

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию 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

В настоящее время во всем мире активно развиваются разнообразные мобильные роботы, использующие для навигации различную информацию – от глобальных спутниковых навигационных систем, систем инерциальной навигации и систем технического зрения. На современном этапе широкодоступны микромеханические инерциальные датчики. Они имеют невысокую точность, но при этом весьма компактны, имеют низкое энергопотребление и стоимость.

Актуальность темы диссертации А.В. Брагина связан с тем, что системы автономной навигации пешехода весьма востребованы в разного рода экстремальных ситуациях. Кроме того, представляется, что результаты диссертации могут быть использованы при разработке систем навигации шагающих роботов.

В диссертации А.В. Брагина рассматривается задача навигации пешехода с использованием микромеханических инерциальных датчиков. Предполагается, что инерциальные датчики крепятся на стопах пешехода. Эта схема хорошо известна и используется в ряде существующих систем навигации пешехода. Преимущество такой системы состоит в том, что в момент опоры появляется дополнительная информация о нулевой скорости стопы, которая может быть использована для коррекции навигационного решения.

В первой главе диссертации дан обзор современной литературы по тематике. Обсуждаются как технические решения, так и алгоритмы навигации

пешехода, в разных вариантах. Обзор весьма подробный и представляет несомненный интерес для специалистов в этой области.

Во второй главе исследуются свойства обобщенного фильтра Калмана применительно к задаче навигации пешехода. Выбор именно этого алгоритма оценивания не случаен — он является стандартом в большинстве систем навигации. Первая часть главы посвящена теории обобщенного фильтра Калмана без привязки к рассматриваемой задаче. Вводится новая конструкция уравнений ошибок фильтра, обобщающая их традиционную форму, не привязанная к выбору локальной системы координат в пространстве состояний фильтра. Вводится новое понятие структурной состоятельности фильтра — геометрическое условие на ненаблюдаемые подпространства уравнений ошибок фильтра и так называемых идеальных уравнений ошибок, основанных на линеаризации уравнений состояния на истинной, а не расчетной траектории. Показано, что условие структурной состоятельности — необходимое условие состоятельности фильтра в статистическом смысле. Далее теоретические результаты применяются к исследованию задачи навигации пешехода в двух вариантах — с коррекцией по нулевой скорости и по расстоянию между стопами. Продемонстрировано, что, когда обобщенный фильтр Калмана удовлетворяет условию структурной состоятельности, то он удовлетворяет и условию состоятельности. Часть результатов обоснована аналитически, часть — имитационным моделированием и обработкой данных экспериментов. В конце главы рассмотрены некоторые особенности реализации алгоритмов. Исследована, в частности, возможность оценивания дрейфов гироскопов при ходьбе с целью уменьшения ошибок определения курса.

В третьей главе делается попытка решить одну из основных проблем инерциальной навигации — накопление ошибок курса — применительно к задаче навигации пешехода. Проведен анализ известных полу-эвристических методов

решения проблемы – использование информации о прямолинейности движения. В рамках этих методов сначала проводится определение участков прямолинейного движения, а затем на этих участках проводится коррекция курса. В диссертации отмечено, что при ложном определении прямолинейных участков подобные алгоритмы теряют работоспособность, и предложена их модификация для системы навигации с двумя инерциальными блоками, основанная на комбинации данного метода с использованием информации об ограниченности расстояния между стопами. В экспериментальных исследованиях показано, что предложенная модификация обладает большей надежностью, чем известные методы.

Теоретические результаты диссертации строго обоснованы с использованием методов теоретической механики и теории оценивания. Практические результаты обоснованы обширным имитационным моделированием, а также проведением и обработкой данных многочисленных экспериментов с разными испытуемыми.

Достоверность результатов обусловлена как строгим доказательством теоретических результатов, так и обширным имитационным моделированием и обработкой данных экспериментов.

Новыми результатами, полученными в диссертации являются, во-первых, новая конструкция уравнений ошибок обобщенного фильтра Калмана, не привязанная к выбору системы координат в пространстве состояний, во-вторых, введенное условие структурной состоятельности и строгое доказательство необходимости этого условия для состоятельности обобщенного фильтра Калмана, в третьих, применение этих теоретических результатов к проверке корректности фильтра в задаче навигации пешехода, в четвертых, новая модификация алгоритма коррекции ошибки курса по информации о

прямолинейности движения, которая в экспериментах показала большую надежность, чем известные алгоритмы.

По рассматриваемой работе есть ряд замечаний.

1. Не приведен алгоритм начальной выставки навигационной системы. Описанный в главе 2 алгоритм, скорее всего, годится для теоретического исследования в целях сравнения траектории с эталоном, но вряд ли может быть реализован на практике, где, скорее всего, для привязки к местности пешеходу понадобится какой-то фрагмент карты местности.
2. Выводы о работоспособности исследуемой программно-аппаратной компоновки для практического применения требуют пояснения - для какого круга задач, с учётом полученной в экспериментах точности.
3. Не все графические материалы хорошо оформлены. На большинстве рисунков используются англоязычные надписи, на части – русскоязычные. В разделе 2.2 неудачные обозначения: расчетная траектория обобщенного фильтра Калмана отличается от истинной штрихом, а расчетная матрица, наоборот, лишена штриха, зато истинная матрица снабжена чертой. В подписи к рис. 2.5 сказано, что показаны ковариации курса, хотя из графиков видно, что речь идет о среднеквадратическом отклонении.
4. Автор не всегда использует четкую терминологию, так, в ряде случаев (стр. 92, 93, 103, 105, 110, 111) набор базисных векторов называется пространством.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования и хорошего впечатления о работе. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации 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.

Таким образом, соискатель Брагин Александр Викторович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, проф.

главный научный сотрудник, заведующий сектором «Механика и управление движением робототехнических систем» Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук"

Соколов С. М.

10.04.2026

Подпись г.н.с., д.ф.-м.н., проф. Соколова С.М. заверяю,
учёный секретарь ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, к.ф.-м.н.

(А.А. Давыдов)

М.П.

Контактные данные:

тел.: + , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин,
комплексов и компьютерных сетей

Адрес места работы:

125047, Москва, Миусская пл., д.4

ИПМ им. М.В. Келдыша, сектор «Механика и управление движением
робототехнических систем»

Тел.: +7 (499) 978-13-14; e-mail: office@keldysh.ru