

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ПО РАССТОЯНИЮ МЕЖДУ СТОПАМИ В НАВИГАЦИИ ПЕШЕХОДА

А.В. Брагин

Аннотация. Предложен новый алгоритм коррекции в задаче автономной навигации пешехода при помощи инерциальных измерительных блоков, закрепленных на стопах. Основой автономной пешеходной навигации является интегрирование упрощенных уравнений инерциальной навигации и коррекция навигационного решения по нулевой скорости. В отсутствие внешней информации, такой как сигналы спутниковых навигационных систем или сигналы локальных сетей Wi-Fi, Bluetooth, необходимо применять дополнительные методы коррекции. Два основных класса таких методов – коррекция по информации об ограниченности расстояния между стопами (требует установки блоков на каждую стопу) и информация о прямолинейности движения. Первый метод не учитывает неравноточность инерциальных блоков, а второй существенно зависит от типа траектории. В работе предпринята попытка избавиться от недостатков обоих методов. Новый алгоритм представляет из себя адаптивный вариант коррекции по расстоянию между стопами. Адаптивность обеспечивается изменением матрицы измерений для блока, который считается менее точным. Вывод о точности делается на основе анализа траектории, при котором используется информация о прямолинейности движения. Приведены результаты проверки алгоритма на экспериментальных данных. Применение нового алгоритма позволило увеличить точность навигации. Разработанный метод целесообразно применять в составе комплексной системы пешеходной навигации при отсутствии внешней информации.

Ключевые слова: инерциальный измерительный блок, навигация пешехода, навигация внутри помещений, инерциальная навигация, алгоритмы коррекции.

ВВЕДЕНИЕ

Задача навигации пешехода – относительно новая область науки и техники, в которой разрабатываются методы и устройства для определения местоположения, специфичные именно для навигации людей [1, 2]. Эти методы в основном ориентированы на позиционирование человека в помещении, поскольку на открытой местности, как правило, доступны сигналы спутниковых навигационных систем, которые можно использовать для позиционирования человека. В помещениях есть два варианта навигации – автономный и опирающийся на предустановленную инфраструктуру.

Первый может быть полезен военным, пожарным, геологам при исследовании пещер, а также всем тем, кто не может обеспечить развертывание инфраструктуры в нужном месте заранее. Основным инструментом в таком сценарии – инерциальные датчики (акселерометры и гироскопы), а также другие устройства, помогающие корректировать

навигационное решение, полученное по инерциальным датчикам, но не требующие инфраструктуры. Среди наиболее часто используемых устройств можно выделить магнитометры и видеокамеры. Комплексирование инерциальных датчиков с ними дает хорошие результаты, однако всегда возможны ситуации, когда любая информация, кроме инерциальной, может оказаться мало достоверной. Для камеры такой ситуацией является слабая освещенность или высокоинтенсивное движение носителя, для магнитометров – нахождение в среде с большим количеством магнитных аномалий (типичная проблема в зданиях с большим количеством металлоконструкций) и т. д. Поэтому повышение точности автономного решения навигационной задачи остается актуальным.

Второй вариант (использование предустановленной инфраструктуры) подходит для навигации в помещениях (торговых центрах, медицинских учреждениях, на производстве). В помещении, как правило, можно развернуть на всей площади объ-

екта сеть устройств, излучающих какие-либо сигналы (обычно это Wi-Fi, Bluetooth или Ultra-Wide Band (UWB)). Пользователь снабжается устройством, принимающим эти сигналы. Местоположение его можно определить с помощью различных методов, основанных, например, на работе со временем от излучения до получения сигнала (*Time of Arrival – ToA*), или уровня принимаемого сигнала (*Received Signal Strength Indicator – RSSI*) [3, 4].

В настоящей работе рассматривается первый вариант – автономная навигация пешехода, когда единственным источником информации служат инерциальные измерительные блоки (ИИБ), прикрепленные к стопам. Первые работы по данной тематике появились в 1990-х гг. [5]. Применение автономной навигации пешехода виделось автору работы [5] в первую очередь военным. Уже тогда были предложены основные идеи, позволяющие решать задачу инерциальной навигации путем применения дешевых и низкоточных микромеханических (МЭМС) инерциальных датчиков. Главная идея – крепление к стопе, чтобы в фазах опоры (когда стопа человека стоит на земле) корректировать навигационное решение по нулевой скорости (в англоязычной литературе *Zero velocity UpdaTe – ZUPT*). Тогда же возникла и идея использования расстояния между стопами [6] (для краткости будем называть такой способ коррекции *Distance UPdaTe – DUPT*) как дополнительного измерения, призванного уменьшить ошибку курса, которая не устраняется коррекцией по нулевой скорости и потому растет неограниченно. Этот способ дает информацию только о разности курсов двух ИИБ [7], но в случае симметричности ошибок курса (т. е. когда ошибки противоположны по знаку и одинаковы по модулю) позволяет уменьшить абсолютную ошибку координат [8]. Эта идея получила развитие в более поздних работах, в которых было показано, что такой способ коррекции позволяет уменьшить ошибку позиционирования [9, 10]. Другой способ уменьшения ошибки курса был предложен еще несколько позднее. Главная идея этого способа – коррекция угла курса на основе информации о том, что в здании человек в основном движется вдоль стен. При этом направления стен используются как измерения курса для коррекции навигационного решения [11, 12]. Общее название таких методов – *heuristic drift elimination (HDE)*. Эти методы также получили развитие в работах [13, 14]: авторы пытались увеличить надежность алгоритма, обнаруживающего прямолинейное движение пешехода, который играет ключевую роль в HDE.

Описанные выше методы коррекции на основе DUPT и HDE имеют свои сильные и слабые стороны. Первый универсален, поскольку использует информацию о том, что расстояние между стопами человека ограничено сверху, однако он не учитывает, что ошибки курса двух ИИБ могут отличаться по величине и необязательно являются симметричными. Другими словами, DUPT просто притягивает координаты левой и правой ног к средней точке. Метод HDE имеет значительное преимущество перед DUPT в случае, если человек движется в здании по прямым вдоль стен, поскольку в этом случае корректируется абсолютный (а не относительный, как в случае DUPT) курс ИИБ. Однако качество работы HDE ухудшается при усложнении траектории, когда прямолинейных участков становится мало. Именно поэтому основное направление улучшения HDE – ужесточение критериев прямолинейности движения. Но при таком подходе в случае сложной траектории коррекция будет практически все время отключена.

В данной работе предлагается алгоритм, в котором одновременно используется информация о расстоянии между стопами и о прямолинейности движения. При этом последняя используется лишь для настройки DUPT, а не для коррекции навигационного решения. Тем самым делается попытка исправить симметричный характер DUPT-коррекции и заодно избавиться от главной проблемы HDE – низкой надежности в случае сложных траекторий.

Статья организована следующим образом. В § 1 кратко описан базовый алгоритм пешеходной навигации, в § 2 и 3 – HDE и DUPT соответственно. В § 4 описан новый алгоритм, а в § 5 приведены результаты работы всех алгоритмов на экспериментальных данных.

1. БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ

В пешеходной навигации обычно применяются МЭМС-датчики, имеющие низкую точность. В большинстве работ по пешеходной навигации (см. например, публикации [15, 16]) используются упрощенные уравнения инерциальной навигации в прямоугольной системе координат, связанной с Землей. При этом скорость вращения Земли и ее сферичность не учитываются.

Положение пешехода отождествляется с положением ИИБ, который состоит из блока акселерометров и блока гироскопов. Блок акселерометров обычно состоит из трех одноосных датчиков со своими чувствительными массами, однако рассто-



яние между ними мало и в случае низкоточных систем им обычно пренебрегают, говоря об обобщенной чувствительной массе (обозначим ее точкой M). Положение ИИБ задается положением точки M . Если блок закреплен на стопе, определяется положение стопы. Начало траектории обозначается точкой O .

Введем системы координат (с. к.), необходимые для дальнейшего изложения:

- $Ms = Ms_1s_2s_3$ – приборная с. к., в ней известны показания инерциальных датчиков.

- $M's' = M's'_1s'_2s'_3$ – модель приборной с. к., реализованная в вычислителе, будем называть ее модельной с. к.

- $On = On_1n_2n_3$ – опорная с. к., в ней решаются уравнения движения. Ось On_3 направлена вверх. Оси On_1, On_2 лежат в плоскости горизонта. Их направление произвольно, поскольку низкоточные датчики угловой скорости (ДУС) не позволяют определить начальный угол курса. Обычно он полагается равным нулю. В таком случае одна из горизонтальных осей опорной с. к. совпадает с проекцией продольной оси приборной с. к. в плоскость горизонта в начальный момент времени.

- $Oz = Oz_1z_2z_3$ – квазиинструментальная с. к. [17]. Эта система координат понадобится для преобразования уравнений ошибок. Она получается в результате перехода от приборной системы координат с помощью модельных (полученных вычислителем) параметров ориентации.

Связь систем координат можно видеть на диаграмме (рис. 1), для удобства начала всех с. к. помещены в точку O , т. е. с. к. Os', Os – результат параллельного переноса $M's', Ms$ в точку O :

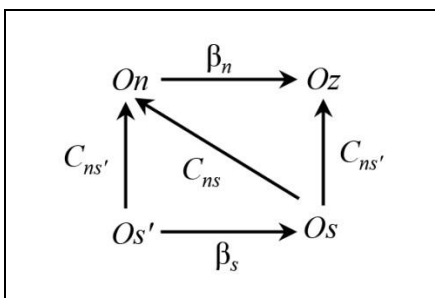


Рис. 1. Связь систем координат

Здесь β_s, β_n – векторы малого поворота; $C_{ns'}$ – матрица ориентации, связывающая модельную и опорную с. к.; C_{ns} – матрица ориентации, связывающая приборную и опорную с. к.

Уравнения движения ИИБ (будем называть их опорными уравнениями) состоят из двух групп:

- Второго закона Ньютона, описывающего движение точки M :

$$\begin{aligned} \dot{p}_n &= v_n, \\ \dot{v}_n &= C_{ns}f_s + g_n. \end{aligned}$$

- Уравнения Пуассона, описывающего изменение ориентации приборной с. к. относительно опорной:

$$\dot{C}_{ns} = -C_{ns}\hat{\omega}_s, \hat{\omega}_s = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{s3} & -\omega_{s2} \\ -\omega_{s3} & 0 & \omega_{s1} \\ \omega_{s2} & -\omega_{s1} & 0 \end{bmatrix}.$$

Здесь p_n – вектор координат в навигационной с. к.; v_n – вектор скорости в навигационной с. к.; C_{ns} – матрица ориентации, описывающая переход от приборной к навигационной с. к. (например, $p_n = C_{ns}p_s$); f_s – удельная сила, действующая на чувствительную массу акселерометра; ω_s – угловая скорость приборной с. к. относительно инерциальной; $g_n = (0, 0, -g)^T$, g – ускорение силы тяжести.

В вычислителе интегрируются уравнения, структурно повторяющие опорные. Будем называть их модельными. Обозначения модельных переменных, в отличие от идеальных, сопровождаются штрихом:

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

Здесь $f'_s = f_s + r_s$, $\omega'_s = \omega_s - v_s$ – модели измерений датчиков; r_s, v_s – погрешности акселерометров и ДУС соответственно. Они считаются белыми шумами. Поскольку дрейфы МЭМС ДУС от запуска к запуску могут достигать сотен градусов в час, показания ДУС осредняются на этапе начальной выставки (определения начальных параметров ориентации), когда пешеход неподвижен, а затем полученные средние значения вычитаются из показаний ДУС при обработке. Это позволяет не включать смещения ДУС в вектор ошибок. Смещения акселерометров достаточно стабильны от запуска к запуску, поэтому их можно оценить заблаговременно и вычесть из показаний при обработке.

Интегрирование модельных уравнений (1) дает оценки координат, скоростей и ориентации ИИБ.

Коррекция навигационного решения по нулевой скорости (ZUPT–коррекция) происходит в фазе опоры, которая обнаруживается детектором движения, использующим измерения инерциальных датчиков. В литературе предложено множество детекторов движения – от простых детерминированных алгоритмов [18] до адаптивных [19] и нейросетевых [20, 21]. В данной работе использовался детектор движения, предложенный в статье [18].

Для коррекции применяется так называемый расширенный фильтр Калмана (РФК) [7]. Динамическая система – это уравнения ошибок, описывающие отличие значений модельных переменных от истинных. Уравнения ошибок получаются путем линеаризации уравнений движения в окрестности модельной траектории и могут быть записаны в разных переменных [17]. Было показано [7], что в задаче навигации пешехода целесообразно записывать уравнения ошибок в так называемых «динамических ошибках» [17]. Поэтому сразу приведем соответствующую форму:

$$\begin{aligned} \delta \dot{p}_n &= \delta v_n - p'_n \times v_n, \\ \delta \dot{v}_n &= -g_n \times \beta_n - v'_n \times v_n + r_n, \\ \dot{\beta}_n &= v_n. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \delta p_n &= \Delta p_n - p'_n \times \beta_n, \quad \Delta p_n = p'_n - p_n, \\ \delta v_n &= \Delta v_n - v'_n \times \beta_n, \quad \Delta v_n = v'_n - v_n, \end{aligned}$$

v_n, r_n – белые шумы, полученные из погрешностей v_s, r_s .

При обнаружении фазы опоры формируется измерение нулевой скорости в следующей форме [22]:

$$\left. \begin{aligned} Z &= v_n = 0 \\ Z' &= v'_n + r^{\text{ZUPT}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow z = Z' - Z = v'_n + r^{\text{ZUPT}} = H^{\text{ZUPT}} x + r^{\text{ZUPT}},$$

$$H^{\text{ZUPT}} = [0 \quad I \quad 0], \quad x = \begin{pmatrix} \delta p_n \\ \delta v_n \\ \beta_n \end{pmatrix},$$

где r^{ZUPT} – шум измерения нулевой скорости, I – единичная матрица размера 3×3 . Это измерение обрабатывается РФК.

После получения оценки вектора состояния x^+ координаты, скорости и матрица ориентации, полученные в результате решения модельных уравнений, корректируются следующим образом (здесь верхний индекс «+» обозначает апостериорную оценку):

$$\begin{pmatrix} p_n^{'+} \\ v_n^{'+} \\ C_{ns'}^{'+} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p'_n - (\delta p_n^+ - \hat{\beta}_n^+ p'_n) \\ v'_n - (\delta v_n^+ - \hat{\beta}_n^+ v'_n) \\ (I + \hat{\beta}_n^+) C_{ns'} \end{pmatrix}.$$

Здесь $\hat{\beta}_n^+$ – это кососимметрическая матрица, составленная из компонент β_n^+ . После коррекции вектор состояния обнуляется: $x^+ = 0$.

При описании алгоритмов коррекции далее будет приводиться только вид измерений и соответствующие матрицы, поскольку динамическая система (2) не претерпевает изменений.

2. DUPT-КОРРЕКЦИЯ

Предполагается [8–10], что во время движения пешехода выполнено неравенство

$$\|p_n^l - p_n^r\| < d.$$

Здесь $\|\cdot\|$ – норма вектора; d – константа, обозначающая максимальную длину шага; верхние индексы l и r здесь и далее обозначают принадлежность параметров левой или правой ноге. Рассмотрим измерения

$$\begin{aligned} Z^{\text{DUPT}} &= \|p_n^l - p_n^r\| = d, \\ Z'^{\text{DUPT}} &= \|p_n^{l'} - p_n^{r'}\| + r^{\text{DUPT}} = d' + r^{\text{DUPT}}. \end{aligned}$$

Здесь r^{DUPT} – шум измерения расстояния между стопами с интенсивностью R^{DUPT} .

Если фиксируется нарушение условия $\|p_n^{l'} - p_n^{r'}\| < d$, то формируется измерение для уравнений ошибок (2) следующего вида:

$$\begin{aligned} z^{\text{DUPT}} &= Z'^{\text{DUPT}} - Z^{\text{DUPT}} = \|p_n^{l'} - p_n^{r'}\| - d = \\ &= H^{\text{DUPT}} x^{lr} + r^{\text{DUPT}}, \quad x^{lr} = \begin{pmatrix} x^l \\ x^r \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

$$S^l = \frac{1}{d'} \left[(p_n^{l'} - p_n^{r'})^T \quad 0_{1 \times 3} \quad (p_n^{l'} - p_n^{r'})^T \hat{p}_n^{l'} \right],$$

$$S^r = \frac{1}{d'} \left[-(p_n^{l'} - p_n^{r'})^T \quad 0_{1 \times 3} \quad -(p_n^{l'} - p_n^{r'})^T \hat{p}_n^{r'} \right],$$

$$H^{\text{DUPT}} = \begin{bmatrix} S^l & S^r \end{bmatrix}.$$

Здесь x^{lr} – это объединенный вектор ошибок, соответствующий системе из двух ИИБ, левого и правого; $\hat{p}_n^{l'}, \hat{p}_n^{r'}$ – кососимметрические матрицы, соответствующие векторному произведению, т. е. $\hat{p}_n^{l'} p_n^{r'} = -p_n^{l'} \times p_n^{r'}$.



Видно, что матрица измерений обладает следующим свойством: $S^r = -S^l$. Следовательно, вектор ошибок, который вычисляется как $x^{lr+} = P\{H^{\text{DUPT}}\}^T (H^{\text{DUPT}} P\{H^{\text{DUPT}}\}^T + R^{\text{DUPT}})^{-1} z^{\text{DUPT}}$, также будет обладать свойством $x^{r+} = -x^{l+}$ при условии, что блоки матрицы ковариаций, соответствующие левой и правой БИНС, примерно равны (при одинаковых настройках РФК для обоих БИНС это условие выполнено). Здесь P обозначает матрицу ковариаций вектора x^{lr} . Из приведенного выше рассуждения следует, что траектории двух ног будут «притягиваться» к точке $\bar{p} = (p^l + p^r) / 2$.

Гипотеза, на которой базируется DUPT-коррекция – это симметричность ошибок курса двух ИИБ [8]. Фактически, считается, что наши ИИБ равнозначны и нет оснований корректировать ИИБ в разной степени (сильнее «притягивать» одну ногу к другой). В данной работе предпринимается попытка учесть асимметрию, поскольку ИИБ могут быть неравнозначны.

3. МЕТОД HDE

Описываемый ниже метод предназначен для одного ИИБ. В системе из двух ИИБ этот метод будет работать независимо для каждого блока.

Базовое предположение в алгоритмах типа HDE – пешеход движется в здании вдоль стен [11, 12]. При этом предположения относительно взаимного расположения стен могут быть различными. Обычно считается, что стены расположены под прямым углом. Выбираются направления стен. Например, если считается, что стены располагаются под прямым углом, то выбирается угол ψ_0^{wall} (обычно его полагают равным направлению первого прямолинейного участка), а три других угла получаются так: $\psi_i^{\text{wall}} = \psi_0^{\text{wall}} + \frac{\pi}{2}i, i = 1, 2, 3$.

Все время работает алгоритм, определяющий прямолинейность движения (будем называть его детектором прямолинейного движения и обозначать SLP – *Straight Line Path*), который анализирует несколько соседних следовых точек и выдает бинарный признак прямолинейного движения. Сначала для обнаружения прямолинейного движения проверяется, что длина шага больше некоторой заранее выбранной константы:

$$\|p_n'(t_{k+1}) - p_n'(t_k)\| > c.$$

Здесь $p'(t_i)$ – координаты следовой точки (момент времени t_i – конец фазы опоры); c – константа,

характеризующая минимально допустимую длину шага (при расчетах принято $c = 0,7$ м). Если указанное условие выполнено, формируется признак прямолинейного движения:

$$\text{SLP} = \text{SLP}(p_n(t_{k+1}), \dots, p_n(t_{k-N})).$$

В данной работе используется детектор прямолинейного движения, предложенный в публикации [13]. Для пяти соседних следовых точек вычисляется средний путевой угол «следовой дорожки»

$$\Psi_{k-3:k+1}^{\text{step}}:$$

$$\Psi_{k-3:k+1}^{\text{step}} = \frac{1}{5} \sum_{i=k-3}^{k+1} \Psi_i^{\text{step}},$$

$$\Psi_i^{\text{step}} = \arctg \left(\frac{p_{n1}'(t_i) - p_{n1}'(t_{i-1})}{p_{n2}'(t_i) - p_{n2}'(t_{i-1})} \right);$$

затем вычисляется максимальное отклонение от него. Полученное отклонение сравнивается с константой c_ψ , характеризующей максимально допустимое отклонение от прямолинейного движения (при расчетах $c_\psi = 3^\circ$). Бинарный признак SLP формируется следующим образом:

$$\text{SLP} = \begin{cases} 1, & \max(|\Psi_j^{\text{step}} - \Psi_{k-3:k+1}^{\text{step}}|) < c_\psi, \\ & j=k-3, \dots, k+1 \\ 0, & \max(|\Psi_j^{\text{step}} - \Psi_{k-3:k+1}^{\text{step}}|) > c_\psi. \\ & j=k-3, \dots, k+1 \end{cases}$$

При обнаружении прямолинейного движения пешехода необходимо определить, вдоль какой стены он идет. Направления стен фиксированы и нужно выбрать одно из них. Для этого ищется «курс стены» ψ_{k+1}^{wall} , ближайший к направлению движения пешехода, которое отождествляется с углом ψ_{k+1}^{step} . Это нужно, чтобы сформировать измерение ошибки курса. Определяется ψ_{k+1}^{wall} следующим образом:

$$\psi_{k+1}^{\text{wall}} = \min_{i=1, \dots, N_w} (|\psi_{k+1}^{\text{step}} - \psi_{k+1}^{\text{wall}, i}|).$$

Здесь $\psi_{k+1}^{\text{wall}, i}, i = 1, \dots, N_w$ – направления стен; N_w – их количество (в данной работе $N_w = 4$).

Затем формируется корректирующее измерение для уравнений ошибок:

$$z_{k+1}^{\text{HDE}} = \psi_{k+1}^{\text{step}} - \psi_{k+1}^{\text{wall}} = H^{\text{HDE}} x + r^{\text{HDE}}.$$

Здесь r^{HDE} – шум измерений.

В работе [12] было показано, что допустимо следующее приближенное выражение для матрицы измерений:

$$H^{\text{HDE}} = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Это значит, что третья компонента угла малого поворота, соответствующая повороту вокруг вертикальной оси и описывающая ошибку курса ИИБ, отождествляется с ошибкой курса пешехода. Несмотря на грубость этого допущения, использование точной матрицы измерений, куда входят модельные углы курса и тангажа, не дает улучшения точности.

Метод HDE дает хорошие результаты в экспериментах, где пешеход действительно в основном движется вдоль стен. Однако в случае сложных траекторий (содержащих множество участков, на которых $SLP = 0$) качество коррекции резко ухудшается.

4. АДАПТИВНЫЙ DUPT – ADUPT

Стандартная DUPT-коррекция «симметрична», т. е. поправки к координатам, скоростям и ориентации обоих ИИБ примерно равны по модулю и противоположны по знаку. Оба ИИБ корректируются в равной степени. Однако если можно определить, что навигационное решение одного из ИИБ имеет более высокую точность, то следует учесть эту информацию.

В работе предлагается модификация алгоритма DUPT-коррекции, названная «адаптивным DUPT». Предлагается корректировать ИИБ в разной степени в зависимости от соотношения между их «мерами ошибок». Мера ошибки – это косвенная характеристика точности ИИБ. Информацию о мерах ошибок блоков можно получить из HDE. Для этого предлагается для каждого блока выполнять все этапы HDE, кроме коррекции, т. е. обнаруживать прямолинейные участки, выбирать ближайшую стену, находить отклонение от нее (формировать z^{HDE}). Мерой ошибки будет функция от z^{HDE} , конкретный ее вид будет приведен далее.

Иллюстрация этой идеи приведена на рис. 2. Пунктирные линии синего и красного цветов показывают независимые решения левого и правого ИИБ, т. е. решения только с применением ZUPT-коррекции. При этом очевидно, что точность навигационного решения левого блока хуже – ошибка курса растет быстрее, в результате траектория левого ИИБ сильнее отклоняется от направления стены (которое в данном случае совпадает с истинным направлением движения пешехода), чем траектория правого, что приводит к большей ошибке координат. Сплошные линии показывают те же решения после применения стандартной DUPT-коррекции. Видно, что траектории проходят посередине между независимыми решениями. Если бы меньшую точность навигационного решения левого блока удалось учесть, итоговую точность

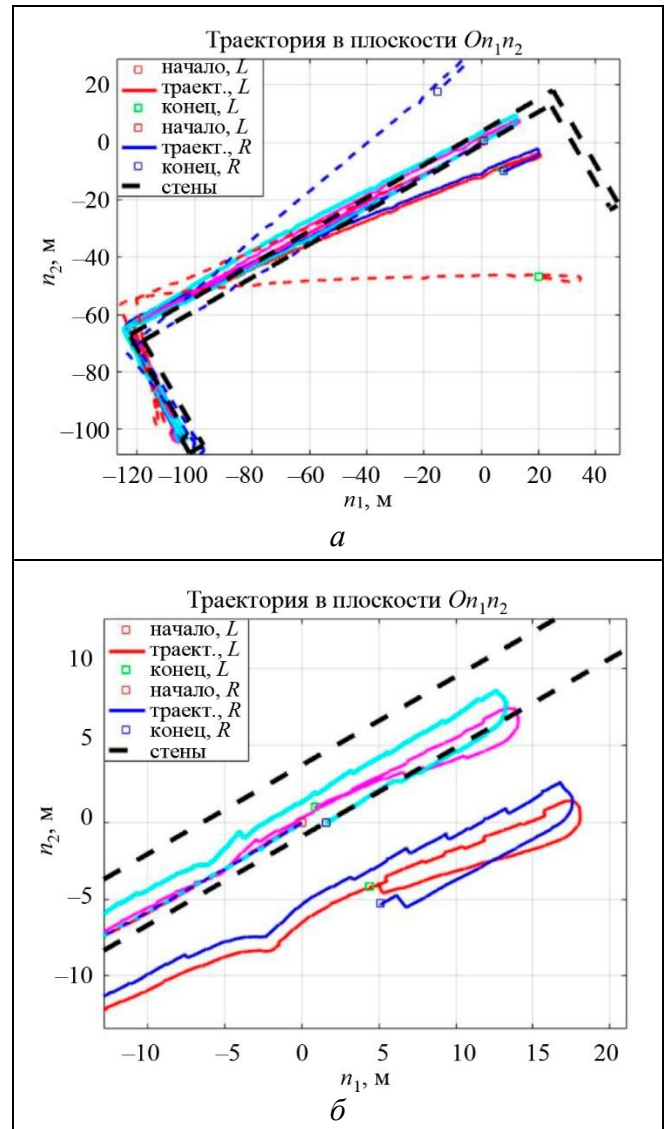


Рис. 2. Траектории левого и правого ИИБ при различных способах коррекции: а – траектория целиком, б – увеличенный фрагмент области возле стартовой точки

удалось бы повысить. Малиновая и голубая сплошные линии – результат применения адаптивной DUPT-коррекции. Разная скорость нарастания ошибки курса, выражающаяся в более сильном отклонении красной траектории, была учтена, и итоговая точность оказалась выше, чем у стандартного алгоритма (по условиям эксперимента пешеход двигался по замкнутой траектории и точность оценивалась как отклонение конечной точки от начальной). На рис. 2 видно, что голубая и фиолетовая линии приходят практически в ту же точку, откуда начинаются, в то время как синяя и красная сплошные линии приходят в точку, отстоящую от начала траектории примерно на 8-10 м. Далее будет описано, как именно вычислялись меры ошибок ИИБ, позволившие настроить DUPT-коррекцию, и как они вводились в алгоритм.



Мерой ошибки называется величина

$$\alpha_k^{l(r)} = \sum_{i=1}^k |z_i^{\text{HDE}, l(r)}|.$$

Она формируется после начала движения и обновляется, когда обнаруживается прямолинейное движение. То есть в моменты сложного движения используется накопленная к текущему моменту информация о мере ошибки каждого ИИБ. Далее формируется коэффициент α_k , который внесет несимметричность в DUPT, а именно, в матрицу измерений:

$$H^{\text{ADUPT}} = [\alpha_k S^l \quad (1 - \alpha_k) S^r].$$

Естественно потребовать, чтобы значение этого коэффициента стремилось к единице, если мера ошибки правого ИИБ стремится к нулю. Это значит, что при точном правом ИИБ корректируется только левый и чем ниже точность правого ИИБ, тем меньше коэффициент α_k и тем сильнее корректируется траектория правого ИИБ. Простейший вариант соотношения между α_k^l и α_k^r , дающий такой результат, имеет вид:

$$\alpha_k = \frac{\alpha_k^l}{\alpha_k^l + \alpha_k^r}.$$

На рис. 3 представлены графики изменения значений коэффициентов α_k^l и α_k^r и соответствующий им график изменения значения α_k . Эти значения посчитаны на траектории, приведенной на рис. 2. Видно, что значения α_k^l стабильно больше и благодаря этому значение коэффициента α_k превышает 0,5, т. е. низкая точность левого ИИБ учтена. Отметим, что в выборе функции, связывающей коэффициент α_k и меры ошибок каждого ИИБ, есть большой простор. Однако для проверки работоспособности метода был выбран самый простой вариант.

5. ПРОВЕРКА НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ

Чтобы выяснить работоспособность описанного алгоритма, была осуществлена его проверка на экспериментальных данных. Были проведены две серии экспериментов. Во всех экспериментах пешеход перемещался по замкнутым траекториям, т. е. возвращался в точку старта. Мерой точности было отклонение местоположения пешехода от стартовой точки в конце эксперимента. Сравнивалась средняя точность в каждой серии экспериментов.

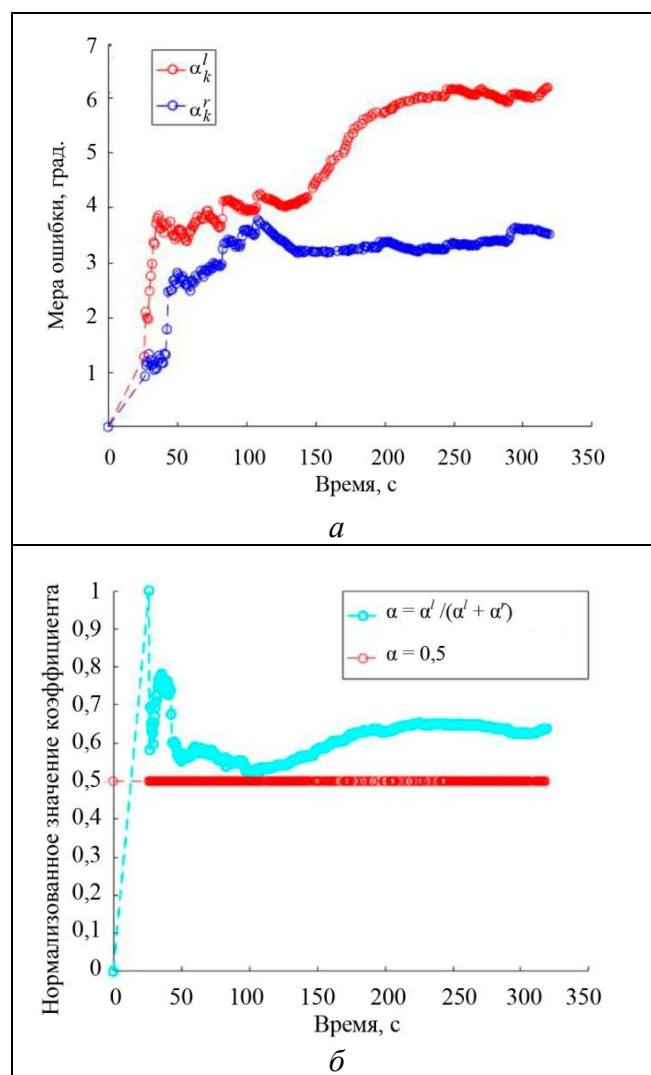


Рис. 3. Графики изменения значений коэффициентов для трека, приведенного на рис. 2: $a - \alpha_k^l$ и α_k^r , $b - \alpha_k$

Использовались датчики MPU9250. Частота записи равнялась 125 Гц. Данные с датчиков передавались по Bluetooth на смартфон. Дрейфы от запуска к запуску достигали сотен градусов в час, поэтому в процессе начальной выставки, когда блок был неподвижен, показания ДУС осреднялись и полученное значение вычиталось из сигнала при последующей обработке. Нестабильность нулевого сигнала по вариации Аллана оценивалась в 8 градусов в час, что очень много для навигационных задач, но типично для микроэлектромеханических датчиков. Внешний вид датчика и способ крепления на стопах приведен на рис. 4.

Первая серия состояла из 60 записей длиной 1, 3, 5 и 10 мин. В экспериментах участвовало 15 испытуемых. Пешеход перемещался в здании исключительно вдоль стен. Спутниковое изображение здания, в котором проводились эксперименты, и вид типовой траектории приведены на рис. 5.



Рис. 4. Внешний вид датчика (а) и способ крепления датчиков на стопах (б)

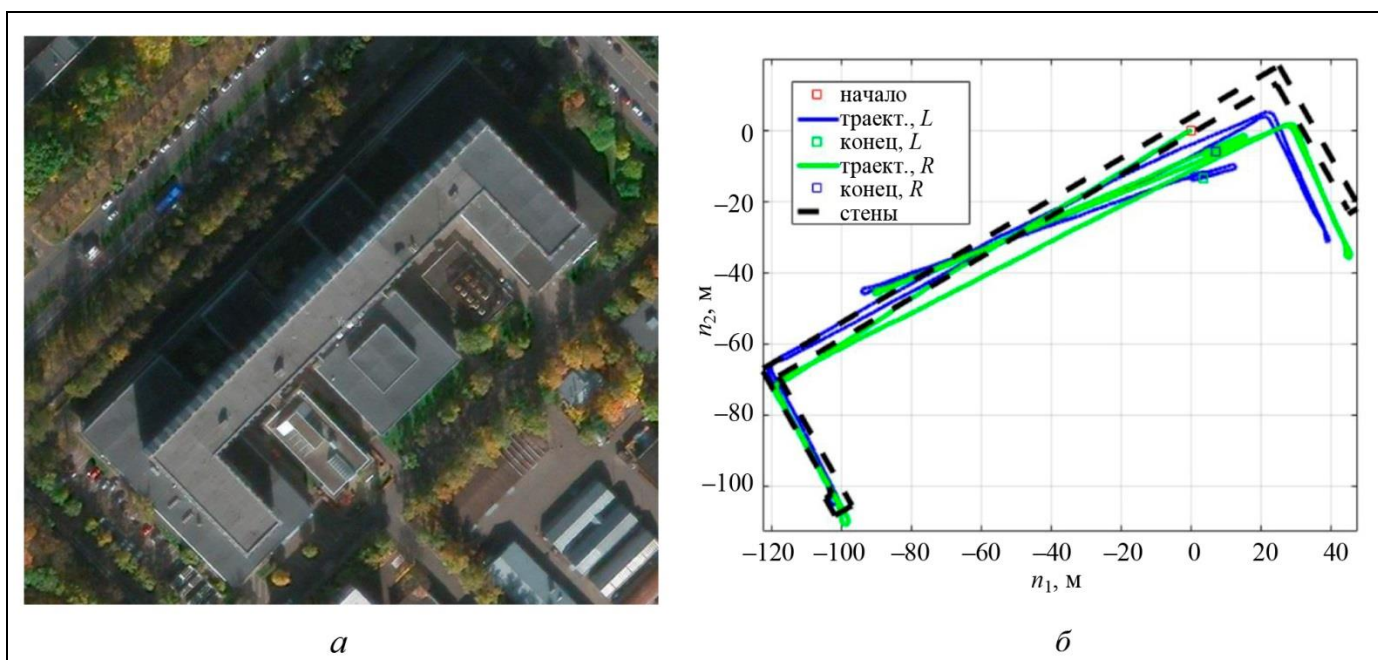


Рис. 5. Здание, в котором проводились эксперименты (а) и пример траектории (б) в 10-минутном эксперименте

В первой серии экспериментов лучшие результаты показал алгоритм HDE. Это было ожидаемо, поскольку почти в течение всего времени движения происходила коррекция угла курса. На втором месте по точности оказался ADUPT. Он предсказуемо показал лучший результат, чем DUPT, поскольку информация о направлениях стен, использовавшаяся для адаптации алгоритма, была достоверна. Лучше это видно на пяти- и десятиминутных записях (соответствующие данные приведены в таблице).

Таким образом, в случае «простых» траекторий, т. е. траекторий, содержащих в основном прямолинейные участки, ADUPT показал лучшие

результаты, чем DUPT, но худшие, чем HDE. Необходимо было проверить, что при усложнении траектории новый алгоритм не потеряет преимущество перед DUPT, а также выяснить, сможет ли он показать лучший результат, чем HDE.

Для исследования качества алгоритма ADUPT на «сложных» траекториях была проведена вторая серия экспериментов. Они проводились на улице, что дает возможность записи эталонной траектории от спутниковых навигационных систем. При участии трех испытуемых было проведено девять экспериментов длительностью от 5 до 15 мин. Несколько траекторий приведены на рис. 6. Желтая линия – траектория, полученная от спутниковой

Средняя ошибка навигации в горизонтальной плоскости, м

Тип алгоритма	Эксперименты в здании				Эксперименты на улице
	1 мин	3 мин	5 мин	10 мин	
ZUPT	1,3	6,9	21,6	23,2	24,6
ZUPT+HDE	0,7	1,7	3,3	4,6	–
ZUPT+DUPT	1,17	5,11	19,5	15,6	23,6
ZUPT+ADUPT	1,14	5,10	18,4	13,4	21,2



Рис. 6. Спутниковый эталон и инерциальное решение для двух экспериментов

навигационной системы, красная линия – инерциальное решение. Траектории были замкнуты и содержали множество дуг окружностей разных радиусов и небольшое количество прямолинейных участков.

Настроить должным образом детектор прямолинейного движения для таких данных затруднительно. Настройка – это выбор пороговых значений. Фактически выбирается, какие углы поворота считаются нарушающими условие прямолинейного движения, а какие нет. Если выбрать пороги так, что малые (порядка нескольких градусов) углы поворота будут приводить к отключению коррекции курса, то при движении пешехода по «сложной» траектории коррекция практически не будет осуществляться. Назовем это «жесткой» настройкой. Увеличивая пороги так, чтобы незначительные изгибы траектории считались детектором прямолинейного движения прямыми, получим настройку, которую назовем «мягкой». В этом случае коррекция курса на одной и той же траектории будет происходить чаще, чем в случае «жесткой» настройки. Таким образом, наилучшие настройки детектора прямолинейного движения должны быть разными для разных траекторий.

Во второй серии экспериментов лучший результат показал алгоритм ADUPT (см. таблицу). Для проверки ADUPT был выбран вариант «мягкой» настройки, поскольку «жесткая» настройка оставила бы DUPT без изменений. Здесь DUPT показал несколько худший результат, чем ADUPT. Результат работы HDE не приводится. Использование «жестких» настроек приводило к отключению коррекции почти на всех участках в большинстве экспериментов, в результате чего точности при применении HDE оказались примерно равны точностям, получавшимся в режиме только ZUPT-коррекции. При использовании «мягких» настроек HDE становился неработоспособен (давал искаженные траектории). Оказалось, что на сложных траекториях адаптивная коррекция позволила не потерять надежность (как в случае применения HDE) и при этом увеличить точность по сравнению с DUPT.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модификация известного алгоритма коррекции по расстоянию между стопами. Он основан на информации о том, что расстояние

между блоками, закрепленными на разных стопах, не может превышать определенной константы. В модифицированном алгоритме учитываются меры ошибок ИИБ в матрице измерений, тогда как при стандартном подходе блоки считаются равнозначными. Мера ошибок ИИБ вычисляется с использованием инструментария другого алгоритма коррекции – HDE. HDE хорошо работает в случае выполнения довольно жестких условий на траекторию движения пешехода. Основное условие – пешеход должен двигаться вдоль прямых, расположенных под существенно разными наперед заданными углами. Предполагается, что эти направления – направления стен, вдоль которых пешеход движется в здании. При обнаружении прямолинейных участков движения алгоритм определяет, вдоль какой стены перемещается пешеход, и формирует соответствующее измерение курса. В предложенном алгоритме выполняются все шаги HDE, кроме коррекции. Накапливающиеся суммы абсолютных значений измерений курса, которые формируются как разности между «курсом» стен и курсом пешехода, служат мерой ошибок ИИБ. Соотношение между ними используется для настройки адаптивного алгоритма коррекции по расстоянию между стопами.

Предложенный алгоритм проверен как на данных, подходящих для применения HDE (ходьба вдоль стен в здании с ортогональными стенами, см. рис. 5), так и на данных, где применение HDE приводит к недостоверным траекториям либо не влияет на решение вовсе, в зависимости от настроек детектора прямолинейного движения (см. рис. 6). В обоих случаях предложенный алгоритм показал лучшую точность по сравнению со стандартным алгоритмом коррекции по расстоянию между стопами.

Благодарности. Автор выражает благодарность своему научному руководителю Ю.В. Болотину, а также рецензентам за ценные замечания при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tom Judd, C. A Personal Dead Reckoning Module // Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. – Kansas City, 1997. – P. 47–51.
2. Kourogi, M., Kurata, T. Personal Positioning Based on Walking Locomotion Analysis with Self-contained Sensors and a Wearable Camera // Proceedings of the Second IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. – Tokyo, 2003. – P. 103–112.
3. Husen, M.N., Lee, S. Indoor Location Sensing with Invariant Wi-Fi Received Signal Strength Fingerprinting // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 11. – Art. no. 1898.
4. Ni, L.M., Liu, Y., Lau, Y.C., Patil, A.P. LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID // Wireless Networks. – 2004. – Vol. 10, no. 6. – P. 701–710.
5. Elwell, J. Inertial Navigation for the Urban Warrior // Proceedings of the Digitalization of the Battlespace IV Conference. – Orlando, 1999. – P. 196–204.
6. Brand, T.J., Phillips, R.E. Foot-to-Foot Range Measurement as an Aid to Personal Navigation // Proceedings of the 59th Annual Meeting of The Institute of Navigation and CIGTF 22nd Guidance Test Symposium. – Albuquerque, 2003. – P. 113–121.
7. Болотин Ю.В., Брагин А.В., Гулевский Д.В. Исследование состоятельности расширенного фильтра Калмана в задаче навигации пешехода с БИНС, закрепленными на стопах // Гироскопия и Навигация. – 2021. – Т. 29, № 2. – С. 59–77. [Bolotin, Y.V., Bragin, A.V., Gulevskii, D.V. Studying the Consistency of Extended Kalman Filter in Pedestrian Navigation with Foot-Mounted SINS // Gyroscopy and Navigation. – 2021. – Vol. 12, no. 2. – P. 155–165.]
8. Lee, J.H., Park, S.Y., Cho, S.Y., Park, C. Reduction of Heading Error Using Dual Foot-Mounted IMU // CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – Vol. 2498. – P. 370–376.
9. Skog, I., Nilsson, J.O., Zachariah, D., Handel, P. Fusing the Information from Two Navigation Systems Using an Upper Bound on Their Maximum Spatial Separation // Proceedings of IPIN. – Sydney, 2012. – P. 1–5.
10. Zachariah, D., Skog, I., Jansson, M., Handel, P. Bayesian Estimation with Distance Bounds // IEEE Signal Processing Letters. – 2012. – Vol. 19, no. 12, pp. 880–883.
11. Borenstein, J., Ojeda, L. Heuristic Drift Elimination for Personnel Tracking Systems // Journal of Navigation. – 2010. – Vol. 63. – P. 591–606.
12. Abdulrahim, K., Hide, C., Moore, T., Hill, C. Aiding MEMS IMU with Building Heading for Indoor Pedestrian Navigation // Proceedings of Ubiquitous Positioning Indoor Navigation and Location Based Service (UPINLBS). – Kirkkonummi, 2010. – P. 1–6.
13. Jimenez, A.R., Zampella, F., Seco, F.J., Prieto, J.C. Improved Heuristic Drift Elimination (iHDE) for Pedestrian Navigation in Complex Buildings // Proceedings of IPIN. – Guimaraes, 2011. – P. 1–8.
14. Ju, H.J., Lee, M.S., Park, C.G., Lee, S. Advanced Heuristic Drift Elimination for Indoor Pedestrian Navigation // Proceedings of IPIN. – Busan, 2014. – P. 729–732.
15. Foxlin, E. Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors // IEEE Computer Graphics and Applications. – 2005. – Vol. 25, no. 6. – P. 38–46.
16. Ojeda, L., Borenstein, J. Non-GPS Navigation for Security Personnel and First Responders // Journal of Navigation. – 2007. – Vol. 60, no. 3. – P. 391–407.
17. Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А. Математические основы инерциальных навигационных систем. – М.: Изд-во Московского университета, 2020. – 164 с. [Vavilova, N.B., Golovan, A.A., Parusnikov, N.A. Mathematical Basis of Inertial Navigation Systems. – Moscow: Moscow State University Press, 2020. – 164 s. (In Russian)]



18. Skog, I., Handel, P., Nilsson, J., Rantakokko, J. Zero-Velocity Detection – An Algorithm Evaluation // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2010. – Vol. 57, no. 11. – P. 2657–2666.
19. Tian, X., Chen, J., Han, Y. et al. A Novel Zero Velocity Interval Detection Algorithm for Self-Contained Pedestrian Navigation System with Inertial Sensors // Sensors. – 2016. – Vol. 16, no. 10. – Art. no. 1578.
20. Wagstaff, B., Kelly, J. LSTM-Based Zero-Velocity Detection for Robust Inertial Navigation // Proceedings of IPIN2018. – Nantes, 2018. – P. 1–8.
21. Zhang, L., Chen, B., Li, H. and Liu, Y., Deep Neural Network-Based Adaptive Zero-Velocity Detection for Pedestrian Navigation System. // Electron. Lett. – 2022. – Vol. 58, iss. 1. – P. 28–31.
22. 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.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.Б. Рапопортом.

Поступила в редакцию 02.02.2023,
после доработки 16.05.2023.
Принята к публикации 16.05.2023.

Брагин Александр Викторович – мл. науч. сотрудник, МГУ имени М.В. Ломоносова,
✉ avb9676@yandex.ru.
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0001-5819-1642>

© 2023 г. Брагин А.В.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

AN ADAPTIVE AIDING ALGORITHM FOR PEDESTRIAN NAVIGATION

A.V. Bragin

Moscow State University, Moscow, Russia

✉ avb9676@yandex.ru

Abstract. This paper presents a novel aiding algorithm for pedestrian navigation using foot-mounted inertial measurement units (IMUs). Autonomous pedestrian navigation with foot-mounted IMUs is based on the integration of simplified navigation equations and the correction of the navigational solution with zero velocity. Additional aiding algorithms are needed in the absence of external information such as GNSS or Wi-Fi and Bluetooth signals. There are two main groups of such algorithms: aiding based on information about bounded step length (two IMUs on both feet are required) and aiding based on straight-line path detection (heuristic drift elimination, HDE). The first method does not consider different accuracy of IMUs whereas the performance of the second one strongly depends on trajectory form. An attempt to eliminate the drawbacks of both algorithms is undertaken below. The novel algorithm is an adaptive version of the method based on bounded step length. Adaptivity is provided by tuning the measurement matrix for the less accurate IMU. The accuracy is assessed through the trajectory analysis based on information about straight-line motion. The novel algorithm is tested on experimental data. According to the testing results, this algorithm has better performance in the experiments with complicated trajectories. It can be used within an integrated pedestrian navigation system in the absence of external information.

Keywords: inertial measurement unit, pedestrian navigation, indoor navigation, inertial navigation, aiding algorithms.

Acknowledgments. The author is grateful to his scientific supervisor Yu.V. Bolotin and reviewers for careful reading of the manuscript and helpful remarks.