

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОХОДКИ ЧЕЛОВЕКА

Представлен новый способ коррекции по скорости инерциальной навигационной системы (ИНС) для автономной пешеходной навигации, в которой используется инерциальный измерительный модуль (ИИМ), закрепленный на теле пешехода. Предложено использовать кинетическую модель походки человека при формировании так называемого виртуального датчика скорости. Показано, как знание динамики ошибок ИНС и модели движения человека помогают ограничить рост погрешностей при вычислении горизонтальных составляющих скорости и углов наклона в ИНС. Алгоритм обработки основан на фильтре Калмана и может быть использован в реальном времени для реализации в пешеходных навигационных системах, содержащих ИИМ с тремя гироскопами и с тремя акселерометрами. Исследованы точностные характеристики алгоритма с использованием экспериментальных данных движения человека в закрытых помещениях.

Введение

Автономные системы пешеходной навигации обычно содержат ИИМ с тремя гироскопами и тремя акселерометрами для определения местоположения пользователя. При расчете навигационных параметров на постоянных временных интервалах производится интегрирование по времени данных, поступающих от чувствительных элементов. При отсутствии коррекции ошибки положения, скорости и ориентации растут со временем и могут быть велики, особенно если в ИНС использованы недорогие микромеханические датчики. С учетом сказанного применение ИНС без коррекции неприемлемо для пешеходной навигации.

Один из способов борьбы с расходимостью погрешностей ИНС – использование внешних средств коррекции по скорости и положению. Однако в условиях закрытых помещений в силу отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем (СНС) для этого необходима специальная инфраструктура, включающая радиомаяки, Wi-Fi роутеры, ультразвуковые передатчики и т.д.

В предлагаемом альтернативном методе навигации используется биомеханика ходьбы. Принимая во внимание тот факт, что люди передвигаются шаг за шагом, можно существенно уменьшить рост погрешностей навигационных параметров, проводя вычисления с периодичностью, соответствующей не фиксированным интервалам времени, а частоте шагов. Инерциальные датчики в сис-

Дэвидсон Павел. Магистр наук, научный сотрудник Технического университета Тампере (г. Тампере, Финляндия).

Такала Ярмо. Профессор Технического университета Тампере.

Статья по докладу на XVII Санкт-Петербургской международной конференции по инерциальным навигационным системам.

Научный редактор перевода д.т.н. О.А.Степанов.

теме пешеходного счисления пути используются для определения времени, соответствующего началу и окончанию шага, а также позволяют вычислить длину и направление шага. Таким образом, погрешность определения места пропорциональна количеству шагов или пройденному расстоянию. Во многих современных системах пешеходной навигации используется ИИМ, который закреплен на ботинке. Это позволяет производить коррекцию по нулевой скорости (ZUPТ коррекцию) на каждом шаге. Хотя, с практической точки зрения, расположение ИИМ на ботинке нежелательно для пользователей.



Рис. 1. Положение ИИМ на теле человека во время испытания

информации о динамике походки человека при формировании измерения скорости. Скорость определяется с помощью измерений акселерометров и дополнительных данных о движении пешехода, которые выводятся из модели кинематики походки.

Различие свойств погрешностей выходных данных ИНС и этого «виртуального» измерения позволяет использовать комплексирование и значительно улучшить работу ИНС за счет удержания погрешностей горизонтальных составляющих скорости и углов наклона на низком уровне. Обработка выходных данных откорректированной ИНС обеспечивает точную оценку длины и направления шага. В статье представлены результаты реальных испытаний движения человека в закрытых помещениях. Испытания проводились с использованием микромеханического ИИМ со стабильностью смещения нуля гироскопов 10 град/ч. Эталонное положение определялось с помощью известных точек маршрута в помещении.

Динамика походки

Динамика походки – уникальный источник информации при выполнении коррекции по скорости пешеходных навигационных систем, которому инженеры не уделяют должного внимания. Анализ походки показывает, что в основном характер движения человека при ходьбе – циклический, повторяющийся и удивительно постоянный [1]. При нормальной постоянной скорости ходьбы значения вертикальных и горизонтальных компонентов скорости центра масс тела колеблются с частотой ходьбы, равной частоте шага. Примеры горизонтальной составляющей скорости и вертикального ускорения при нормальной ходьбе показаны на рис. 2 и 3.

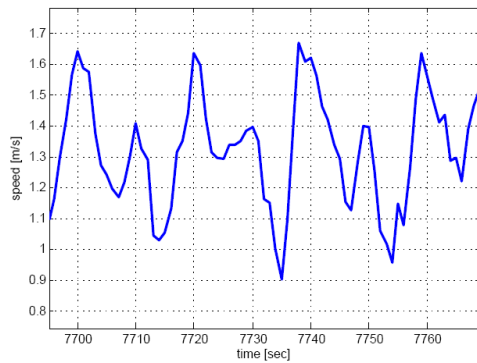


Рис. 2. Горизонтальная составляющая скорости при ходьбе

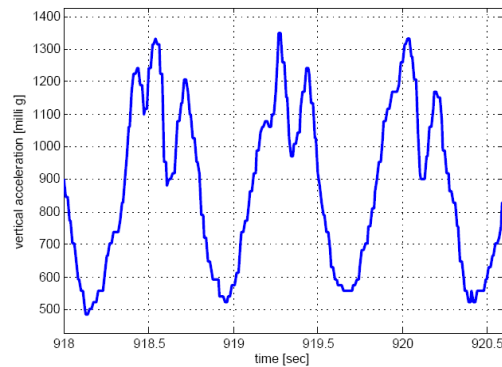


Рис. 3. Вертикальное ускорение при ходьбе

Амплитуда вертикального ускорения и вертикального перемещения пропорциональны длине шага. Поэтому можно определить шаг и оценить его длину с помощью моделей походки и измеренных параметров движения. Когда нога касается земли, при ударе вырабатывается значительное вертикальное ускорение. Поэтому алгоритмы идентификации шага могут быть основаны на анализе характера ускорения при ходьбе. Например, нательные акселерометры определяют максимум или минимум вертикального ускорения, что соответствует моменту шага. Если вертикальное ускорение превышает заданный порог, алгоритм идентификации фиксирует шаг. Поскольку характер ускорения зависит от типа движения (ходьба, бег, подъем/спуск с лестницы и т.д.) и от типа поверхности, по которой идет человек (твердая, мягкая, скользкая), определить порог для надежной идентификации шага не так просто [3, 4].

Другой метод идентификации шага путем обработки данных акселерометров – использовать переход сигнала ускорения через нулевой уровень. При таком методе нужно, чтобы движение пешехода измерял трехосный акселерометр. Значение вектора ускорения можно вычислить путем вычитания величины ускорения силы тяжести в данном месте из измеренного вектора ускорения. Момент касания земли определяется на основе перехода сигнала ускорения через нулевой уровень. Поскольку используется норма вектора ускорения, ориентация ИИМ не влияет на измерения. Идентификация шага инициируется при фиксации перехода через ноль [5].

Длину шага (*step*) можно определить как расстояние от следа пятки одной ноги до следа пятки другой ноги. Это расстояние, которое преодолевает одна нога. Длиной двойного шага (*stride*) обозначается расстояние, которое проходит пятка одной ноги до момента, когда эта нога снова касается земли – другими словами, примерно два шага, так как за это время другая нога тоже один раз коснулась земли. При симметричной ходьбе длина двойного шага примерно равна двойной длине шага, поэтому термины «длина двойного шага», «длина шага» и «размер шага» в большинстве случаев в контексте пешеходной навигации могут применяться в равной степени. Длина шага зависит от нескольких факторов, например от скорости ходьбы, частоты шагов, роста идущего.

Алгоритмы оценки длины шага обычно разделяются на две группы: алгоритмы на основе биомеханических моделей (1) и алгоритмы на основе эмпирических соотношений (2). Пример алгоритма оценки длины шага на основе биомеханической модели – это бесколесный двуногий робот, моделируемый в виде поворотного маятника с длиной ноги l и вертикальным перемещением центра

тяжести h . В этом случае рассчитать длину шага можно следующим образом [11]:

$$\Delta L_1 = K\sqrt{2lh - h^2}, \quad (1)$$

где K – калибровочная постоянная.

Эмпирическое соотношение между вертикальным ускорением и длиной шага

$$\Delta L_2 = K\sqrt{a_{\max} - a_{\min}}, \quad (2)$$

где $a_{\max}$, $a_{\min}$ – максимальные и минимальные значения вертикального ускорения во время шага. Эти алгоритмы эффективны при ходьбе по плоской поверхности. Погрешность оценки длины шага составляет 2-5% от расстояния. При ходьбе по неплоской поверхности или подъеме по лестнице качество работы алгоритма резко ухудшается.

Среднюю скорость во время шага можно вычислить, разделив длину шага на его длительность. Эту скорость относительно земли можно разложить на северный и восточный компоненты скорости с помощью курса, рассчитанного ИНС и осредненного за шаг. Таким образом, мы получаем оценку скорости пешехода на шаге. Поскольку погрешность скорости для этого алгоритма оценки на основе кинетической модели является результатом действия нескольких источников ошибок – погрешность модели, погрешность измерения, неточность определения шага, то она может быть аппроксимирована случайным гауссовым шумом.

После вычисления горизонтальных составляющих скорости из ИНС поступают данные об азимуте. Погрешность азимута является источником дополнительной погрешности северной и восточной скорости. Если скорость пешехода 1 м/с, а погрешность азимута 1° , то погрешность северной составляющей скорости не превысит 0,015 м/с, т.е. она меньше погрешности скорости, рассчитанной на основе кинетической модели походки.

Комплексирование данных ИИМ и динамики движения пешехода

В рассматриваемой пешеходной навигационной системе закрепленный на теле ИИМ включает три гироскопа и три акселерометра, которые измеряют проекции абсолютной угловой скорости и кажущееся ускорение на оси чувствительности. Навигационные вычисления производятся в местной системе координат. Матрица преобразования из системы координат датчика в местную систему координат рассчитывается с помощью выходных данных гироскопов. Уравнения введенных параметров реализуются как наземное навигационное устройство локального уровня без вертикального канала. Описание бесплатформенного навигационного алгоритма приведено в [13, 14].

Ошибки положения, скорости и ориентации в автономной ИНС растут со временем. При коротком времени автономной работы (1-1,5 ч) погрешности горизонтальной скорости и наклонов можно аппроксимировать колебаниями на частоте Шулера. Когда ИНС считается номинально ориентированной горизонтально и при высотной компенсации и постоянной низкой скорости, модель ошибки по северному и восточному каналам описывается следующими уравнениями [8, 9]:

$$\begin{aligned}
\delta \dot{V}_E &= -g\phi_N + B_E; \\
\dot{\phi}_N &= \frac{\delta V_E}{R} + \varepsilon_N; \\
\delta \dot{V}_N &= g\phi_E + B_N; \\
\dot{\phi}_E &= -\frac{\delta V_N}{R} + \varepsilon_E,
\end{aligned} \tag{3}$$

где $\delta V_E, \delta V_N$ – северный и восточный компоненты ошибки скорости, ϕ_E, ϕ_N – погрешности горизонтального наклона, $B_E, B_N, \varepsilon_E, \varepsilon_N$ – проекции смещений нуля акселерометров и дрейфов гироскопов на оси местной системы координат. Следует отметить, что при принятых допущениях северный, восточный и вертикальные каналы не связаны и их данные могут обрабатываться отдельно. Блок-схема северного канала ИНС показана на рис. 4 (сплошные линии) [9].

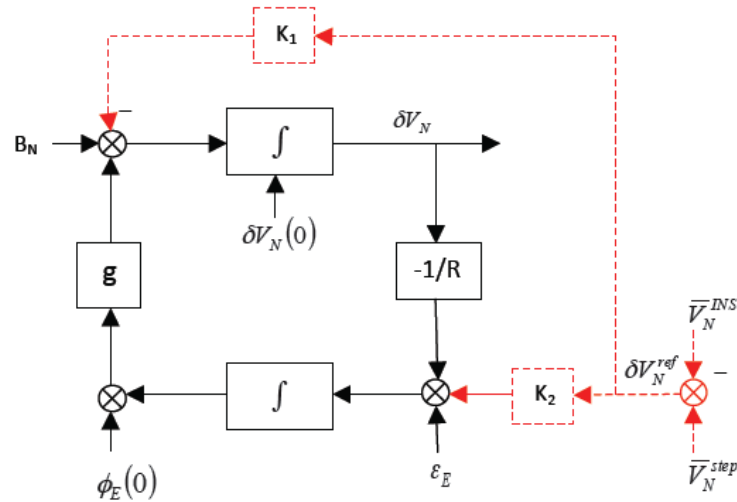


Рис. 4. Схема демпфирования погрешности северного канала ИНС

В теории управления хорошо известен метод демпфирования колебаний на основе контура обратной связи для управления динамическими характеристиками системы. Измерение выходного сигнала, который содержит некоторые компоненты вектора состояния динамической системы, поступает обратно на контроллер, где разность эталонного и выходного сигналов усиливается, чтобы изменить входной сигнал желаемым образом и улучшить качество работы системы. Демпфирование погрешностей ИНС может быть выполнено путем использования внешней информации о скорости. Управляющие воздействия показаны на рис. 4 пунктирными линиями. Коэффициенты усиления K_1 и K_2 могут вычисляться заранее или в реальном времени.

В пешеходной навигации используется кинетическая модель походки, с помощью которой идентифицируется шаг и определяется его длина во время ходьбы. Таким образом, оценки размера и длительности шага можно привлекать для расчета средней скорости на каждом шаге. Погрешность вычисленной средней скорости включает погрешности модели длины шага, неточность определения длительности шага и погрешностей измерений акселерометров. Компоненты погрешности не коррелированы друг с другом, в результате чего погрешность

скорости является случайной с малой корреляцией по времени. Поскольку погрешность средней скорости также не коррелирована с погрешностью скорости ИНС, ее можно использовать в качестве внешнего измерения скорости для ИНС.

Даже когда человек идет с почти постоянной скоростью, оказывается, что профиль скорости на каждом шаге включает колебания около 0,3 м/с относительно средней скорости ходьбы (см. рис. 2). Поскольку скорость ИНС имеет тот же профиль, сравнение мгновенной скорости ИНС со средней скоростью было бы неверным. Сравнивать со средней скоростью от внешнего источника можно скорость ИНС, осредненную за один шаг. В результате этого сравнения можно получить оценку погрешности скорости ИНС.

Погрешность скорости ИНС меняется медленно, поэтому можно считать ее постоянной в течение одного шага. В этом случае осредненная на одном шаге скорость ИНС рассчитывается как истинная средняя скорость плюс погрешность скорости. Северный компонент скорости описывается уравнением

$$\bar{V}_N^{INS} = \frac{1}{(t_{k+1} - t_k)} \int_{t_k}^{t_{k+1}} (V_N^{true} + \delta V_N^{INS}) dt = \bar{V}_N^{true} + \delta V_N^{INS}, \quad (4)$$

где δV_N^{INS} – северный компонент погрешности скорости ИНС, $\bar{V}_N^{true}$ – истинное среднее значение северного компонента скорости. Расчеты восточного компонента скорости ИНС проводятся аналогично. Погрешность скорости ИНС можно получить, вычтя скорость, рассчитанную по кинетической модели, из скорости ИНС, осредненной за один шаг:

$$z = \begin{bmatrix} \bar{V}_N^{INS} - \bar{V}_N^{step} \\ \bar{V}_E^{INS} - \bar{V}_E^{step} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta V_N^{INS} + w_N \\ \delta V_E^{INS} + w_E \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где, $\bar{V}_N^{INS}$ – среднее значение северного компонента скорости, рассчитанное по скорости ИНС, $\bar{V}_N^{step}$ – среднее значение северного компонента скорости на одном шаге, рассчитанное по кинетической модели шага, w_N , w_E – погрешности скорости при оценке на основе кинетической модели. При расчете погрешности скорости ИНС с помощью (5) было принято, что оценка скорости по кинетической модели имеет случайную погрешность, распределенную как случайный гауссовский шум с отклонением скорости 0,0025 м²/с². Такое виртуальное измерение погрешности скорости ИНС можно выполнять на каждом шаге.

Сформулируем математическую модель системы для горизонтальных скоростей и наклонов в терминах пространства состояний. Описываются только уравнения для северного канала, так как обработка данных для восточного канала ведется аналогичным образом. Поскольку в пешеходных навигационных системах смещение нуля акселерометра оказывает меньшее влияние, чем остальные источники погрешностей, для каждого канала будут наиболее важны три переменные: погрешность скорости ИНС, погрешность наклона и погрешность дрейфа гироскопа. Дифференциальные уравнения состояния для северного канала выражаются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \delta \dot{V}_N \\ \dot{\phi}_E \\ \dot{\varepsilon}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g & 0 \\ -1/R & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta V_N \\ \phi_E \\ \varepsilon_E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_a \\ 0 \\ n_g \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где n_a, n_g – шум. Измерение, используемое как входная величина для фильтра Калмана, представляет собой разность между средними скоростями (5) и имеет вид:

$$z(t_k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta V_N(t_k) \\ \phi_E(t_k) \\ \varepsilon_E(t_k) \end{bmatrix} + w(t_k). \quad (7)$$

На основе моделей системы и измерений можно построить фильтр Калмана. Сначала рассмотрим изменение от времени t_{k-1} до t_k . При получении измерения выполняются вычисления этапа коррекции и в ИНС подается корректирующий сигнал. Оптимальная оценка ошибки в момент t_{k-1}

$$\hat{x}(t_{k-1}) = \begin{bmatrix} \delta \hat{V}_N(t_{k-1}) \\ \hat{\phi}_E(t_{k-1}) \\ \hat{\varepsilon}_E(t_{k-1}) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Эта оценка служит корректирующим сигналом для ИНС, который подается в момент t_{k-1} . Предсказание вектора состояния в момент t_k до получения нового измерения имеет вид

$$\hat{x}(t_k^-) = \begin{bmatrix} \delta \hat{V}_N(t_k^-) \\ \hat{\phi}_E(t_k^-) \\ \hat{\varepsilon}_E(t_k^-) \end{bmatrix} = 0. \quad (9)$$

Таким образом, вычислять предсказание вектора состояния в явной форме нет необходимости. Уравнение предсказания матрицы ковариации:

$$P(t_k^-) = \Phi(t_k, t_{k-1}) P(t_{k-1}^+) \Phi^T(t_k, t_{k-1}) + Q(t_k), \quad (10)$$

где $\Phi(t_k, t_{k-1})$ – матрица перехода состояний. Для коррекции оценки в момент получения нового измерения рассчитывается коэффициент усиления фильтра и матрица ковариации

$$K(t_k) = P(t_k^-) H^T (H P(t_k^-) H^T + R)^{-1}. \quad (11)$$

$$P(t_k^+) = P(t_k^-) - K(t_k) H P(t_k^-). \quad (12)$$

Так как $\hat{x}(t_k^-)$ равен нулю, коррекция оптимальной оценки вектора состояния определяется как

$$\hat{x}(t_k^+) = K(t_k) z(t_k). \quad (13)$$

В последней формуле содержатся управляющие воздействия, подаваемые обратно в ИНС для снижения погрешностей горизонтальных компонентов скорости и наклонов. Аналогичным образом можно скорректировать дрейфы горизонтальных гироскопов, но в текущей версии алгоритма такая коррекция не реализована.

Результаты экспериментов

Предлагаемый метод коррекции ИНС по скорости прошел проверку с использованием реальных данных при движении человека в закрытых помещениях. На рис. 5 показан тестовый маршрут длиной 170 м в типичном офисном здании. Истинная траектория движения пешехода показана сплошной линией (1). Программа испытаний включала разные типы движений: ходьба с переменной длиной и частотой шагов, подъем/спуск с лестницы, остановку, резкие повороты и открывание дверей.

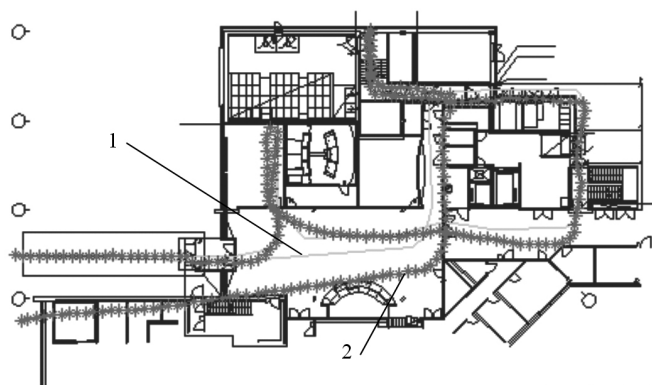


Рис. 5. Траектория прохода по зданию: истинная траектория – сплошная линия (1), траектория по ИНС – линия со звездочками (2)

Пешеходная система счисления пути включает ИИМ, состоящий из трех комбинированных устройств VTI Technologies SCC1300-D02, объединяющих гироскоп и акселерометр с цифровыми интерфейсами SPI [12]. ИИМ представляет собой автономное устройство для сбора инерциальных данных (рис. 6). Кроме трех гироскопов и акселерометров устройство включает электронику для сбора данных, карту памяти и батареи.



Рис. 6. ИИМ, батарейки и считывающая электроника

С помощью рассмотренного метода можно снизить только погрешность измерения расстояния в пешеходных системах счисления. Во время испытаний она не превысила 2% от пройденного расстояния. Этот результат можно еще улучшить, скомпенсировав дрейф горизонтальных гироскопов. Самая большая погрешность – это погрешность курса. Данный алгоритм не способен ее скорректировать, для этого нужны другие методы, например метод сличения с картой.

Заключение

Предложен новый алгоритм внешней коррекции ИНС по скорости в пешеходных навигационных системах. Алгоритм может использоваться в нательных ИНС, которые в некоторых случаях предпочтительнее датчиков, установленных на ботинке, в основном в силу того, что нательный ИИМ изолирован от толчков и высокочастотных возмущений.

Отличительная особенность рассмотренного алгоритма заключается в использовании кинетической модели походки человека, что обеспечивает альтер-

нативный способ расчета пройденного расстояния и осредненной за шаг скорости, который в работе трактуется как виртуальное измерение скорости. Различные свойства погрешностей в выходных данных ИНС и в этом виртуальном измерении позволяют значительно улучшить работу ИНС за счет удержания погрешностей горизонтальной скорости и углов наклона на низком уровне. Пройденное расстояние определяется с погрешностью 2%. Никаких ограничений на движение пешехода не налагается, но надежная коррекция по скорости возможна только при ходьбе по плоской поверхности или остановке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Stirling, R.**, Development of a Pedestrian Navigation System Using Shoe Mounted Sensors, MSc thesis, University of Alberta, 2004.
2. **Ladetto, Q.**, On Foot Navigation: Continuous Step Calibration Using Both Complementary Recursive Prediction and Adaptive Kalman Filtering, in Proceedings of ION GPS conference, 2000.
3. **Ladetto, Q. and Merminod, B.**, Digital Magnetic Compass and Gyroscope Integration for Pedestrian Navigation, 9th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St-Petersburg, 27-29 May 9, 2002.
4. **Leppakoski, H., Käppi, J., Syrjarinne, J., and Takala, J.**, Error Analysis of Step Length Estimation in Pedestrian Dead Reckoning, in Proceedings of ION GPS, Portland, OR, September 24 - 27, 2002.
5. **Matthews, C., Ketema, Y., Gebre-Egziabher, D., and Schwartz, M.**, In-Situ Step Size Estimation Using a Kinetic Model of Human Gait, in Proceedings of ION GNSS, Portland, OR, September 21-24, 2010.
6. **Ashkenazy, Y., Hausdorf, J., Ivanov, P., and Stanley, E.**, A Stochastic Model of Human Gait Dynamics, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, vol. 316, no. 1-4, December 2002.
7. **Cui, Y. and Ariyur, K.B.**, Bounding Inertial Drift With Human Gait Dynamics for Personal Navigation, IEEE International Systems Conference, 2011.
8. **Farrell, J. and Barth, M.**, The Global Positioning System and Inertial Navigation, McGraw-Hill, 1999.
9. **Salychov, O.**, Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions, Moscow: BMSTU Press, 2004.
10. **Titterton, D. and Weston, J.**, Strapdown Inertial Navigation Technology, IET, The Institution of Engineering and Technology, 2004.
11. **Jahn, J., Batzer, U., Seitz, J., Patino-Studencka, L., and Boronat, J.**, Comparison and Evaluation of Acceleration Based Step Length Estimators for Handheld Devices, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Zürich, Switzerland, 15-17 September 2010.
12. **VTI Technologies Oy**, "SCC1300 gyroscope" datasheet, <http://www.vti.fi/en>
13. **Savage, P.G.**, Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part I: Attitude algorithms, *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, vol. 21, no. 1, pp. 19--28.
14. **Savage, P.G.**, Strapdown Inertial Navigation Integration Algorithm Design Part II: Velocity and position algorithms, *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, 1998, vol. 21, no. 2, pp. 208--221.

Abstract. This paper presents a novel approach to INS velocity aiding in autonomous pedestrian navigation systems with body-mounted IMU. The proposed solution uses a kinetic model of human gait as a virtual velocity sensor. In this paper we show how an understanding of INS error dynamics and knowledge of human motion help to curb the divergence of INS computed horizontal velocity and tilt errors. Heading and heading gyro drift cannot be corrected with this method and require some additional procedures. This algorithm can be adapted for implementation on real-time pedestrian navigation systems equipped with 6 DOF IMU. The algorithm accuracy performance was investigated using data from indoor walking tests.

Key words: Pedestrian navigation, IMU, MEMS, gait model