

МНОГОСЕНСОРНАЯ ИНДИВИДУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ С ВИЗУАЛЬНЫМИ СРЕДСТВАМИ КОРРЕКЦИИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Описывается многосенсорная навигационная система IndoorGuide. Встроенная в систему монокулярная камера обеспечивает выработку информации для коррекции местоположения и параметров ориентации. Данные об ориентации формируются путем отслеживания точек схождения в изображениях от монокулярной камеры. Коррекция местоположения осуществляется на основе картографирования и распознавания ранее посещенных мест. Приводится сопоставление результатов комплексной обработки имеющейся информации с использованием фильтра Калмана и метода робастной оптимизации на основе графов. Представлены и обсуждаются результаты экспериментальных исследований.

Введение

При проведении операций по охране порядка или спасению в условиях закрытых помещений чрезвычайно важно, чтобы занятый в операции персонал обладал точной информацией о месте действий. Если место действия исследуется впервые, во время операции необходимо создать карту, которой бы обменивались разные группы, чтобы позднее появившиеся пользователи могли воспользоваться информацией о ранее посещенных местах. Это повышает осведомленность об обстановке и в конечном счете является залогом успеха операции.

Для достижения указанной цели требуется решить несколько задач. Во-первых, с помощью переносных датчиков необходимо отслеживать все движения персонала, включая и его высокодинамичные составляющие. Во-вторых, необходим сбор и обмен данными о месте действия между разными командами для того, чтобы появившиеся позже пользователи могли воспользоваться накопленной информацией.

Легкие и миниатюрные микромеханические акселерометры и гироскопы позволяют решить первую задачу. На основе измеренных интегрированным измерительным модулем (ИИМ) ускорений и угловых скоростей с использованием

Кесслер Кристоф. Инженер-исследователь Института оптимизации систем, Технологический институт Карлсруэ (Германия).

Ашер Кристиан. Инженер-исследователь Института оптимизации систем, Технологический институт Карлсруэ.

Флад Михаэль. Студент Института оптимизации систем, Технологический институт Карлсруэ.

Троммер Герт Ф. Профессор, доктор технических наук, руководитель Института оптимизации систем и декан факультета электротехники и информационной техники. Технологический институт Карлсруэ. Действительный член Академии навигации и управления движением.

Статья по докладу на XVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.

алгоритма бесплатформенной инерциальной навигационной системы рассчитывается полное навигационное решение, включающее местоположение, скорость и ориентацию (пространственное положение). В последнее время микромеханические датчики значительно усовершенствованы, и теперь с их помощью удастся отслеживать высокодинамичные движения людей на коротких периодах времени. Однако им все еще свойственны такие погрешности, как шум и значительное смещение нуля, которые, не будучи скомпенсированными, приводят к росту ошибок ориентации и местоположения. Поэтому необходимы дополнительные меры для обеспечения долговременной стабильности навигационного решения.

Решение указанной задачи представляет особую трудность при работе в закрытых помещениях, поскольку для навигации может использоваться ограниченный объем данных. В отличие от автомобильных или аэрокосмических навигационных систем в пешеходных (индивидуальных) системах сигналы глобальных навигационных спутниковых систем обычно недоступны или подвержены эффекту многолучевости. Магнитные поля бывают искажены металлическими конструкциями и электрическими проводами в зданиях, поэтому их нельзя использовать для определения ориентации. Таким образом, для достижения долговременной точности требуется привлечение дополнительных данных от других датчиков.

Общий метод повышения точности при решении задачи индивидуальной навигации состоит в том, чтобы интегрировать в навигационную систему размещенный на ноге ИИМ и использовать данные о шагах человека, проводя коррекции по нулевой скорости – так называемые Zero Velocity Update (ZUPT) коррекции [1, 2]. Это реализуется каждый раз, когда нога оказывается на полу, что значительно уменьшает дрейф. Тем не менее, погрешности результирующего навигационного решения по-прежнему имеют растущие погрешности, главным образом, из-за ненаблюдаемости угла рыскания.

В связи с этим для определения ориентации внутри помещений был разработан модуль *Visual Compass*. Данные об ориентации извлекаются из изображений, снятых движущейся монокамерой, входящей в состав навигационной системы. При навигации внутри помещений можно использовать факт наличия в зданиях множества элементов с перпендикулярными или параллельными краями, таких как стены, двери или окна. Их геометрическое расположение анализируется при помощи концепции точек и линий схождения – виртуальных пересечений краев и плоскостей на изображении. Точки и линии схождения автоматически выявляются и отслеживаются на изображениях монокамеры с помощью технологий компьютерного зрения [3]. Если они наблюдаются более чем в одном изображении последовательности видеок кадров, то по ним рассчитывается информация об изменении ориентации, используемая для решения задачи навигации.

В дополнение к модулю *Visual Compass* используется второй вспомогательный метод – периодические коррекции местоположения за счет распознавания места по изображениям, которые сохраняются в базе данных и распознаются при повторном посещении данного места. Это позволяет обнаруживать пройденные места и корректировать погрешности определения местоположения. База данных имеет небольшой объем и передается от одного пользователя к другому, так что вновь прибывающие группы могут пользоваться данными о местоположении сразу же с момента прибытия на место действия.

Комплексирование данных позволяет оптимальным образом объединить все имеющиеся измерения в многосенсорной системе. Использование датчиков с различными свойствами обеспечивает высокую точность и робастность измерений даже при применении недорогих блоков, так как датчики взаимно компенсируют недостатки друг друга. Временный отказ одного из датчиков не приводит к сбою всей системы, потому что механизм комплексирования учитывает наличие данных от других датчиков. Это чрезвычайно важно в противопожарных и спасательных операциях, когда из-за дыма или темноты видимость может быть ограничена. В таких условиях инерциальные датчики в течение нескольких минут автономной работы обеспечивают достаточную точность навигации.

Новизна предлагаемой навигационной системы заключается в использовании комбинации двух ИИМ и в применяемом способе их интегрирования с системой обработки видео. Размещение одного ИИМ на ноге, а второго вместе с дополнительными датчиками на торсе человека обеспечивает робастную и точную навигацию, – это дает возможность применять коррекцию по нулевой скорости и одновременно отслеживать движения датчиков. Уникальный метод объединения данных ориентации, полученных по точкам и линиям схождения, с позиционными измерениями, полученными методом узнавания места, обеспечивает долговременную точную навигацию внутри помещений и создание карты места действия.

Статья построена следующим образом: сначала описана экспериментальная платформа *IndoorGuide* и инерциальная подсистема, состоящая из двух ИИМ на микромеханических датчиках. Затем представлены два вспомогательных метода определения ориентации и местоположения по изображениям. После этого кратко излагаются алгоритмы совместной обработки данных разных датчиков и проводится их анализ на основе экспериментальных данных. В конце статьи приводятся выводы.

Многосенсорная индивидуальная навигационная система *IndoorGuide*

В качестве экспериментальной платформы для разработки и испытаний алгоритма в Институте оптимизации систем (г. Карлсруэ, Германия) была разработана многосенсорная индивидуальная навигационная система *IndoorGuide* (рис. 1). Система состоит из располагаемого на торсе человека блока с датчиками внешней информации и микромеханическим ИИМ, который отслеживает динамические движения этого блока (далее ИИМ 1). Для навигации и картографирования могут использоваться различные датчики в зависимости от сценариев применения системы. В комплектацию нательного блока *IndoorGuide* входит вращающийся лазерный сканер Hokuyo URG-04LX и монокулярная камера с разрешением 1280×768 пикселей. ИИМ включает гироскопы ADIS16255 производства Analog Devices и акселерометры SCA3000 производства VTI Technology.

Вторая часть системы – расположенный на ноге блок, содержащий второй ИИМ, который обеспечивает получение подробных данных о движении ноги. Это помогает обеспечить лучшее навигационное решение за счет использования дополнительных знаний о динамике человеческого шага (об этом подробнее в следующем разделе). В настоящее время в качестве устанавливаемого на ноге блока используется микромеханический ИИМ (далее ИИМ2) потребительского класса точности ADIS16355 производства Analog Devices.



Рис. 1. Многосенсорная индивидуальная навигационная система *IndoorGuide*, включающая блок на торсе человека (ИИМ 1 - слева) и на ноге (ИИМ 2 - справа)

Кроме того, в навигационной системе также установлены дополнительные датчики. Баровысотометр определяет вертикальные изменения положения и обеспечивает достаточные разрешение и точность, чтобы обнаружить переход человека на другой этаж здания. Магнитометр измеряет направление вектора магнитного поля Земли, наличие которого позволяет оценить трехмерную ориентацию пользователя. Однако, как было сказано выше, данному методу свойственны погрешности, возникающие вследствие помех от магнитных полей, производимых металлическими конструкциями и проводниками внутри здания. Дополняют описанную выше двухмодульную комплектацию системы электронный компас разработки компании PNI и барометр MPX4115A Freescale, установленные в блоке на торсе человека.

Инерциальная навигация с использованием двухмодульной системы

На основе измерений ИИМ 1 осуществляется процесс пешеходного счисления за счет коррекций по длине шага (Step Length Updates –SLUs) [4]. Последний рассчитывается на основе данных об ускорении и частоте шагов с помощью эвристической формулы, содержащей несколько параметров, калибруемых для каждого пользователя в тестовых запусках.

Обычно движение ног при шаге состоит из последовательности движений и остановок. На этапе остановки, который используется для повышения качества навигационного решения, имеет место несколько физических ограничений степеней свободы движения. Коррекции по нулевой скорости проводятся в фильтре Калмана всякий раз, когда нога ступает на землю [1, 2]. Этот момент можно определить, проанализировав измерения акселерометра. Коррекции по нулевой скорости не только сбрасывают оценки скорости до реального нулевого значения, но также помогают оценить смещения нуля датчиков, что, в конечном счете, снижает ошибку определения местоположения и ориентации. Поскольку движения туловища и ног очень разные, непарные, невозможно напрямую объединить решения от двух модулей. Анализ походки показывает, что есть один момент, когда оба датчика согласованы по вертикали. Этот момент идентифицируется при помощи алгоритма обнаружения шага, и в навигационный фильтр ИИМ 1 подается трехмерная коррекция положения.

Если датчик установлен на правой ноге, коррекция проводится на каждом шаге правой ноги в точно определенное время. Результаты экспериментов показывают, что использование вышеописанных коррекций по длине шага также и при шагах левой ноги способствуют дополнительному сокращению дрейфа на-

вигационного решения, выработанного ИИМ 1. Измерения инерциальных датчиков, барометра и магнитометра обрабатываются с помощью набора навигационных фильтров [5]. На рис. 2 показана схема прохождения сигналов между фильтрами Калмана, обрабатывающими измерения двух ИИМ, и фильтром ориентации для контроля измерений магнитного поля с использованием данных гироскопов.

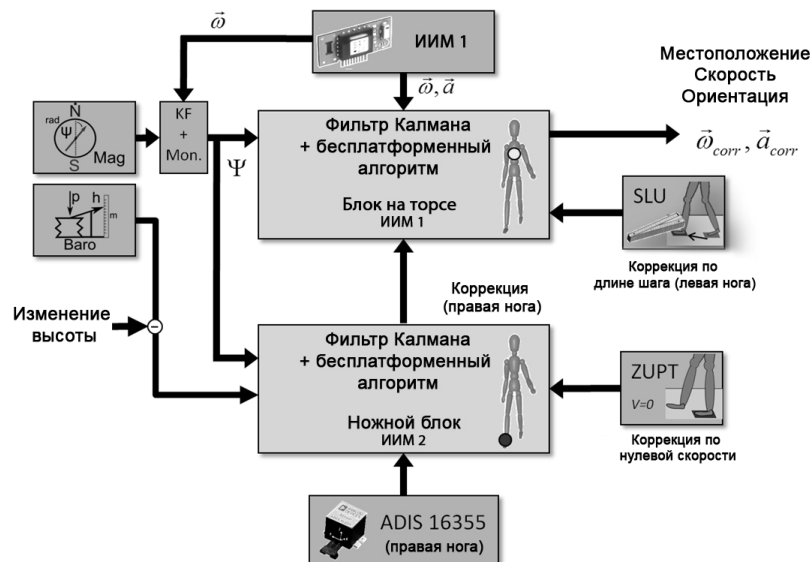


Рис. 2. Блок-схема двухмодульной системы
(Mag-магнитометр, Baro-баровысотометр, KF+Mon.– фильтр Калмана+монокулярная камера, SLU (Step length update) – коррекция по длине шага)

Результаты нескольких тестовых запусков с использованием двух ИИМ, барометра и магнитометра показаны на рис. 3. Карта здания дана для наглядности, никаких вспомогательных видео- или лазерных средств не использовалось. Точность системы была лучше двух метров при проходе по офисному зданию в течение 90 с. Такие результаты типичны для системы и демонстрируют ухудшение точности под влиянием магнитного поля, особенно в двух больших комнатах с восточной стороны, где расположено несколько компьютерных экранов.

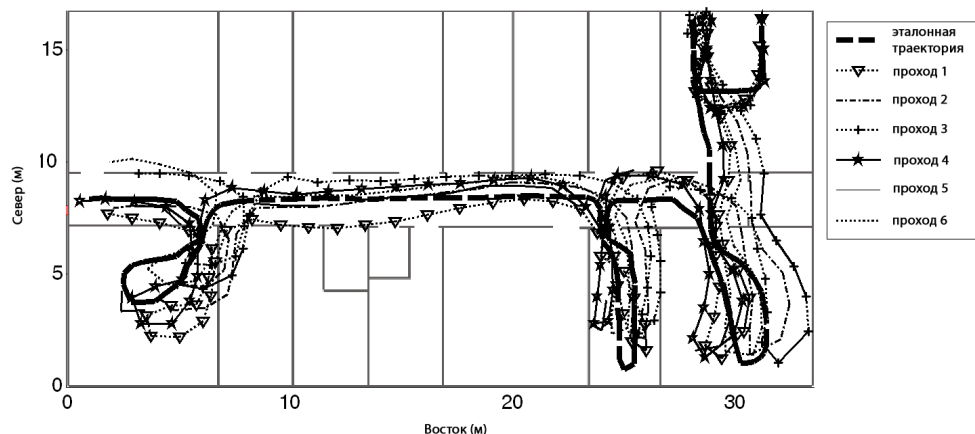


Рис. 3. Траектории нескольких тестовых запусков, выработанные двухмодульной подсистемой

Определение ориентации с помощью видеометодов

Вследствие несовершенства инерциальных датчиков и искажений из-за магнитных полей внутри зданий могут появляться ошибки в решении задачи ориентации. В бесплатформенных инерциальных навигационных системах типа *IndoorGuide* это приводит к росту погрешности местоположения. Снизить эти ошибки можно с помощью изображений монокулярной камеры, установленной в ИИМ 1 *IndoorGuide*. За счет использования пространственных ограничений внутри здания данные об ориентации определяются по видеоизображениям и применяются для решения задачи навигации [3]. Поскольку дрейф двухмодульной подсистемы сравнительно мал, даже периодических коррекций ориентации бывает достаточно.

В зданиях присутствует множество элементов с перпендикулярными или параллельными краями типа стен, дверей или окон. В рассматриваемом подходе их геометрическое соотношение анализируется при помощи концепции точек и линий схождения. *Точки схождения* представляют собой виртуальные точки пересечения краев. *Линии схождения* – линии пересечения плоскостей. При движении камеры происходит изменение конфигурации проецированных краев на изображении, по которому определяется изменение ориентации камеры.

Во многих других алгоритмах видеонавигации используются точечные объекты на изображениях. Однако такие подходы малоэффективны, особенно в длинных коридорах и комнатах, где содержится мало объектов, так как полученные структуры изображений обычно содержат большие однородные области и не позволяют успешно обнаруживать и отслеживать достаточное количество точечных объектов. Напротив, линейные объекты, отражающие основные элементы зданий – стены, двери и окна, – обычно бывают хорошо видны, поэтому предпочтительно использовать линейные, а не точечные методы.

На рис. 4 представлены типичные изображения, получаемые при испытании в помещении. Оператор может видеть, что извлеченные отфильтрованные линейные фрагменты на изображении представляют собой параллельные края в трехмерном пространстве. Группа линейных фрагментов пересекается в точке, отмеченной крестиком в центре изображения, которая называется центральной точкой схождения (ЦТС). Линия схождения, которая содержит ЦТС и параллельна горизонтальным линейным фрагментам, показана пунктирной линией. Линия схождения представляет собой искусственный горизонт.

Точки и линии схождения определяются на изображении автоматически, с использованием методов компьютерного зрения. Края выявляются при помощи программы Connected Components [7], которая является лучшей с точки зрения сочетания точности и скорости решения. Для определения точек схождения некоторые авторы предлагают метод согласования случайных выборок (Random Sample Consensus, RANSAC) [8]. Другой вариант – использование метода максимизации-ожидания (Expectation Maximization) [11–13], требующего большого объема вычислений. Этот метод может заменить или дополнить метод RANSAC [14]. Можно показать, что для особого случая навигации внутри помещений применение пространственных ограничений позволяет минимизировать время вычислений, требующееся для оценки точек схождения [5]. В частности, можно избежать применения метода максимизации – ожидания, что снижает вычислительные затраты и позволяет производить обработку данных в реальном времени.

При следовании по коридору легко определяются соответствующие ЦТС в последовательных изображениях. По положениям ЦТС на изображениях и по наклону линий схождения можно определить изменение ориентации камеры. Поскольку камера жестко закреплена на ИИМ 1 системы *IndoorGuide*, так же определяется и изменение ориентации ИИМ.



Рис. 4. Два изображения с реального испытательного запуска: извлеченные линейные фрагменты, $\vec{\omega}_{corr}$ расчетная ЦТС и расчетная линия схождения. Из координат ЦТС и наклона линии схождения выводится изменение трехмерной ориентации: углы крена, дифферента и рыскания

Экспериментально доказано, что применение видеокоррекции параметров ориентации значительно улучшает точность оценок местоположения и ориентации. Результаты испытательного запуска представлены на двухмерном графике местоположения (рис. 5).

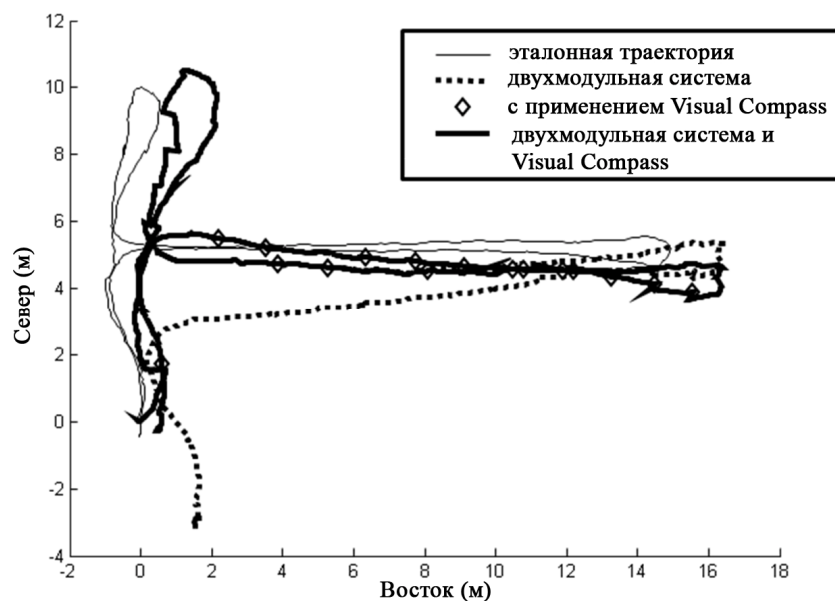


Рис. 5. Двухмерная оценка местоположения, выработанная двухмодульной навигационной системой с использованием *Visual Compass* для определения ориентации и без него. Маркерами $\diamond$ показаны моменты коррекции ориентации

Перед испытанием проводилась калибровка внутренних параметров камеры и определялась относительная ориентация камеры и ИИМ 1. Тестовый запуск длился около 70 с и проходил в офисном помещении. Пунктирной линией показано навигационное решение, рассчитанное двухмодульной системой в реальном времени. В процессе видеонавигации обрабатывается только подгруппа изображений, что обеспечивает частоту смены кадров на уровне 1 Гц. Эталонная ориентация для последующего видеоопределения ориентации определяется по первому видеокадру с использованием ЦТС и измерений магнитометра при помощи фильтра ориентации двухмодульной системы, описанного выше. В последующих изображениях выявляются центральные точки и линии схождения. Ориентация кадра, соответствующая наблюдаемой ЦТС, определяется на основе оценки ориентации двухмодульной подсистемы как начальное приближение. Всякий раз, когда ЦТС и линии схождения оказываются вблизи ожидаемых позиций на изображении, по ориентации камеры и известной взаимной привязке камеры и ИИМ 1 (обозначены маркерами) определяется ориентация этого модуля. Записанная оценка ориентации двухмодульной системы корректируется, после чего последующая часть траектории поворачивается соответствующим образом (сплошная линия). Видно, что дрейф инерциальной двухмодульной системы, вызванный погрешностями по углу рыскания, значительно снижен.

Благодаря разработанному алгоритму оптимизации и коррекциям ориентации, существенно снижающим уровень дрейфа, данный метод эффективен при работе в реальном времени даже на переносном оборудовании и в настоящее время реализован в навигационной системе с замкнутым контуром.

Коррекция местоположения с помощью видеометодов

Кроме описанной выше методики видеоопределения ориентации применяется и другой вспомогательный метод – использование периодических видеокоррекций местоположения, особенно для определения контуров за счет видеопознавания места (Place Recognition). Векторы-дескрипторы рассчитываются по изображениям и сохраняются в базе данных вместе с соответствующими положениями. Это позволяет распознавать ранее посещенные места и использовать эти данные для улучшения качества определения местоположения, что, как доказано, возможно и в индивидуальных навигационных системах [15–17]. Так как вычислительные ресурсы разрабатываемого переносного оборудования ограничены, используются небольшие базы данных, что сокращает вычислительные затраты в процессе обучения. Применения меньшей базы данных для покрытия места действия определение местоположения возможно не везде. Однако это не приводит к росту погрешностей навигационного решения, так как в периоды между двумя коррекциями навигация обеспечивается двухмодульной подсистемой *IndoorGuide*.

В процессе обучения дескрипторы локальных объектов извлекаются из множества изображений камеры. В нашем случае мы получали векторы-дескрипторы с использованием алгоритмов Speeded-Up Robust Features (SURF), Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) и Harris-SIFT [18–20]. На этапе иерархической группировки выбирается подгруппа векторов представительных дескрипторов (т. н. *слов*), которые формируют словарь (термины происходят из исходной теории классификации документов) [21]. Дескрипторы всех обнаружен-

ных изображений должны быть выражены в виде слов в словаре. В нашем подходе мы определяем соответствующее слово в словаре для каждого дескриптора и подсчитываем, сколько раз это слово встречается в каждом изображении, что соответствует методу вычисления весовых коэффициентов по частоте термина – Term Frequency [22]. Полученные данные сохраняются для каждого изображения вместе с соответствующим местоположением.

При перемещении по зданию камера снимает изображения и происходит извлечение дескрипторов. Определяются и подсчитываются соответствующие слова из словаря, что позволяет провести быстрое сравнение с базой данных и определить, не было ли это место уже пройдено ранее. Следует отметить, что в базе данных содержатся не сами изображения, а только векторы-дескрипторы, выведенные из этих изображений. Таким образом, для хранения такой базы данных требуется незначительный объем памяти, что идеально подходит для передачи от пользователя к пользователю, как было отмечено ранее. Для начальных испытаний была создана база данных из 122 пар изображений, снятых внутри офисного здания и на улицах города. В каждой паре заснято практически одно и то же место действия с различных точек зрения и с небольшими изменениями, например с проходящими людьми. На основе этих данных проводились испытания скорости обнаружения и времени выполнения различных типов дескрипторов, размеров изображений, а также методов группировки и взвешивания.

Наилучший компромисс между качеством обнаружения и временем выполнения был получен при использовании SURF дескрипторов и метода группировки, ускоренного с помощью использования неравенства треугольника [23]. Лучшие результаты были достигнуты при использовании 128 центров групп в схеме двоичного дерева, что значительно меньше [16], и наиболее вероятно связано с меньшим количеством изображений. При такой конфигурации 109 из 122 пар совпали.

В отличие от результатов, описанных в работе [16], в наших испытаниях взвешивание частоты термина обеспечивает более высокую скорость обнаружения, чем алгоритм «частота термина–обратная частота документа» Term Frequency–Inverse Document Frequency (TF-IDF), который придает меньшие весовые коэффициенты словам, встречающимся очень часто. Возможно, это происходит благодаря тому, что в нашем подходе используется меньшее количество центров групп и тому, что изображения, снятые в офисном помещении, очень схожи, поэтому многие слова встречаются в каждом документе и практически игнорируются при использовании алгоритма TF-IDF. В целом влияние метода взвешивания на скорость обнаружения очень сильно меняется при различных наборах данных, как показано в работе [22].

Пользуясь этими данными, были проведены экспериментальные запуски системы *IndoorGuide*. В процессе изучения в течение нескольких минут собирались изображения на разных этажах офисного здания. Был применен метод лазерной локализации, обеспечивающий точное знание местоположения для каждого изображения – такая функция также предусмотрена в системе, но не описана в данной статье [24]. Из 498 изображений в течение 56 с было извлечено 90 000 SURF-дескрипторов. Создание базы данных с использованием неоптимизированного кода Matlab заняло 28 с.

В последующих запусках база данных использовалась для видеоопределения местоположения двухмодульной подсистемы. Пример результатов испыта-

ний приведен на рис. 6. Пунктирной кривой обозначено решение, выработанное двухмодульной системой. Затем применялся описанный выше метод узнавания места, где оценка местоположения, рассчитанная двухмодульной системой, используется для отбраковки очевидно неправильных совпадений. Окончательное решение представляет собой комбинацию оценки двухмодульной системы и видеокоррекций местоположения.

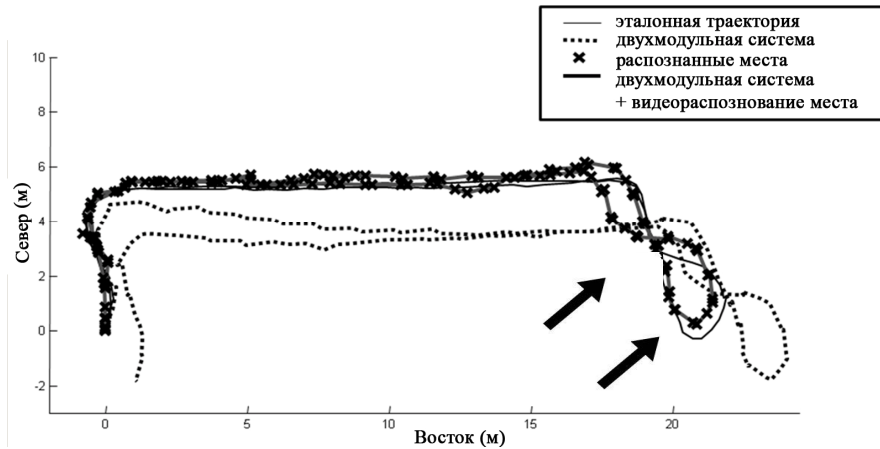


Рис. 6. Результат испытательного запуска двухмодульной системы. Используются периодические видеокоррекции местоположения с применением данных, собранных при предыдущем запуске. Область, отмеченная двумя стрелками, исследуется впервые; она не покрывается базой данных, и видеокоррекции невозможны. Однако этот интервал можно компенсировать за счет использования двухмодульной подсистемы:

— эталонное решение; решение, выработанное двухмодульной системой;
 X – узнаваемые места, – решение, выработанное двухмодульной системой + видеораспознавание места; north, east – север, восток

Оценка местоположения в данном предварительном испытании рассчитывается ступенчато с помощью простого метода комплексирования данных: пройденные расстояния, измеренные двухмодульной системой, добавляются в направлении последнего местоположения, определенного по видеоданным. Это приводит к тому, что текущая оценка местоположения перемещается по направлению к месту, где было получено совпадающее изображение для базы данных, что ограничивает максимальную погрешность местоположения и таким образом ликвидирует дрейф. Однако положение, с которого получено изображение, в общем случае не то же самое, что истинное текущее положение, и это вносит новые погрешности. Тем не менее в наших испытаниях отклонение оказалось достаточно малым. Таким образом, распознавание места оказывает положительное влияние на точность оценивания, так как гарантирует ограничение долговременных погрешностей.

Периодически, в зависимости от внешних условий, могут наблюдаться ложные измерения, особенно если наблюдаемое в данный момент место действия выглядит похожим на другое место. Такие ложные совпадения исключаются при помощи селекции положений, т. е. распознанное место отбраковывается, если оно находится вне области допустимых значений вокруг текущего расчетного местоположения.

Для сравнения, на рис. 6 тонкой линией показана точная оценка, выработанная с помощью лазерной системы. Если видеокоррекции недоступны, используется только решение двухмодульной системы – наклонный участок траектории

за поворотной точкой на рис. 6, показанный двумя стрелками. Чтобы проверить работу системы *IndoorGuide* в отсутствии видеоданных, этот участок специально был пропущен во время прохода. Видно, что погрешность местоположения незначительно растет, но снижается по мере проведения коррекций.

Когда доступна база данных дескрипторов, извлечение дескрипторов из прямого изображения и определение соответствующего положения в базе данных занимает менее 200 мс. Таким образом, процесс может осуществляться в реальном времени.

Комплексирование данных

Как было показано, измерения ориентации и местоположения с помощью видеокамеры могут быть использованы для выработки навигационного решения. Теперь стоит задача оптимальным образом их объединить. Для этого реализуем и сравним два подхода: на основе фильтра Калмана (ФК) и робастной оптимизации с использованием графов.

В первом подходе используется ФК с 15-мерным вектором состояния [25, 26]. Скорректированные угловые скорости и линейные ускорения $\vec{a}_{corr}$ от ИИМ 1, несущие информацию о коррекциях по нулевой скорости и длине шага, обрабатываются как известные входные данные. Вектор состояния ФК $\Delta \vec{x} = (\Delta \vec{p} \quad \Delta \vec{v} \quad \Delta \vec{\psi} \quad \Delta \vec{b}_a \quad \Delta \vec{b}_\omega)^T$ содержит погрешности местоположения $\Delta \vec{p}$, скорости $\Delta \vec{v}$, ориентации $\Delta \vec{\psi}$, смещения нулей акселерометров $\Delta \vec{b}_a$ и гироскопов $\Delta \vec{b}_\omega$ для ИИМ 1 на торсе человека. Если доступны видеоизмерения ориентации и местоположения, в ФК выполняются коррекции соответствующих погрешностей.

Уравнение измерения для коррекции положения:

$$\tilde{\vec{p}}_{PR} - \hat{\vec{p}} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 12} \end{bmatrix} \Delta \vec{x} + \vec{n},$$

где $\hat{\vec{p}}$ – текущая оценка положения, $\tilde{\vec{p}}_{PR}$ – положение, выработанное модулем распознавания положения и $\vec{n}$ – помехи.

Модуль *Visual Compass* обеспечивает измерения ориентации камеры относительно навигационной системы координат $\tilde{C}_c^n$. Поскольку камера жестко закреплена, известен угол поворота камеры относительно корпусной системы координат *Indoor Guide* C_b^c . Используя текущую оценку ориентации *Indoor Guide* $\hat{C}_b^n$, можно преобразовать матрицу поворота углов рассогласования $\tilde{C}_c^n C_b^c (\hat{C}_b^n)^T$ в углы Эйлера $\Delta \tilde{\psi} = (\tilde{\alpha} \quad \tilde{\beta} \quad \tilde{\gamma})^T$ и обработать их с помощью уравнения коррекции $\Delta \tilde{\psi} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 6} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \end{bmatrix} \Delta \vec{x} + \vec{n}$.

Экспериментальная проверка этого подхода показала, что в некоторых случаях большие смещения нуля и помехи ИИМ 1 приводят к неправильной оценке погрешности скорости $\Delta \vec{v}$, что вызывает быстро растущее отклонение значений местоположения. Поэтому был реализован ФК с сокращенным вектором состояния $\vec{x} = (\Delta \vec{p} \quad \Delta \vec{\psi} \quad \Delta \vec{b}_\omega)^T$:

$$\begin{pmatrix} \Delta \vec{p} \\ \Delta \vec{\psi} \\ \Delta \vec{b}_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\hat{C}_b^n \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \vec{p} \\ \Delta \vec{\psi} \\ \Delta \vec{b}_\omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & \hat{C}_b^n & 0 \\ 0 & 0 & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{n}_p \\ \vec{n}_\omega \\ \vec{n}_{b\omega} \end{pmatrix}.$$

В такой редуцированной модели погрешности местоположения и ориентации разделены, что не совсем удачно в связи с тем, что измерения местоположения не могут улучшить оценку ориентации. Простота модели обуславливает необходимость добавления шумовой составляющей $\vec{n}_p$. Преимущество фильтра заключается в том, что он отслеживает оценку изменения местоположения на основе коррекций по нулевой скорости и по длине шага по информации от расположенного на ноге ИИМ 2, который в данный момент обеспечивает большую точность местоположения, чем ИИМ 1 на торсе. Как и ранее, обрабатываются видеоизмерения местоположения и ориентации. Чтобы объединить преимущества моделей обеих систем, разработан адаптивный ФК, который переключается на нужную модель на основе анализа величины дисперсии погрешности скорости $\Delta \vec{v}$. Если дисперсия больше порогового значения, то выработанное значение скорости неточное, и используется сокращенная модель.

На рис. 7 показан пример такого комплексирования данных в сравнении с более точным эталонным результатом, полученным на основе лазерных измерений. Пользователь, на котором была установлена система, проходил по офисному зданию и возвращался к стартовой точке.



Рис. 7. Пройденная траектория и оценка, выработанная с помощью адаптивного ФК, который обрабатывает видеоизмерения местоположения и ориентации

Обработка данных неоптимизированным кодом Matlab заняла 52,6 с, что меньше, чем продолжительность прохода – 75,6 с, т.е. метод может работать в реальном времени. Карта здания дана для наглядности. Видно, что результат комплексирования ближе к эталонной траектории, чем автономное решение двухмодульной системы. Среднее двумерное отклонение от очень точного эталонного решения, полученного с помощью лазерного измерителя, составляет

1,35 м (автономное решение) и 0,63 м (решение с помощью видеометодов) (см. табл. в конце статьи). Как описано выше, используется база данных дескрипторов, поэтому во время прохода (кроме восточного отсека) осуществляется распознавание места. В реальных операциях база данных создается другими пользователями или разведывательными группами. Там, где возможно распознавание места, расчетное местоположение смещается к узнаваемым местам. Ложные совпадения в комнатах, расположенных севернее пройденной траектории, отбраковываются за счет селекции положений.

Хотя комплексирование данных с помощью ФК улучшает точность навигационного решения, результат все же не является оптимальным, так как невозможно изменить результат идентификации данных после проведения коррекций, даже если доступны новые данные. Другими словами, если в модуле распознавания принято неверное решение о совпадении или отбраковке изображений, впоследствии изменить это решение невозможно. При обследовании новых областей для создания карт чрезвычайно важно отклонить ложные совпадения. Поэтому исследуется другой метод комплексирования – Graphical SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) на основе численной оптимизации на структуре графа [27], который дает такую возможность. Этот метод успешно применен в модуле лазерной локализации и картографирования в системе *IndoorGuide* [24].

В этом методе все измерения и все расчетные траектории представлены в виде узлов растущего графа (рис. 8). Узлы местоположения обозначают оцениваемую траекторию, другие узлы – измерения двухмодульной и видеоподсистем.

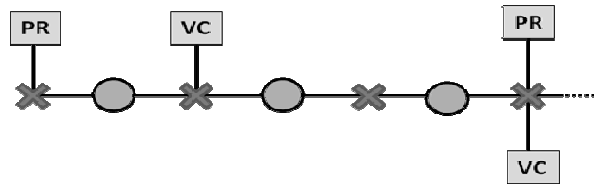


Рис. 8. Пример структуры графа, который содержит сведения о траектории и измерениях двухмодульной и видеоподсистем:

X-узел местоположения; O – дельта-узел, выработанный двухмодульной системой; PR-узел, выработанный модулем распознавания места; VC – узел, выработанный модулем *Visual Compass*

Навигационное решение, выдаваемое двухмодульной системой, разлагается на приращения местоположения и ориентации, которые представлены на графе в виде дельта-узлов двухмодульной системы. Каждый узел вносит вклад в определяемую на графе штрафную функцию, которая представляет собой отрицательное значение логарифма правдоподобия для измерения. Значение штрафной функции мало, если оценка траектории соответствует реальным измерениям. Оптимальное решение вырабатывается с помощью численной оптимизации. Оптимизация графа – *релаксация* – выполняется итеративно и происходит быстро, если необходимы только незначительные модификации оценки траектории. В отличие от вышеописанного метода на основе ФК, предусмотрена возможность позже добавлять или убирать измерения из графа.

В методе графической оптимизации рассматриваются только двумерные местоположения и курс, так как инерциальная подсистема обеспечивает достаточно точные оценки высоты, а также углов крена и дифферента.

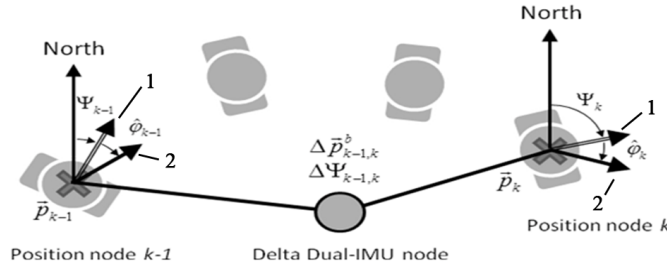


Рис. 9. Различия значений местоположения и курса, используемые в оптимизации. Ориентация местных систем координат определена направленной вперед осью x^b :

● — пользователь системы *Indoor Guide*; X — узел местоположения;

O — дельта-узел двухмодульной системы; 1 — ось акселерометра x^b по данным двухмодульной подсистемы; 2 — ось x^b по данным графической оптимизации

Штрафная функция для дельта-узлов, выработанная двухмодульной системой, поясняется с помощью примера на рис. 9. Рассмотрим узлы местоположения $k-1$ и k , соединенные дельта-узлом двухмодульной системы. Узел k — оценка двумерного положения $\hat{p}_k$ и курса $\hat{\Psi}_k = \Psi_k + \hat{\phi}_k$, который на угол $\hat{\phi}_k$ отличается от курса Ψ_k , выработанного двухмодульной системой. Если исключить влияние других узлов, изменение угла курса между узлами $k-1$ и k выработанной оценки должно равняться изменению, наблюдаемому инерциальной подсистемой: $\hat{\Psi}_k - \hat{\Psi}_{k-1} = \Psi_k - \Psi_{k-1}$. Подстановка $\hat{\Psi}$ приводит к условию $\hat{\phi}_k - \hat{\phi}_{k-1} = 0$.

Измеренное изменение положения $\Delta \bar{p}_{k-1,k}^b$ выражается в корпусной системе координат инерциальной подсистемы в узле $k-1$. С учетом поправки угла курса $\hat{\phi}_{k-1}$, ожидаемое изменение положения $\Delta \bar{p}_{k-1,k} = R(\hat{\phi}_{k-1}) R(\Psi_{k-1}) \Delta \bar{p}_{k-1,k}^b$ выражается в виде функции от $\hat{\phi}_{k-1}$.

$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ — матрица поворота в двух измерениях. Объединение

этих выражений дает следующую штрафную функцию:

$$E_{Dual-IMU} = \frac{1}{2} \left(\hat{p}_k - \hat{p}_{k-1} - \Delta \bar{p}_{k-1,k} \right) \begin{pmatrix} \sigma_x^{-2} & 0 \\ 0 & \sigma_y^{-2} \end{pmatrix} \left(\hat{p}_k - \hat{p}_{k-1} - \Delta \bar{p}_{k-1,k} \right)^T + \frac{1}{2\sigma_{\Psi}^2} (\hat{\phi}_k - \hat{\phi}_{k-1})^2,$$

где σ_x , σ_y и σ_{Ψ} — среднеквадратические отклонения компонентов местоположения и курса. Вклад измерения модуля узнавания места $\bar{p}_{PR}$, соединенного с узлом k , $E_{PR} = \frac{1}{2} (\hat{p}_k - \bar{p}_{PR}) R_{PR}^{-1} (\hat{p}_k - \bar{p}_{PR})^T$, где R_{PR} — ковариация измерения.

Измеренное значение ориентации $\tilde{C}_c^n$, выработанное модулем *Visual Compass*, и измеренный курс Ψ_{VC} рассчитываются путем преобразования матрицы $\tilde{C}_c^n C_b^c$ в углы Эйлера, где C_b^c известно (см. выше). Отклонение оценки от измерения составляет $\hat{\Psi}_k - \Psi_{VC} = \Psi_k + \hat{\phi}_k - \Psi_{VC}$. Это дает штрафную функцию

$$E_{VC} = \frac{1}{2\sigma_{VC}^2} (\Psi_k + \hat{\phi}_k - \Psi_{VC})^2, \text{ где } \sigma_{VC} - \text{среднеквадратическое отклонение}$$

измерения.

Суммарная штрафная функция графа $E = \sum_k (E_{Dual-IMU} + E_{PR} + E_{VC})$ является суммой отдельных функций всех узлов графа. Минимизация этой штрафной функции обеспечивает оптимальную оценку пройденной траектории, представленной переменными $\hat{p}_k$ и $\hat{\phi}_k$ в каждом узле положения. Для численной минимизации были испробованы различные методы из пакета Matlab Optimization Toolbox и алгоритмы, описанные в работе [28]. Самое быстрое решение, обладающее достаточной точностью, было получено с помощью методов Trust-Region.

Ключевой момент процесса оценивания – верная идентификация места. Важно выявить и исключить из оценки все ложные совпадения, так как они могут привести к большим погрешностям, особенно если в процессе операции исследуются новые места. В предлагаемом методе на основе графов эта проблема решается за счет исключения мест, вклад которых в штрафную функцию больше заданного порогового значения. Последнее оценивается в ходе процессов релаксации, т.е. ложное распознавание места исключается позже, если последующие измерения показали, что была пройдена другая траектория.

Проблема оценивания еще более усложняется при исследовании незнакомых областей, так как погрешности процесса изучения новых мест зависят от погрешностей оценок соответствующих местоположений, что является классической проблемой алгоритма одновременной локализации и картографирования (SLAM). Как показали испытательные запуски, рассмотрение только лучшего совпадения, определенного модулем распознавания места, недостаточно. Чтобы улучшить идентификацию последних полученных изображений, используется алгоритм Multidimensional Assignment Algorithm (MAA) [29, 30]. Этот алгоритм не решает проблему идентификации данных отдельно для каждого узнавания места, а одновременно обрабатывает несколько последних измерений. Для каждого полученного изображения находится не только наиболее подходящее изображение из базы данных, но и k лучших совпадений, причем учитываются их геометрические расположения. Выбирается группа опознанных мест, чьи геометрические расположения друг относительно друга лучше всего соответствуют местоположениям, выработанным инерциальной системой *IndoorGuide*. Алгоритм реализован с помощью графа идентификации (association graph), которая выполнена в Matlab BGL Toolbox 31.

Как показано на рис. 10 применение этого метода на экспериментальных данных, описанных выше, обеспечило гораздо более точное решение задачи. Обработка данных неоптимизированным кодом Matlab заняла 78,5 с. Поскольку сам проход длился 75.6 с, реализация такого алгоритма комплексирования на C/C++ сможет работать в реальном времени. На обратном пути по коридору возможно проведение нескольких видеокоррекций, которые улучшают качество местоопределения. В отличие от результатов алгоритма ФК, представленных на рис. 7, на этом этапе возможна коррекция уже завершенной оценки траектории. Это чрезвычайно важно при изучении новых мест во время операции, так как пропуск этих коррекций приводит к созданию неточных и потому непригодных карт.

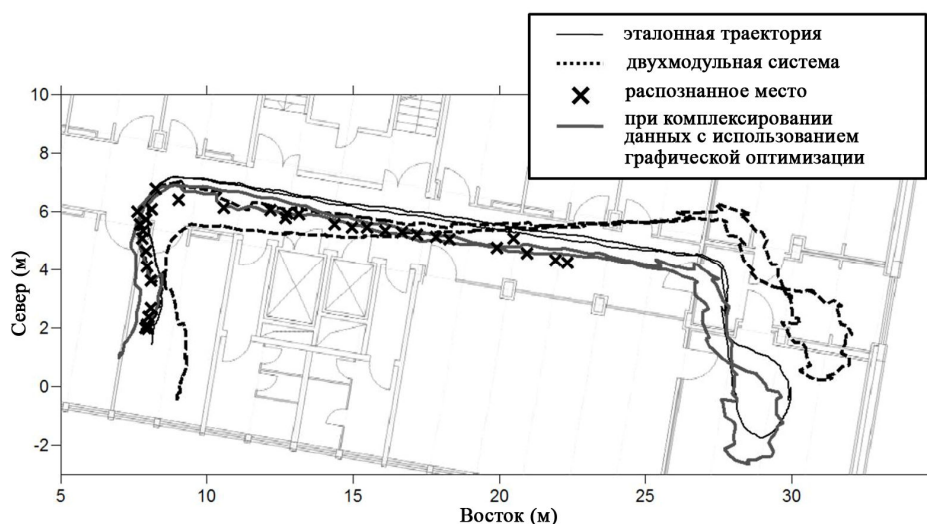


Рис. 10. Пройденная траектория и оценка, выработанная методом графической оптимизации с обработкой видеоизмерений местоположения и ориентации

Среднеквадратическое отклонение от эталонного решения составляет 0,56 м (данные одного испытательного запуска продолжительностью 75.6 с были обработаны различными методами), что является лучшим результатом, чем при использовании ФК.

Средние отклонения от эталонного решения двухмерного местоположения, полученные с использованием лазерных измерений

Метод	Среднее двухмерное отклонение, м
Автономное решение двухмодульной системы	1,35
Решение двухмодульной системы+видеометоды с использованием ФК	0,63
Решение двухмодульной системы+видеометоды с использованием графической оптимизации	0,56

Выводы

В статье представлена многосенсорная система *IndoorGuide*, обеспечивающая навигацию внутри помещений. Показано, как данные об ориентации и местоположении определяются по изображениям камеры, интегрированной в навигационную систему. Модуль *Visual Compass* вырабатывает ориентацию, используя особенности геометрических конструкций в зданиях. Метод распознавания места позволяет идентифицировать ранее посещенные места и использовать эти данные для коррекций местоположения. Такие данные идеально подходят для обмена между пользователями.

Представлены два метода комплексирования данных, строящиеся с использованием фильтра Калмана и оптимизации с использованием графов. Оба мето-

да обеспечивают обработку информации в реальном времени и улучшают качество оценки, выработанной инерциальной подсистемой, при помощи видеоизмерений ориентации и местоположения. Обработка экспериментальных данных показала, что метод на основе графов дает лучшие результаты из-за более робастного способа идентификации данных, который позволяет отбраковывать ложные совпадения на последующих этапах решения задачи. Это чрезвычайно важно в ходе картографирования ранее не обследованных областей в ходе операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Foxlin, E.**, *Pedestrian Tracking with Shoe-Mounted Inertial Sensors*, IEEE Computer Society Press, 2005, pp. 38--46.
2. **Ojeda, L. and Borenstein, J.**, Personal Dead-Reckoning System for GPS-Denied Environments, *IEEE Proceedings of the International Workshop of Safety, Security and Rescue Robotics*, Rome, 2007.
3. **Kessler, C., Ascher, C., Frietsch, N., Weinmann, M. and Trommer, G.F.**, Vision-Based Attitude Estimation for Indoor Navigation Using Vanishing Points and Lines, *IEEE / ION PLANS 2010 Conf.*, 2010.
4. **Shin, S.H., et al.** Adaptive Step Length Estimation Algorithm Using Low-Cost MEMS Inertial Sensors, *SAS 2007 IEEE Sensors Applications Symposium*, San Diego, CA, 2007.
5. **Ascher, C., Kessler, C., Wankerl, M., and Trommer, G. F.**, Combining Laser Range Measurements and a Dual-IMU IPNS for Precise Indoor SLAM, *Symposium Gyro Technology 2009*, Karlsruhe, Germany.
6. **Wildenauer, H. and Vince, M.**, Vanishing Point Detection in Complex Manmade Worlds, *ICIAP '07: Proc. 14th Int. Conf. on Image Analysis and Processing*, 2007, pp. 615--622.
7. Kosecka, J. and Zhang, W., Video Compass, *ECCV '02: Proc. 7th European Conf. on Computer Vision*, Part IV, 2002, pp. 476--490.
8. Fischler, M. A. and Bolles, R. C., Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the Association for Computing Machinery*, 1981, no. 6, , pp. 381--395.
9. **Pflugfelder, R. and Bischof, H.**, Online Auto-Calibration in Man-Made Worlds, *DICTA '05: Proc. Digital Image Computing: Techniques and Applications*, 2005, pp. 519--526.
10. **Wildenauer, H. and Vince, M.**, Vanishing Point Detection in Complex Man-Made Worlds, *ICIAP '07: Proc. 14th Int. Conf. on Image Analysis and Processing*, 2007, pp. 615--622.
11. **Dempster, A.P., Laird, N.M., and Rubin, D.B.**, Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm, *J. of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 1977, no. 39, pp. 1-38.
12. **McLachlan, G.J. and Krishnan, T.**, *The EM Algorithm and Extensions*, New York, Toronto, Weinheim: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
13. **Bishop, C. M.**, *Pattern Recognition and Machine Learning*, New York: Springer, 2006.
14. **Aguilera, D., Gomes-Lahoz, J., and Finat, J.**, A new Method for Vanishing Points Detection in 3D Reconstruction from a Single View, in *The International Archives of Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences: Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures*, 2005, no. 26.
15. **Botterill, T., Mills, S., and Green, R.**, Speeded-up Bag-of-Words Algorithm for Robot Localisation Through Scene Recognition, in *Image and Vision Computing*, New Zealand, 2008.
16. **Hide, C., Botterill, T., and Andreotti, M.**, An Integrated IMU, GNSS and Image Recognition Sensor for Pedestrian Navigation, *Proc. of the Institute of Navigation GNSS Conf.*, 2009.
17. **Hide, C. and Botterill, T.**, Development of an Integrated IMU, Image Recognition and Orientation Sensor for Pedestrian Navigation, *Proc. of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2010.
18. **Bay, H., Tuytelaars, T., and Van Gool, L.**, Surf: Speeded-up robust features, *Computer Vision ECCV*, 2006, vol. 3951, pp. 404--417.
19. **Lowe, D.G.**, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. J. of Computer Vision*, 2004, vol. 60, pp. 91--110.

20. **Azad, P., Asfour, T., and Dillmann, R.,** Combining Harris Interest Points and the SIFT Descriptor for Fast Scale-Invariant Object Recognition, *Proc. 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2009.
21. **Bi, Y., Murtagh, F., and McClean, S.,** Text Passage Classification Using Supervised Learning, *Proc. of the workshop on logical and uncertainty models for information systems*, 1999, pp. 22--35.
22. **Tirilly, P., Claveau, V., and Gros, P.,** Distances and Weighting Schemes for Bag of Visual Words Image Retrieval, *Proc. Int. Conf. on Multimedia information retrieval*, 2010, pp. 323--332.
23. **Elkan, C.,** Using the Triangle Inequality to Accelerate k-Means, *Proc. of the Twentieth Int. Conf. on Machine Learning*, 2003, pp. 147--153.
24. **Kessler, C., Ascher, C., Crocoll, P., and Trommer, G.F.,** A Laser-Based Localization and Mapping System for Pedestrian Indoor Navigation With Loop-Detection Capabilities, *Proc. National Navigation Conf. NAV 10*, The Royal Institute of Navigation, 2010.
25. **Wendel J.,** *Integrierte Navigationssysteme*, Oldenbourg Verlag, 2007.
26. **Jimenez, A.R., Seco, F., Prieto, J.C., and Guevara, J.,** Indoor Pedestrian Navigation using a INS/EKF Framework for Yaw Drift Reduction and a Foot-mounted IMU, *Workshop on Positioning, Navigation and Communication*, 2010.
27. **Folkesson, J. and Christensen, H.,** Graphical SLAM-A Self Correcting Map, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2004, pp 383--390.
28. **Ulbrich S., TU München,** Germany, <http://www-m1.ma.tum.de/m1old/personen/sulbrich/opt3/codes.html>
29. **Capponi, A. and De Waard, H.W.,** An Efficient Approach to Decompose the Multidimensional Assignment Problem, *Fusion 2004: Seventh Int. Conf. on Information Fusion*, Sweden, 2004.
30. **Chummun, M.R., Kirubarajan, T., Pattipati, K.R., and Bar-Shlom, Y.,** Fast Data Association Using Multidimensional Assignment with Clustering, *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, 2001, no. 37(3), pp. 898--913.
31. **Gleich, D.,** Matlab BGL Toolbox, http://www.stanford.edu/~dgleich/programs/matlab_bgl/

Abstract. In many indoor security and rescue missions, it is essential for the deployed personnel to have accurate positioning information available. If the scene is not explored yet, a map has to be created during the mission and exchanged between different teams, so that subsequent intruders benefit from the knowledge about previously visited locations. In this paper, the multi-sensor navigation system called IndoorGuide is presented which accomplishes this task. It comprises two lightweight micro-electro-mechanical inertial measurement units for tracking the motion of the user. A monocular camera is integrated in the navigation system which provides attitude and position aiding. The attitude information is extracted by tracking vanishing points in the images of the camera. Position aiding is realized by mapping and recognizing visited locations. For the data fusion, a Kalman Filter and a robust optimization technique based on graphs are compared. Results from experimental test runs are presented and discussed.

Key words: Multi-Sensor Navigation System, Indoor Navigation, Vision-Aided Navigation.