

УДК 004.896

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА В ПРОСТРАНСТВЕ

***Жуков Р.В.**, студент
кафедры «Системы обработки информации и управления»,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Гапанюк Ю.Е., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
chernen@bmstu.ru*

Введение

Последние 20 лет индустрия роботостроения испытывает небывалый подъем, который вызван появлением новых и развитием старых технологий и алгоритмов, которые позволили удешевить производство роботов и наделить их широким спектром возможных действий. Одним из широко распространённых видов роботов являются мобильные роботы, способные свободно перемещаться в пространстве, в том числе автономно, как, например, марсоход Curiosity. Однако для этого им необходимо получать информацию об окружающем мире и данные о собственном положении в нем, для чего применяется множество методов, в том числе одометрия – использование показаний с различных типов датчиков для оценки перемещения объекта в пространстве.

В настоящее время наиболее распространены следующие 4 подхода к оценке перемещения:

- Использование энкодеров;
- Использование инерциальных измерительных приборов;
- Визуальная одометрия;
- Отслеживание перемещения с помощью GPS или ГЛОНАСС.

Однако каждый из этих подходов обладает существенными недостатками и ограничениями, что, зачастую, приводит к невозможности его использования в определенных условиях.

Постановка задачи

Целью данной работы является детальное рассмотрение вышеперечисленных подходов к реализации одометрии, а так же формулирование рекомендаций по их использованию в разных ситуациях как по отдельности, так и в комбинации друг с другом для компенсации недостатков каждой из них.

Использование энкодеров

Стандартной схемой реализации одометрии является использование энкодеров (датчиков угла поворота) – устройств, предназначенных для преобразования угла поворота вращающегося объекта в электрические сигналы и позволяющих определить угол его поворота [9].

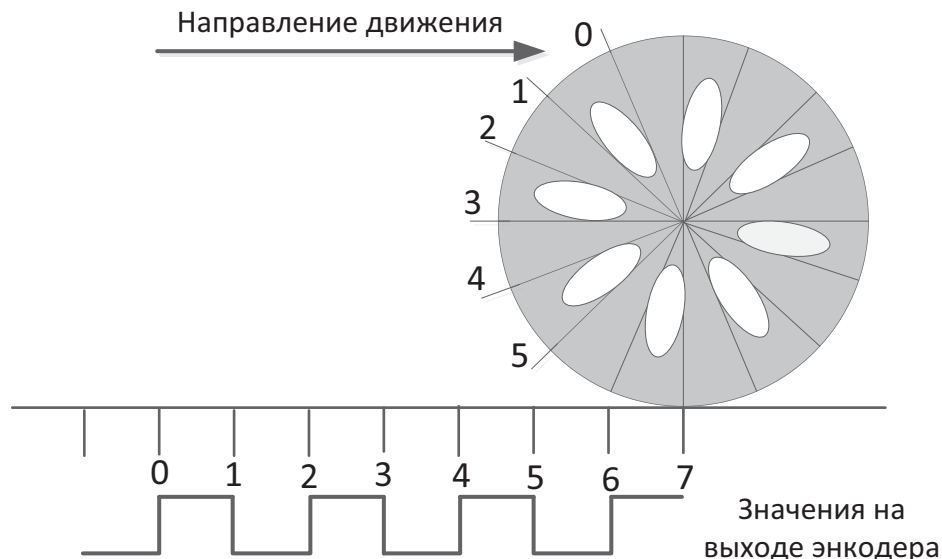


Рис. 1. Схема работы энкодера

Используя разные типы энкодеров, можно добиться отслеживания не только угла, но и направления вращения (например — используя коды Грея).

Таким образом, зная диаметр колес и используя данные с энкодеров, можно легко высчитать пройденное этим колесом расстояние по формуле:

$$L = \pi * D * \frac{n}{N}$$

, где L — итоговое пройденное расстояние (за заданный промежуток времени), n — суммарное число отсчётов энкодера (за заданный промежуток времени), N — число отсчётов энкодера за один оборот колеса, D — диаметр колеса.

При реализации подвижной платформы с двумя независимыми двигателями возможно использовать следующие расчеты для оценки её положения:

$$C(t_1) = C(t_0) + \frac{D_r - D_l}{W} \text{ [рад]}$$

$D(t_0, t_1) = \frac{D_r + D_l}{2}$, где $O(t)$ — положение робота в момент времени t , D_r — расстояние, пройденное правым колесом робота, D_l — расстояние, пройденное левым колесом робота, W — ширина робота, $D(t_0, t_1)$ — расстояние пройденное за промежуток времени $[t_0, t_1]$.

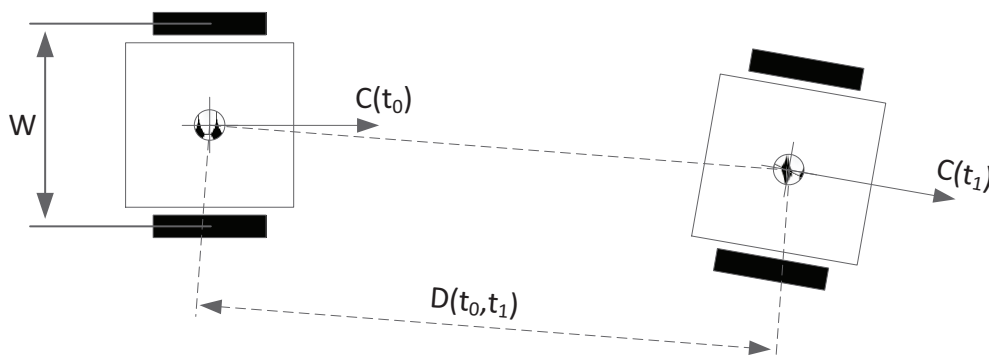


Рис. 2. Оценка перемещения для платформы с дифференциальным приводом

Таким образом, пройденную криволинейную траекторию можно аппроксимировать на линейные участки, для которых справедливы вышеприведенные формулы. Так же, используя расстояние, пройденное платформой, можно высчитать её Декартовы координаты:

$$X(t_1) = X(t_0) + D(t_0, t_1) * \cos(C(t_1)),$$

$$Y(t_1) = Y(t_0) + D(t_0, t_1) * \sin(C(t_1))$$

Несомненно, этот подход привлекателен своей простотой в реализации, низкими требованиями к вычислительным средствам и дешевизной, однако он обладает рядом существенных недостатков:

- Невозможность учитывать проскальзывания колес;
- Низкая точность, вызванная погрешностями измерения колес и низкой разрешающей способностью энкодеров, которые со временем имеют свойство накапливаться;
- Требуется высокая частота обработки, для того, чтобы отслеживать даже минимальные различия в «пробегах» колес.
- Невозможность реализации данного метода для летательных, плавающих а так же шагающих аппаратов.

Все эти недостатки, вынуждают вводить для таких подвижных систем «опорные точки», которые позволяли бы искоренять вкрадывающиеся погрешности. Естественно,

такой подход не осуществим в незнакомой обстановке, а подходит лишь для позиционирования в и так изведанной территории.

Использование инерциальных измерительных приборов

Для решения задачи оценки перемещения возможно использовать инерциальные измерительные приборы (*IMU*), которые включают в себя акселерометр, гироскоп и, иногда, магнитометр.

Рассмотрим принцип определения необходимых нам величин (пройденного расстояния и угла поворота) с помощью таких устройств.

Как было сказано выше, инерциальные измерительные приборы включают в себя как минимум гироскоп и акселерометр. Первый способен показывать изменение углов ориентации тела, относительно инерциальной системы отсчета, а второй, по сути, показывает ускорение тела по всем трем осям (ранее акселерометры позволяли определять ускорение только по одной оси, однако современные реализации способны показывать ускорение сразу по трем осям). Таким образом, используя гироскоп, можно определить поворот объекта относительно его оси *Z* (вертикали), а из ускорения, интегрируя получаемые значения, можно получить пройденную дистанцию. Рассмотрим эти процессы.

Сначала рассмотрим получение угла поворота объекта. Используя систему гироскопов, в теории, можно получить все 3 угла отклонения, более известных в авиационном строении как крен, тангаж и рысканье. Наиболее интересен для нас угол поворота вокруг вертикальной оси объекта. Все кажется довольно просто – гироскоп показывает угол, на который тело повернулось вокруг оси, по крайней мере так должно быть в теории. Однако на практике получается все немного по-другому.

Во-первых, на подвижных роботах нецелесообразно устанавливать механические гироскопы в силу их большого размера. В связи с этим используются миниатюрные гироскопы, выполненные в виде микроэлектромеханических систем на кремниевых подложках. Эти датчики используют другие принципы для определения вращения (в частности возникновение силы Кориолиса) и показывают уже не угол поворота, а угловую скорость. Тут возникает необходимость производить интегрирование или, в дискретном случае (а как правило, в сигнал получается именно в дискретной форме) простое суммирование [5]:

$$\alpha(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \omega_i \Delta t$$

Отсюда получается, что оценка поворота вокруг оси будет приближенной и зависит от частоты дискретизации сигнала.

Во-вторых, гироскопы проявляют дрейф нуля – показывают изменение угла даже в статичном положении. Величина дрейфа очень сильно зависит от реализации гироскопа. Ниже представлены величины накопленных погрешностей для разного типа гироскопов за час [5].

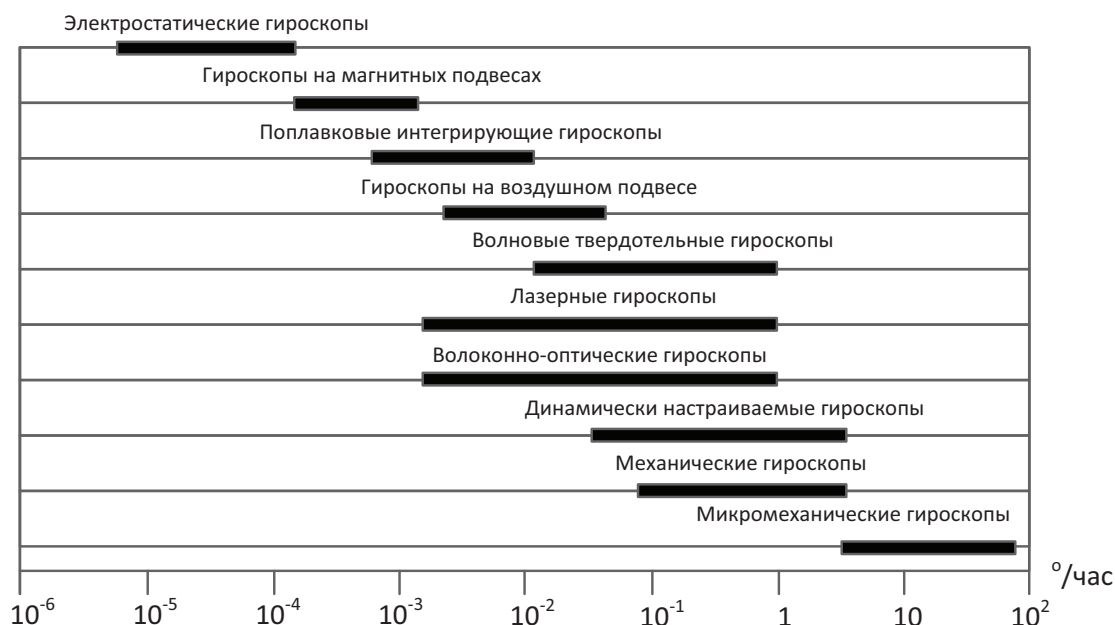


Рис. 3. Величина накапливающейся ошибки для разных типов гироскопов

Из диаграммы видно, что чем миниатюрней реализация, тем она более не точна. Таким образом появляется вопрос компромисса между размером и точностью.

В-третьих, интегрирование и обработка поступающих данных с датчика с необходимой для приемлемой точности частотой создает достаточно высокую вычислительную нагрузку, для которой, в ряде случаев, следует выделять отдельный микроконтроллер как минимум.

Перейдем к оценке пройденной дистанции. Наличие акселерометров позволяет определять величины линейных ускорений, которые испытывает система. Положим, что ориентация системы в физическом пространстве каким-либо образом точно определена. Тогда имеется возможность выделить вектор силы гравитации среди всей суммы векторов сил, приложенных к системе и, следовательно, оценить величину ускорения. Численное интегрирование ускорения позволяет перейти к скорости, а повторное интегрирование к перемещению. Таким образом, появляется принципиальная возможность оценить пройденный путь системы в любой момент времени [5]. Но опять же, не все так легко.

Интегрирование приводит к накоплению ошибки. Плюс к этому, акселерометр подвержен высокочастотным высокоамплитудным помехам, для борьбы с которыми необходимо использовать различные фильтры (фильтр Кальмана, «альфа-бета» фильтр и другие). Данные фильтры достаточно сложны в реализации и требуют подбора или расчета коэффициентов, и в добавок довольно ресурсоемки для того, чтобы реализовывать их на микроконтроллерах.

Исследования показывают, что наиболее точных результатов можно добиться применяя акселерометр, гироскоп и магнитометр и компенсируя ошибки одного датчика показаниями другого, однако такие системы довольно дороги и сложны.

Подводя итог, можно сказать, что использование инерциальных измерительных приборов для оценки перемещения возможно, однако чем большую точность необходимо достичь, тем дороже приборы.

Визуальная одометрия

Визуальная одометрия — это процесс получения одометрической информации, используя последовательность изображений с камер(камеры) робота [6]. Из неё получается информация о пройденном расстоянии и направлении движения. Визуальная одометрия позволяет построить систему навигации роботов, любого типа передвижения и на любой поверхности. Данный подход применяется в разных сферах: от марсоходов (например, Curiosity) до оптических мышках.

- | Стандартный | алгоритм | визуальной | одометрии: |
|--------------------|-----------------|-------------------|---|
| 1. получение | изображения | с | камеры/стереокамеры/всенаправленных камер; |
| 2. Коррекция | изображения | | |
| 3. Детектирование | ключевых точек | изображения: | |
| 1) | детектирование | ключевых точек | (например — метод Лукаса-Канаде (<i>Lucas–Kanade</i>)); |
| 2) | сравнение | точек между | кадрами; |
| 3) | построение | оптического | потока. |
| 4. Проверка | векторов | оптического | потока на потенциальные ошибки, отбрасывание выбросов; |
| 5. Определение | движения | камеры из | оптического потока; |
| 6. Периодическое | обновление | набора | ключевых точек для отслеживания. |

Неоспоримым преимуществом данного подхода является его универсальность. К минусам следует отнести следующее:

- Плохая работа алгоритма на однотипных изображениях

- Необходимость высокой скорости захвата изображений (в настоящее время существуют системы с частотой получения кадров с частотой в десятки кГц)
- Высокая вычислительная нагрузка
- Высокая стоимость камер

Отслеживание перемещения с помощью GPS или ГЛОНАСС

Согласно [10], GPS — спутниковая система навигации, обеспечивающая измерение расстояния, времени и определяющая местоположение. Позволяет в любом месте Земли определить местоположение и скорость объектов. Система разработана, реализована и эксплуатируется Министерством обороны США.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС, GLONASS) — советская и российская спутниковая система навигации, разработана по заказу Министерства обороны СССР [11]. Является единственной альтернативой GPS.

Основной принцип использования системы — определение местоположения путём измерения моментов времени приема синхронизированного сигнала от навигационных спутников до потребителя. Расстояние вычисляется по времени задержки распространения сигнала от посылки его спутником до приёма антенной GPS-приёмника. Следовательно, для точного определения координат требуется прием сигналов с нескольких спутников.

Очевидным преимуществом данного подхода является то, что он непосредственно показывает текущее положение в пространстве, что означает отсутствие необходимости производить какие-либо вычисления для этого. Однако отсюда следует и первый небольшой минус — невозможно определить ориентацию объекта, если он не движется.

Далее следует отметить, пожалуй, самый существенный недостаток технологии, который заключается в невозможности определения положения в закрытых помещениях из-за плохого качества сигнала. При этом, при длительном отсутствии сигнала, требуется больше время для определения позиции. Так, если устройство было неактивно 3 часа, то после его запуска потребуется около 40 секунд для определения координат местоположения (существуют технологии направленные на снижение времени «холодного старта», однако их использование подразумевает удорожание и усложнение системы в целом, а так же не вписывается в рамки данной статьи).

Как было сказано выше, точность определения положения зависит от количества доступных спутников. Данный факт приводит к двум следующим недостаткам:

- Неприемлемое качество работы в приполярных районах Земного шара, которое объясняется наклоном орбит спутников;

- Низкая точность определения местоположения – самые последние спутники могут определить местоположение с точностью до 60 см.

Совмещение методов определения положения

В данном случае нецелесообразно рассматривать сильно специфические потребности, такие как необходимость позиционировать объект на Марсе, так как данные задачи гораздо сложнее, чем может показаться, и не подходят по формату данной статьи. Однако для более тривиальных задач можно предложить комбинации вышеизложенных методов для построения системы позиционирования с приемлемой точностью.

В силу ограничений на применение энкодеров для водных и летательных аппаратов, целесообразно в данных случаях использовать инерциальные системы в связке со спутниковой навигацией (GPS/ГЛОНАСС), в силу того, что их использование не подразумевает наличие преград над аппаратом для распространения радиоволн, а наличие инерционных датчиков зачастую необходимо и для других целей. Так же в силу окружающих факторов, использование визуальной одометрии на водных аппаратах крайне затруднительно.

Колесные платформы способны совмещать все вышеизложенные подходы к определению положения, но это может быть избыточно и, как минимум, дорого. В таком случае, необходимо отталкиваться от решаемых задач и ограничений, диктуемых как окружающими условиями, так и другими требованиями (к размеру, стоимости и т.д.). При использовании внутри помещений нецелесообразно оснащать аппарат спутниковой системой навигации, но в то же время закрытое пространство, как правило, хорошо подходит для визуальной одометрии. При возможности заранее «разметить» помещение, скорее всего будет достаточно данных с энкодеров и гироскопов с невысокой точностью, ошибка которых будет сбрасываться на специально отведенных точках, указывающих истинные значения направления и координат в пространстве.

Наиболее сложными являются шагающие роботы, используемые в закрытых помещениях. Особенности их конструкции, принципа действия и наличие преград для сигналов от спутников вынуждают отказаться сразу от двух возможных методов: стандартной одометрии на энкодерах и спутниковой навигации. В то же время использование инерциальных измерительных приборов так же затруднительно из-за специфики их передвижения. Следовательно, остается всего один вариант – визуальная одометрия.

Таким образом можно утверждать, что визуальная одометрия является самым универсальным инструментом для определения местоположения. Именно поэтому в настоящий момент этой технологии уделяют особое внимание и она переживает бурное

развитие. Способствуют этому развитие цифровых камер и увеличение вычислительных мощностей различных устройств.

Заключение

В данной работе были рассмотрены основные методы оценки положения роботов в пространстве, для каждого метода были показаны преимущества и недостатки. Были показаны самые существенные ограничения всех методов, что позволяет быстро сориентироваться среди них и выбрать наиболее подходящий для каких-либо нужд. Так же были рассмотрены варианты совмещения данных методов на различных типах роботов с целью увеличения точности оценки их позиционирования.

Список литературы

1. Одометрия // Коллективный блог Robokraft : [Сайт]. [2012]. URL: <http://robocraft.ru/blog/technology/736.html> (дата обращения: 28.07.2013г.).
2. Аппаратура навигационная наземная одометрическая (термины и определения) ГОСТ 19156-79.
3. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. ЛАЗЕРНАЯ ЛОКАЦИЯ ЗЕМЛИ И ЛЕСА // электронная версия книги:. [2007]. URL: <http://www.laserlocation.ru/chapter4.4.htm> (дата обращения: 28.07.2013г.).
4. Автономная навигация робота [Электронный ресурс] // форум роботостроителей: [Сайт]. [2009]. URL: <http://roboforum.ru/forum88/topic6021.html> (дата обращения: 28.07.2013г.).
5. На пороге дополненной реальности [Электронный ресурс] // Коллективный блог habrahabr : [Сайт]. [2011]. URL: <http://habrahabr.ru/post/118192/> (дата обращения: 28.07.2013г.).
6. Визуальная одометрия // Коллективный блог Robokraft : [Сайт]. [2012]. URL: <http://robocraft.ru/blog/computervision/738.html> (дата обращения: 28.07.2013г.).
7. Andreas Geiger, Bernd Kitt, Library for VISual Odometry [Электронный ресурс] // сайт проекта LibVISO. [2011]. URL: <http://www.cvlibs.net/software/libviso.html> (дата обращения: 28.07.2013г.).
8. 8.Урмаев М. С., Родин С. П. Алгоритмы вычисления геодезических координат пунктов при одновременном использовании навигационных систем ГЛОНАСС и GPS // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 1998, N1, С. 58 66.
9. Датчик угла поворота // Википедия : [Сайт]. [2012]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder (дата обращения: 28.07.2013г.).
10. GPS // Википедия : [Сайт]. [2012]. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/GPS>

11. ГЛОНАСС // Википедия : [Сайт]. [2012]. URL:
<http://en.wikipedia.org/wiki/GLONASS> (дата обращения: 28.07.2013г.).