

УДК 531.01

ИНЕРЦИАЛЬНАЯ НАВИГАЦИЯ ПЕШЕХОДА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.

А.В. Брагин*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: avb9676@yandex.ru

Ю.В. Болотин*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1

E-mail: ybolotin@yandex.ru

Ключевые слова: инерциальная навигация, навигация пешехода, автономная навигация, МЭМС датчики, состоятельность.

Аннотация: Навигация пешехода – востребованная в различных областях человеческой деятельности задача. В местах, где доступны сигналы спутниковых навигационных систем, эта задача давно решена. Однако там, где спутниковых сигналов и других источников навигационной информации нет, надежное позиционирование человека по-прежнему остается сложной технической задачей. С 90-х годов XX века в разных странах идет разработка систем автономной навигации пешехода, основанной на инерциальных датчиках. Долгое время эта задача оставалась объектом исследовательских работ, однако недавно были представлены коммерческие системы автономной навигации пешехода. Одна из них была разработана для армии США, другая предлагается немецкой фирмой iMAR. В настоящем докладе рассказывается о некоторых современных тенденциях в построении алгоритмов навигации пешехода.

1. Введение

Использование инерциальных датчиков для автономной навигации объекта – стандартный подход в технике с 50-х годов прошлого века. Однако до недавнего времени размеры и дороговизна инерциальных датчиков ограничивали их использование в экипировке человека. С появлением компактных микроэлектромеханических (МЭМС) инерциальных датчиков появилась возможность разместить инерциальные измерительные блоки (ИИБ) на теле человека. Однако чтобы использовать МЭМС датчики для решения задачи инерциальной навигации необходимо было решить проблему низкой точности инерциальных блоков. Первой опубликованной работой, где предлагалось крепить ИИБ к стопам, стала [1]. Крепление инерциального блока к стопе позволяет использовать для коррекции навигационного решения информацию о нулевой

скорости стопы в моменты, когда нога человека неподвижна относительно Земли. Такие моменты при обыкновенной ходьбе наступают каждый шаг, поэтому ошибки навигации удастся значительно снизить до значений порядка нескольких метров за 10-20 минут.

2. Существующие системы

Чисто автономная постановка задачи навигации пешехода имеет смысл для военного применения, а также для экстренных служб. В мире за последние 20 лет было предложено множество подходов к построению систем автономной навигации пешехода, однако лишь недавно стали появляться сведения о проникновении таких решений дальше исследовательских лабораторий. Первый пример – система WarLoc американской компании Robotic Research (рис.1) о которой стало известно в 2019. Характеристики системы не раскрываются, однако подчеркивается возможность автономной навигации и высокая точность позиционирования [2].

Другой пример системы, которая позиционируется как часть экипировки пожарного – iTHESEUS, представленная компанией iMAR (рис. 1) в 2022 году. В рекламном буклете приводится точность в типовом эксперименте (хождение по лестницам, движение ползком). За 20 минут на 270 метрах ошибка составила 1.1 метра (0.4% от пройденного расстояния), а также заявляется точность автономного решения не более 1% от пройденного расстояния [3].



Рис. 1. Система iTHESEUS (слева), и система WarLoc (справа)

Приведенные примеры демонстрируют реальность создания подобных систем, однако лишь время покажет их применимость в реальных условиях.

Существует множество систем пешеходной навигации, не позиционирующихся как коммерческие решения, но представляющих большой интерес как демонстраторы технологий. Например, в коллективе Калифорнийского университета разработана система, в которой показания инерциальных датчиков комплексированы с информацией об относительном положении стоп. Относительное положение стоп определяется по видеоизображению с камер, закрепленных на ботинках. Очевидна невысокая надежность такого решения, но в автономной постановке задачи такая комбинация дает наилучшие результаты по сравнению с другими методами коррекции навигационного решения. Другой интересный способ улучшения точности в навигации пешехода – повышение надежности детектора движения, который определяет, когда стопа находится в фазе опоры. Для этого применяются

датчики давления, встроенные в стельки, ультразвуковые измерители дальности (до пола).

Авторы развивают подход к коррекции навигационного решения, который не требует никаких дополнительных устройств [4]. Идея заключается в адаптивной коррекции по расстоянию между стопами. При этом считается, что расстояние между стопами ограничено сверху, то есть дополнительное устройство для его измерения не нужно. Адаптивность заключается в анализе траектории движения, на основании которого решается какой ИИБ точнее. В результате в большей степени корректируется менее точный блок. Повышение точности по сравнению с неадаптивным вариантом составляет до 10%.

3. Алгоритмы инерциальной навигации пешехода.

В основе большинства алгоритмов навигации пешехода лежит фильтр Калмана (ФК), который позволяет комплексировать показания инерциальных датчиков и дополнительную информацию, в первую очередь информацию о нулевой скорости стопы в фазе опоры. Наряду с ФК используется сигма-точечный фильтр, фильтр частиц, а в последнее время и нейросетевые алгоритмы. В данной работе ограничимся подходами на основе ФК, точнее обобщенного ФК (ОФК).

3.1. Алгоритм ФК с коррекцией по нулевой скорости

Приведем здесь основные соотношения инерциальной навигации пешехода вместе с определениями. Навигация происходит в т.н. навигационной системе координат (с.к.) $On_1n_2n_3$. Чаще всего это локальная прямоугольная система координат с началом в стартовой точке пешехода. Состояние системы описывается вектором состояния $X = (p_n, v_n, C_{ns})$, где p_n, v_n – координаты и скорости в с.к. On , а C_{ns} – матрица перехода от приборной системы координат $Os_1s_2s_3$ к навигационной. В осях приборной с.к. известны показания инерциальных датчиков: акселерометров $f'_s = f_s + \Delta f_s$ и гироскопов $\omega'_s = \omega_s - \nu_s$. Величины без штрихов – истинные значения величин, со штрихами – измеренные (вычисленные). $\Delta f_s, \nu_s$ – ошибки измерений.

Изменение вектора состояния описывается так называемыми уравнениями идеальной работы [5], или опорными уравнениями (1), в вычислителе же интегрируются т.н. модельные уравнения, обозначаемые штрихом

$$\begin{aligned} (1) \quad \dot{p}_n &= v_n & \dot{v}_n &= C_{ns}f_s + g_n & \dot{C}_{sn} &= \hat{\omega}_s C_{sn} \\ (2) \quad \dot{p}'_n &= v'_n & \dot{v}'_n &= C'_{ns}f'_s + g_n & \dot{C}'_{sn} &= \hat{\omega}'_s C'_{sn} \end{aligned}$$

Отличия модельных переменных от истинных описывается вектором ошибок x , в который входят ошибки координат $\Delta p_n = p'_n - p_n$, ошибки скоростей $\Delta v_n = v'_n - v_n$, ошибки ориентации $\beta_n = C_{ns}C'_{sn} - I_3$, где I_3 единичная матрица размера 3×3 . Также в вектор ошибок могут быть включены ошибки инерциальных датчиков. Изменение вектора x описывается уравнением ошибок, полученных в результате линеаризации опорных уравнений (1), причем уравнения можно линеаризовать как в окрестности модельной траектории, так и в окрестности истинной траектории:

$$\begin{aligned} (3) \quad \dot{\Delta p}_n &= \Delta v_n & \dot{\Delta v}_n &= -\hat{f}_n \beta_n + \Delta f_n & \dot{\beta}_n &= \nu_n \\ (4) \quad \dot{\Delta p}_n &= \Delta v_n & \dot{\Delta v}_n &= -\hat{f}'_n \beta_n + \Delta f_n & \dot{\beta}_n &= \nu_n \end{aligned}$$

При расчетах, естественно, используется форма (3).

Измерение нулевой скорости стопы в фазе опоры записывается в виде $v_n + r = 0$, где r – погрешность, вызванная деформацией обуви в опоре. Переходя к ошибкам, получим уравнения измерений. В качестве примера рассмотрим коррекцию по нулевой скорости стопы.

$$(5) \quad z = v'_n - v_n = \Delta v_n + r$$

3.2. Несостоятельность ОФК в навигации пешехода

ОФК основан на линеаризации уравнений в окрестности расчетного состояния.

Определение 1. Алгоритм ОФК структурно состоятелен, если в нем ненаблюдаемые переменные уравнений (3), (5) имеют бесконечную (или растущую с ростом времени) дисперсию.

Теорема 1. Алгоритм ОФК, построенный на основе (4), (5), структурно несостоятелен.

Следствие 1. Алгоритм ОФК, построенный на основе (4), (5) несостоятелен в смысле Бар-Шаломы [6].

Известным следствием несостоятельности ОФК [6] является то, что вычисленные ковариации не соответствуют истинным. В навигации пешехода эта проблема проявляется в ложной наблюдаемости ошибки угла курса [7]. Из-за несостоятельности алгоритм ОФК рано или поздно теряет работоспособность.

3.3. Структурно состоятельная форма ОФК

Более полувека назад в работах В.А.Андреева и Н.А.Парусникова по высокоточной инерциальной навигации [5] были введены т.н. динамические ошибки: $\delta p_n = \Delta p_n + \hat{p}_n \beta_n$, $\delta v_n = \Delta v_n + \hat{v}_n \beta_n$. В динамических ошибках уравнения (3) принимают следующий вид:

$$(6) \quad \dot{\delta p}_n = \delta v_n + \hat{p}'_n \nu_n \quad \dot{\delta v}_n = \hat{g} \beta_n + \Delta f_n + \hat{v}'_n \nu_n \quad \dot{\beta}_n = \nu_n$$

Далее, перепишем условие нулевой скорости в приборной с.к.

$$(7) \quad z = v'_s - v_s = \Delta v_s + r$$

Теорема 2. Алгоритм ОФК, построенный на основе (6), (7), структурно состоятелен.

Методом Монте-Карло установлено следующее утверждение.

Следствие 2. Алгоритм ОФК, построенный на основе (6), (7), состоятелен по Бар-Шалому.

Замечание 1. Динамические ошибки были неизвестны на Западе несколько десятилетий, хотя книга В.А.Андреева переводилась на английский. Они были переоткрыты в 1990-х годах [10]. Отметим также, что цель введения динамических ошибок Андреевым и Парусниковым отличалась от нашей – им было важно отделить ошибки навигации, вызванные погрешностями акселерометров, от ошибок, вызванных погрешностями ДУС. Проблема состоятельности ФК в те времена была не актуальна.

3.4. Подход к состоятельности на основе теории групп Ли

В последние десять лет в многочисленных работах авторов французской школы навигации [9] предложен теоретико-групповой подход к задаче ОФК. Ими замечено (возможно, это было известно сильно раньше) что уравнения (2) можно рассматривать как уравнения на группе Ли $SU(3)$. При этом уравнения ошибок естественно записываются как уравнения на соответствующей алгебре Ли. Показано, что некоторые типы измерений также вкладываются в теоретико-групповую структуру – либо как лево-инвариантные, либо как право-инвариантные. Построенный на основе этого формализма ОФК получил название инвариантный обобщенный фильтр Калмана – лево-инвариантный (ЛИОФК) или право-инвариантный (ПИОФК).

Интересно, что уравнения правоинвариантного ИОФК [9] применительно к задаче навигации пешехода фактически повторяют уравнения в динамических ошибках (6). Это означает, что во многом интуитивный подход динамических ошибок, введшихся из далеких от состоятельности соображений, оказался неожиданно плодотворен для специфической постановки задачи навигации пешехода.

4. Заключение

Сделан краткий обзор проблемы состоятельности обобщенного фильтра Калмана в задаче навигации пешехода, а также рассказано о существующих системах персональной навигации на основе инерциальных датчиков, что подчеркивает актуальность исследований по данной тематике.

Список литературы

1. Elwell J. Inertial navigation for the urban warrior // Proceedings of the Digitalization of the Battlespace IV conference. Orlando, 1999. P. 196–204
2. <https://rr.ai/news/robotic-research-receives-16-5m-order-for-production-and-delivery-of-warloc-gps-denied-localization-units> (дата обращения 15.01.2024).
3. <https://www.imar-navigation.de/en/products/by-product-names/item/itheseus-system-for-fully-autonomous-indoor-navigation> (дата обращения 15.01.2024).
4. Брагин А.В., Болотин Ю.В. Новый алгоритм коррекции в автономной навигации пешехода // XXX Юбилейная Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2023. С. 69–77.
5. Андреев В.Д. Теория инерциальной навигации: Автономные системы. М.: Наука, 1966.
6. Bar-Shalom Y., Li X.R., Kirubarajan T. Estimation with applications to tracking and navigation: theory algorithms and software. John Wiley & Sons, 2004.
7. Bolotin Y., Bragin A., Gartsev I. Covariance error analysis for pedestrian dead reckoning with foot mounted imu // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol. 2498. P. 243–250.
8. Болотин Ю.В., Брагин А.В. О некоторых свойствах фильтра Калмана в задаче навигации пешехода // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2023. № 3. С. 56–61.
9. Barrau A., Bonnabel S. The invariant extended Kalman filter as a stable observer // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. Vol. AC-62, No. 4. P. 1797–1812.
10. Scherzinger B.M., Reid D.B. Modified strapdown inertial navigator error models // Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium. P. 426–430.