechanics*, 2013, vol. 46, no. 15, pp. 2745–2751.
110. **Ojeda, L., Rebula, J.R., Adamczyk, P.G., and Kuo, A.D.,** Mobile platform for motion capture of locomotion over long distances, *Journal of Biomechanics*, 2013, vol.46, no 13, pp. 2316–2319.
111. **Prospectus**, Docklands, VIC: Catapult Group International Ltd., 2015, <http://www.catapultsports.com/au/investors/prospectus>, accessed on 9 August 2017.
112. **Marin, F., Fradet, L., Lepetit, K., Hansen, C., and Mansour, K.B.,** Inertial measurement unit in biomechanics and sport biomechanics: past, present, future, *33 International Symposium on Biomechanics in Sports*, Colloud, F., Domalain, M., and Monnet, T. (eds.), Konstanz: ISBS, 2015, pp. 1422–1424.
113. **Zok, M.,** Inertial sensors are changing the games, *2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, Piscataway, NJ: IEEE, 2014, pp. 1–3.
114. **Vandoni, M., Correale, L., Del Bianco, M., Marin, L., and Codrons, E.,** Does reactivity to accelerometers occur in a single trial? Brief report in a sample of young adults, *Journal of Health Psychology*, 2016, electr. pub. ahead of print.
115. **Ash, M.,** Wissenschaft und Politik als Ressourcen für einander (Science and politics being resources for each other), *Wissenschaften und Wissenschaftspolitik: Bestandsaufnahmen zu Formationen, Brüchen und Kontinuitäten im Deutschland des 20. Jahrhunderts* (Sciences and science politics: surveys of formations, breaks, and continuities in Germany during the 20th century), v. Bruch, R. and Kaderas, B. (eds.), Stuttgart: Steiner, 2002, pp. 32–51.

Wagner J. F. (University of Stuttgart, Stuttgart, Germany)

About Motion Measurement in Sports Based on Gyroscopes and Accelerometers – An Engineering Point of View. *Гироскопия и Навигация*. 2017. Vol. 25. No. 3 (98). P. 3–31.

Abstract. Inertial sensors are powerful motion measurement devices. They are well-known in vehicle guidance and enable a detailed capture of position, attitude, velocity, and acceleration. Due to modern technology, navigation systems based on these sensors became increasingly small, light, and inexpensive. So, they suggest themselves for motion analysis in sports as an arising application area. Considering the last decades, this paper outlines and discusses the introduction and typical usage of inertial and integrated navigation systems in sports and biomechanics respectively.

Key words: motion measurement, biomechanics; multibody systems, integrated systems.

Материал поступил 10.08.2017