

Оптимизация навигационных характеристик мобильного робота

Марк ЛУНИ (Mark LOONEY)

Роботы наземного базирования широко используются при выполнении задач, где прямое человеческое участие слишком затратно, опасно или просто неэффективно. Зачастую такие роботы должны работать автономно, используя навигационные системы для мониторинга и управления параметрами своего движения при перемещении из одного местоположения в другое. Гироскопы на основе технологии МЭМС (микроэлектромеханические системы) обеспечивают чувствительный механизм обратной связи, который может быть очень полезен для оптимизации характеристик навигационной системы. Примером автономной системы, в которой для повышения точности навигации применяются МЭМС-компоненты, является робот Seekur (www.mobilerobots.com), изображенный на рис. 1.

Краткий обзор задачи навигации роботов

Движение робота, как правило, начинается с отправки запроса на изменение местоположения от центрального процессора, который управляет ходом выполнения программы роботом. Навигационная система начинает исполнение этого запроса с разработки плана передвижения, или траектории.

План передвижения учитывает доступные пути, известные положения препятствий, способность робота их преодолевать и любые другие актуальные цели миссии (например, для робота, доставляющего образцы в больницу, критическим параметром может быть время доставки.) План передвижения передается в контроллер, который вырабатывает профили направления и управляющих воздействий для осуществления навигации. Результатом обработки этих профилей является движение в соответствии с намеченным планом. Параметры движения обычно отслеживаются несколькими измерительными системами, каждая из которых формирует сигналы обратной связи; контроллер объеди-

Точность в управлении положением и параметрами движения является ключом к надежному автономному функционированию мобильных роботов.



Рис. 1. Система Seekur, разработанная компанией Adept MobileRobots

няет их и преобразует в обновленные планы поездки и модели обстановки.

Ключевым моментом на начальном этапе проектирования навигационной системы является хорошее понимание каждой функции, в особенности ее эксплуатационных

целей и ограничений. Как правило, каждый функциональный узел имеет некоторые четко определенные и легко исполняемые задачи, однако наряду с этим обладает также и ограничениями, которые должны быть учтены. В некоторых случаях процесс проектирования может состоять из нескольких итераций, когда нахождение и преодоление ограничений дает новые возможности для оптимизации.

В качестве примера рассмотрим систему Seekur компании Adept MobileRobots. Она представляет собой автономного робота с четырьмя ведущими колесами и независимым управлением скоростью и положением каждого колеса, что дает дополнительную гибкость при перемещении платформы в любом горизонтальном направлении. Инерциальная навигационная система (ИНС) робота аналогична той, что показана на рис. 2. Эта система робота Seekur использует GPS, лазерное

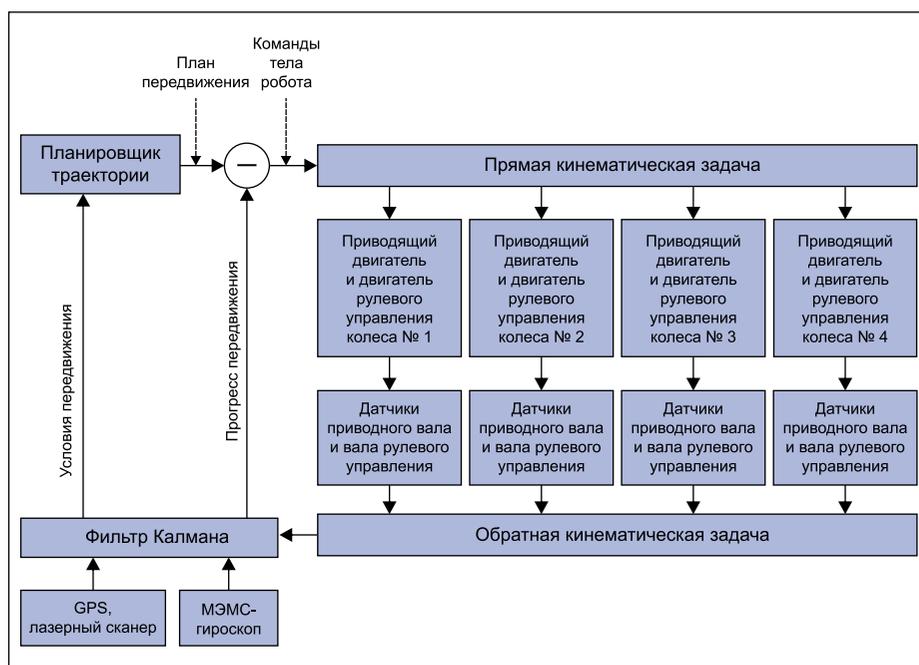


Рис. 2. Навигационная система робота Seekur

сканирование и МЭМС-гироскопы для независимого управления каждым из четырех колес.

Управление движением

Как можно видеть на рис. 2, управление движением осуществляется путем выдачи команд «телом» робота. Эти команды, по существу, представляют собой сигналы ошибки, которые рассчитываются на основании разницы между планом передвижения, предоставленным планировщиком траекторий, и обновленной информацией о пройденном пути, формируемой измерительной системой обратной связи.

Команды передаются в систему решения обратной кинематической задачи, которая преобразует команды «тела» робота в профили поворота и скорости каждого отдельного колеса. Эти профили определяются при помощи уравнений Аккермана, которые включают в себя диаметр шины, площадь ее контактной поверхности, расстояние между колесами и другие важные геометрические параметры.

Принципы и уравнения Аккермана позволяют создавать в таких роботах электронные профили управления углом поворота, подобные используемым в механизмах реечной передачи, которые применяются в системах рулевого управления многих автомобилей. Расчет этих соотношений в удаленном узле без механической связи осей помогает минимизировать трение и боковой увод колес, сокращает износ шин и потери энергии и позволяет совершать маневры, невозможные при простых механических связях.

Система обратной связи

Каждое колесо имеет приводной вал, который механически связан с соответствующим приводным двигателем при помощи коробки передач и через еще одну коробку передач — с оптическим импульсным датчиком. Этот датчик формирует входной сигнал для системы обратной связи, которая осуществляет управление на основании информации о пройденном расстоянии. Вал рулевого управления связывает ось с еще одним следящим двигателем, который задает угол поворота колеса. Вал рулевого управления также связан через коробку передач со вторым оптическим импульсным датчиком, который формирует еще один входной сигнал для системы обратной связи.

Для оценки положения робота на карте навигационная система использует обобщенный фильтр Калмана, в котором происходит объединение данных от нескольких датчиков. Данные одометрии (величина пройденного расстояния) в системе Seekur получают на основании показаний датчиков угла поворота и силы сцепления колеса, а также МЭМС-гироскопа, который оценивает угловую скорость.

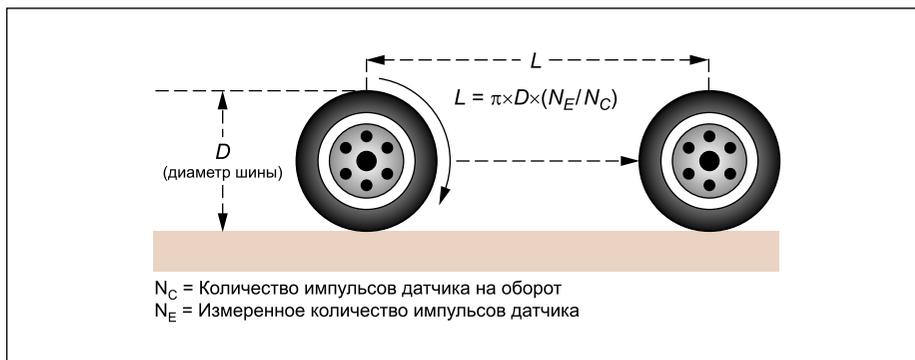


Рис. 3. Система одометрии

Одометрия (измерение пройденного расстояния)

Система обратной связи оценивает положение, направление и скорость робота на основании измерений количества оборотов приводного вала и вала рулевого управления, получаемых с помощью оптических импульсных датчиков. На рис. 3 схематически поясняется задача одометрии и приводится уравнение, на основе которого число оборотов, измеренное при помощи оптического датчика приводного вала, преобразуется в линейное изменение положения.

Показания датчиков приводящей оси и вала рулевого управления каждого из колес объединяются в блоке решения прямой кинематической задачи, и на их основе при помощи формул Аккермана рассчитывается направление, число оборотов, положение и линейная скорость.

Преимущество подобной измерительной системы заключается в том, что функция измерения непосредственно связана с системами привода и рулевого управления, и следовательно, их состояние точно известно. В то же время в отсутствие привязки к набору реальных координат погрешность измерения реальной скорости и направления движения будет ограничена. Основные ограничения (источники погрешности) — это правильность геометрии шины (погрешность и отклонение диаметра на рис. 3) и потери контакта между колесом и поверхностью земли. Геометрия шины зависит от состояния протектора, давления в шине, температуры и веса; причем все эти параметры могут изменяться в нормальных условиях использования робота. Боковой увод колеса зависит от радиуса поворота, скорости и состояния поверхности.

Измерение положения

В системе Seekur используются различные типы датчиков дальности. При работе внутри помещения для построения карты окружающей обстановки применяется лазерный сканер с углом обзора 270°. Лазерная система измеряет формы, габариты и рас-

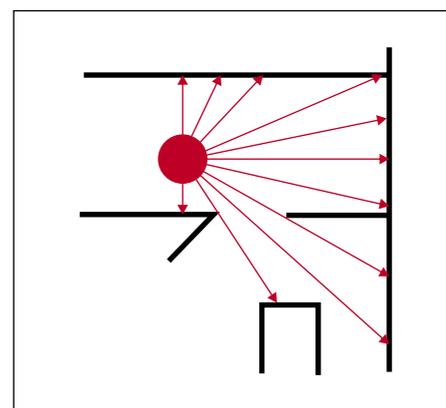


Рис. 4. Карта окружающей обстановки (коридор — дверь — комната — шкаф)

стояние от объектов до источника лазерного излучения, используя информацию об отраженной энергии и времени задержки прихода сигнала.

В режиме построения карты система описывает окружающую обстановку на основании объединения результатов сканирования по множеству направлений (рис. 4). При помощи этой информации формируется карта местоположений, форм и габаритов объектов, которая используется в качестве эталона при сканировании в процессе движения.

В процессе передвижения информация от лазерного сканера объединяется с информацией, содержащейся в построенной карте, для получения данных о точном местоположении робота. Если измерения лазерного сканера используются без привязки к карте, то точность будет ограничена из-за пауз в сканировании и невозможности адаптации к изменениям окружающей обстановки. Так, например, в складских помещениях люди, автопогрузчики, тележки для поддонов и многие другие объекты часто меняют свое положение, что может повлиять на скорость и, естественно, точность достижения роботом конечной цели.

При работе вне помещения система Seekur использует для измерения местоположения глобальную систему позиционирования GPS. Эта система выдает информацию о положе-

нии на земной поверхности на основе данных о времени распространения сигналов, поступающих как минимум от четырех космических спутников.

Система GPS способна обеспечить точность определения местоположения в пределах 1 м. В то же время для работы требуется выполнение условия прямой видимости, которому могут препятствовать здания, деревья, мосты, туннели и многие другие объекты. В некоторых случаях, когда положения наружных объектов и их свойства известны (например, в «городских каньонах» — узких улицах между высокими зданиями), при временном отсутствии надежных измерений от GPS в качестве дополнения для оценки местоположения могут быть также использованы радар и эхолотатор. Но даже в этом случае эффективность зачастую ограничена, если окружающая обстановка динамически изменяется — например, при движении автомобилем или на стройке.

Измерение угловой скорости при помощи МЭМС-гироскопа

МЭМС-гироскоп, используемый в системе Seekur, выдает показания о скорости вращения относительно вертикальной оси (по углу рыскания), которая в навигационной системе координат робота ориентирована по нормали к поверхности земли. Математическое выражение для определения относительного курса (формула 1) представляет собой простое интегрирование измеренной угловой скорости по фиксированному интервалу времени (от t_1 до t_2):

$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} \omega dt. \quad (1)$$

Одно из ключевых достоинств этого подхода заключается в том, что, будучи прикрепленным к раме робота, гироскоп измеряет реальное движение аппарата независимо от величины передаточного отношения, люфта, геометрии шины или целостности контакта с поверхностью. В то же время оценка курса зависит от погрешности датчика, которая, в свою очередь, является функцией следующих параметров: погрешности смещения нуля, шума, стабильности и чувствительности.

Как показывает формула 2, систематическая (постоянная) погрешность смещения нуля, ω_{BE} преобразуется в скорость дрейфа оценки направления:

$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} (\omega + \omega_{BE}) dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega dt + \omega_{BE}(t_2 - t_1). \quad (2)$$

Погрешности смещения нуля подразделяются на две категории: систематическую и погрешность, зависящую от условий применения. Система Seekur оценивает систематические погрешности смещения нуля,

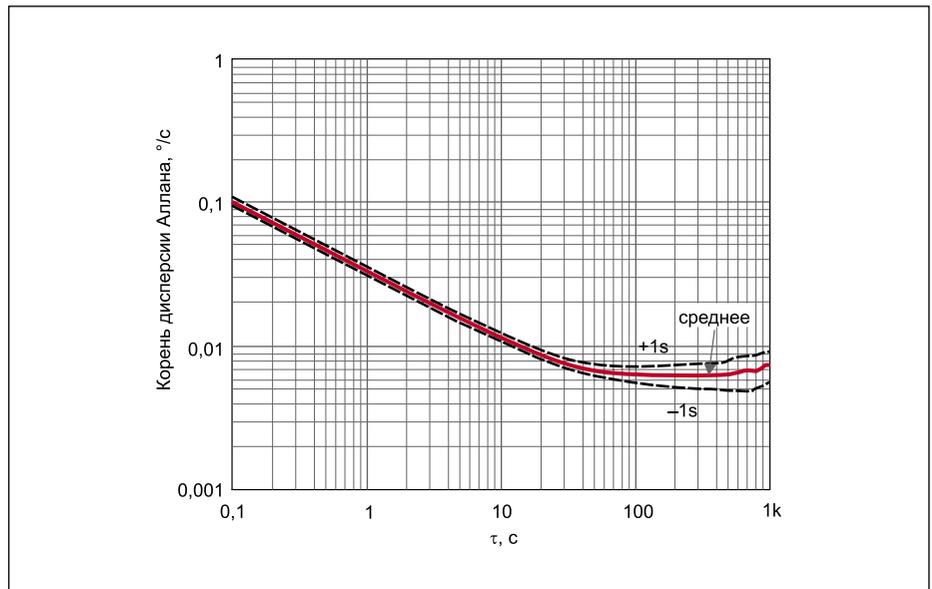


Рис. 5. Кривая дисперсии Аллана

когда она находится в статическом положении. Для этого необходимо, чтобы навигационный компьютер мог распознавать моменты, когда запросы на изменение положения не обрабатываются. В данном случае процедура оценки смещения и обновления поправочного коэффициента упрощается. Точность этой процедуры зависит от шума датчика и количества времени, доступного для сбора данных и оценивания погрешности. Взаимосвязь между точностью оценки смещения нуля и временем усреднения помогает установить кривая дисперсии Аллана (рис. 5). График соответствует ADIS16265 — МЭМС-гироскопу семейства iSensor, аналогичному тому, что используется в системе Seekur, и позволяет определить оптимальное время интегрирования показаний гироскопа. Для системы Seekur погрешность смещения на уровне ниже $0,01^\circ/\text{с}$ может быть получена при времени усреднения более 20 с, а оптимальная оценка достигается при интервале усреднения около 100 с.

Дисперсия Аллана также позволяет оценить оптимальный интервал интегрирования ($\tau = t_2 - t_1$). Минимальное значение этой кривой обычно принимают за величину стабильности смещения нуля в установившихся условиях. Оптимальные оценки направления достигаются при выборе интервала интегрирования, τ , равного точке на оси абсцисс, которая соответствует этому минимальному значению для используемого в системе гироскопа.

Погрешности, зависящие от условий применения, такие как температурный коэффициент смещения, также влияют на показатели системы. Они определяют то, как часто робот должен останавливаться для обновления корректирующего коэффициента смещения. Использование предварительно откалиброванных датчиков помогает спра-

виться с большинством типовых источников погрешностей, таких как изменения температуры и напряжения питания.

Так, например, замена ADIS16060 на предварительно откалиброванный датчик ADIS16265 может привести к увеличению габаритов, стоимости и энергопотребления, но в то же время дает улучшение температурной стабильности в 18 раз. При изменении температуры на 2°C максимальное смещение ADIS1606 составляет $0,22^\circ/\text{с}$, а максимальное смещение ADIS16265 — всего $0,012^\circ/\text{с}$.

Погрешность чувствительности пропорциональна реальному изменению направления, как показывает формула:

$$\theta_H = \int_{t_1}^{t_2} (1 + \varepsilon) \omega dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega dt + \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon \omega dt. \quad (3)$$

Погрешность чувствительности многих коммерческих МЭМС-датчиков составляет от $\pm 5\%$ до более $\pm 20\%$, и для ее минимизации необходима калибровка. Предварительно откалиброванные МЭМС-гироскопы, такие как ADIS16265 и ADIS16135, обладают погрешностью чувствительности менее $\pm 1\%$, а в контролируемых условиях она еще ниже.

Возможное развитие системы

В следующем поколении роботов, подобных системе Seekur, можно заменить гироскопы полностью интегрированными МЭМС-датчиками с шестью степенями свободы. Подход с измерением только по углу рыскания полезен, однако наш мир не является плоским, и во многих существующих системах или системах будущего для учета рельефа поверхности и дополнительного повышения точности могут быть использованы интегрированные МЭМС-модули.