

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**о диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Брагина Александра Викторовича**  
**на тему: «Методы навигации пешехода с использованием**  
**микромеханических инерциальных датчиков»**  
**по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин»**

Для решения задачи автономной навигации традиционно применяются инерциальные навигационные системы (ИНС). Несмотря на заметный прогресс в технологиях, автономные ИНС пока недоступны в областях, где требуются миниатюрные и дешевые устройства массового производства.

К последним относятся инерциальные измерительные блоки на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС). Из-за больших погрешностей на них нельзя построить автономную ИНС, однако навигационная задача решается за счет комплексирования измерений МЭМС и дополнительной внешней информации, либо априорных данных о движении. В настоящее время для комплексирования обычно применяют спутниковые приемники. Но из-за слабой помехозащищенности спутниковых приемников такая навигационная система всегда неавтономна.

Поэтому большой практический интерес представляет задача автономной навигации на базе МЭМС и априорных данных о характере движения объекта-носителя навигационной системы. Внешняя информация при этом либо не применяется, либо выбираются источники, не подверженные внешним помехам.

Именно такая задача рассматривается в диссертации А. В. Брагина. В ней исследуются методы навигации пешехода при помощи инерциальных блоков на основе МЭМС, закрепленных на стопах, без привлечения дополнительных источников корректирующей информации. Априорными данными для коррекции являются: наличие остановок стоп, ограниченное расстояние между стопами и

прямолинейные участки траекторий с известными направлениями, если движение происходит в здании с заданной ориентацией стен или по прямым улицам.

Для формирования оценок погрешностей и коррекции навигационных параметров используется обобщенный фильтр Калмана (ОФК). Оценки считаются состоятельными, если ковариации, сформированные фильтром, близки к фактическим средним квадратам ошибок оценок. Автором вводится понятие структурной несостоятельности фильтра, позволяющее судить об оцениваемости по сравнению грамианов наблюдаемости систем уравнений и измерений, лежащих в основе фильтра, на идеальной и вычисленной траекториях движения.

Показано, что состоятельность оценок фильтра зависит от выбора систем координат и структуры системы уравнений ошибок. Для коррекции по нулю скорости и по расстоянию между стопами состоятельные оценки дает фильтр на основе системы динамических ошибок положения и скорости, а не полных ошибок.

Получено несколько общих утверждений, связывающих структурную несостоятельность, управляемость и наблюдаемость, а также структурную несостоятельность и наличие групп симметрий в измерениях и системе.

Проведен анализ многочисленных публикаций по теме исследования, на этой основе создан новый адаптивный алгоритм коррекции с настройкой по фактическим шумам датчиков. Показано, что он дает меньшие погрешности в сравнении с известными алгоритмами. Выполнен внушительный объем экспериментов и работ по анализу их результатов.

#### Актуальность темы

Исследования и разработки в области систем пешеходной навигации ведутся рядом известных компаний и представлены в научных публикациях. Такие системы востребованы для работы в условиях, когда радионавигационные средства или визуальные наблюдения ограничены или недоступны, например, при чрезвычайных ситуациях.

Особый интерес представляет уменьшение навигационных погрешностей минимальными аппаратными средствами. Эта актуальная задача и является основным предметом исследования в диссертации, в которой получены положительные результаты, подтвержденные экспериментально.

#### Степень обоснованности и достоверности

В основе работы лежат известные результаты теории инерциальной навигации, теоретической механики, линейной алгебры, теории дифференциальных уравнений и теории вероятностей. Для исследования оцениваемости применяется аппарат калмановской фильтрации, анализа наблюдаемости и управляемости, традиционно используемый в подобных задачах.

Новые понятия, утверждения и теоремы формализуются и доказываются. Текст достаточно полно описывает детали проведенных исследований и отражает их результаты.

#### Научная новизна

Предложено понятие структурной несостоятельности фильтра Калмана. На его основе для задачи пешеходной навигации проведен анализ фильтров, вектор состояния которых включает полные и динамические ошибки положения и скорости и их комбинации. Для измерений по нулевой скорости и расстоянию между стопами показано, что состоятельные оценки дает фильтр на основе динамических ошибок. Установленный результат представляет общий интерес для решения рассмотренных в работе и родственных задач. Предложен новый адаптивный алгоритм, его точность по представленным данным моделирования выше чем у известных из литературы алгоритмов.

#### Апробация работы и публикации

Результаты работы докладывались на международных и всероссийских научных конференциях. По материалам диссертации подготовлены 11

публикаций в печатных изданиях, 3 из которых – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук.

#### Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, списка обозначений и аббревиатур, трех глав, заключения и списка литературы, изложена на 164 страницах.

Во введении описываются цели и методы исследования, обосновывается актуальность и новизна.

Первая глава посвящена анализу публикаций и подходов к решению задачи пешеходной навигации. Описан метод инерциального счисления, его особенности и ограничения для пешеходной навигации. Проработан большой объем публикаций, по ним сделан подробный обзор, в котором описаны существующие подходы к решению задачи и характерные проблемы.

Во второй главе исследуется задача навигации пешехода на основе инерциальных блоков на базе МЭМС, закрепленных на стопах, информации о нулевой скорости, установленной по измерениям блоков, априорных данных об ограниченности расстояния между стопами. Описывается ОФК для идеальной и вычисленной траекторий, вводится понятие структурной несостоятельности ОФК, допускающее конструктивную проверку путем сопоставления грамианов наблюдаемости, анализа равномерной управляемости и наблюдаемости. Сформулирован и доказан ряд утверждений и теорем, связывающих данные понятия.

Установлена связь между наличием группы симметрий системы и измерений, ненаблюдаемого подпространства и несостоятельностью ОФК по части переменных. Описаны системы координат, фазовые переменные задачи навигации. Приведены навигационные уравнения и их упрощения для задачи навигации пешехода. Записываются соответствующие модельные уравнения, учитывающие наличие погрешностей ориентации и датчиков. Приводятся

уравнения ошибок в трех эквивалентных формах, включающих динамические и кинематические ошибки в разных сочетаниях.

Описывается алгоритм детектора нулевой скорости, выражения для измерений нулевой скорости и расстояния между стопами для всех типов уравнений ошибок в приборной и навигационной системах координат. Проведен анализ структурной состоятельности ОФК, результат которого – выявление несостоятельности ОФК при измерениях в навигационной системе координат для любой формы уравнений ошибок. При измерениях в приборной системе координат состоятельны фильтры на основе полного набора динамических ошибок или полных ошибок положения и динамических ошибок скорости. Для расстояния между стопами состоятелен фильтр, построенный только на динамических уравнениях.

В заключительной части главы описываются проблемы калибровки и выставки инерциального блока. Исследуется оцениваемость дрейфов, актуальная в связи с нестабильностью датчиков МЭМС от запуска к запуску, исследование проведено для модельных и экспериментальных траекторий. На модельных траекториях показана плохая оцениваемость вертикального гироскопа, влияющего на погрешность курса, по измерениям нулевой скорости, а на реальных данных – плохая оцениваемость всех дрейфов даже при условии их формальной наблюдаемости.

В третьей главе рассматривается коррекция путевого угла в навигации пешехода. Для этого применяются различные алгоритмы, основанные на выявлении прямолинейных участков траекторий, направленных по известным выделенным направлениям, и комбинации этих алгоритмов с коррекцией по расстоянию между стопами. Предложен адаптивный алгоритм коррекции, учитывающий фактические погрешности инерциальных блоков, оцениваемые по отклонениям от выделенных направлений. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающие эффективность нового алгоритма в сравнении с известными аналогами на траекториях с петлями и криволинейными участками, наиболее сложными для автономной пешеходной навигации.

В заключении подводятся итоги выполненной работы.

#### Замечания

Большая часть замечаний редакционные. Далее они перечисляются с выдержками из текста и указанием страниц.

С. 34, 126, 127 и т. д. Вызывает вопрос использование термина «эвристический». Методы уменьшения оценки курса названы эвристическими, но имеют ясную геометрическую основу – прямые участки траектории и ограниченное расстояние между стопами. Было бы хорошо пояснить какие именно соображения здесь эвристические.

С. 37, низ страницы «...в зависимости от степени достоверности информации о прямолинейном движении...» желательно раскрыть понятие «степень достоверности».

С. 47 Перед формулой (2.8). Ошибки ОФК и ИОФК обозначены одной буквой, а это разные параметры. Хорошо бы ошибки ИОФК отметить чертой, которая есть у всех других параметров ИОФК.

С. 50 Сказано, что идеальный ОФК строит оценки ковариаций, однако ОФК (по самой постановке задачи) оценивает и вектор состояния. Желательно пояснить, что с делается с этой оценкой и почему.

С. 55 Не сказано о том, почему условие  $\bar{l} - l = 1$  не существенно снижает общность, хотя это и видно из дальнейших рассуждений.

С. 56. Хорошо бы перенести выше фразу о том, как проводится сравнение матриц. Ковариационные матрицы в уравнениях фильтра выше имеют два индекса, в утверждении 2 – один. Не сказано с какого шага работы фильтра используется матрица – с коррекции или прогноза и важно ли это?

С. 57. Доказательство утверждения 3. «Случайность задается набором...» – не очень хорошая формулировка, лучше написать, что приведенные параметры являются случайными величинами.

С. 97 Фраза «Рассмотрим систему (2.65). В ней отсутствуют измерения, поэтому  $\beta_3$  представляет собой броуновское движение». Не ясно причем тут измерения.

С. 122. Не понятна фраза «ошибки оценки не порождены локальной системой координат на многообразии». Уравнения ошибок всегда порождаются некоторой системой координат, желательно фразу пояснить.

Отмеченные замечания не влияют на положительную оценку и значимость исследования. Работа отвечает требованиям, предъявляемым Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к кандидатским диссертациям. Содержание соответствует специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель Брагин Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7 – «Теоретическая механика, динамика машин».

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук, доцент,  
главный специалист Публичного акционерного общества «Московский институт электромеханики и автоматики»

Фомичев Александр Владимирович

Контактные данные:

тел.: \_\_\_\_\_, e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом

защищена диссертация:  
01.02.01 Теоретическая механика

Адрес места работы:

125167, Москва, Авиационный пер., 5  
ПАО "МИЭА",  
Тел.: 8 (499) 152-48-74; e-mail: a.fomichev@aomiea.ru