

DOI: 10.25728/mlsd.2023.0; 5:

АЛГОРИТМ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КОЛЕСНОГО РОБОТА ПО ДАННЫМ ВИЗУАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Амосов О.С., Амосова С.Г.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
osa18@yandex.ru, amosovasg@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены алгоритмы определения положения и ориентации колесного робота по данным одометрии, инерциальных датчиков и видеокамеры. Представлены математические модели навигации для робота в плоской среде. Рассмотрен пример решения задачи оценки положения мобильного робота TurtleBot3 Burger.

Ключевые слова: колесный робот, инерциальная навигация, одометрия, видеообработка.

Введение

Автономные мобильные роботы необходимы во многих областях. Но до сих пор основными проблемами для мобильных роботов являются:

- навигация – это первая и главная проблема для мобильного робота, которому необходимо ориентироваться в неизвестной среде и определять свое точное местоположение, чтобы он мог проложить путь к требуемым пунктам назначения;
- хранение собранных данных о среде.

Авторами [1] представлен проект системы локальной навигации для наземных мобильных роботов. Разработанная система учитывает особенности движения мобильных роботов с шестью степенями свободы, что позволяет решать навигационные задачи в этой области наиболее эффективно.

В работе [2] разработан алгоритм действий системы управления мобильным роботом для реализации задачи по определению ориентации мобильного робота в пространстве. По результатам практических испытаний выделены несовершенства исполнения микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков, сделан вывод о необходимости их предварительной калибровки с целью устранения систематической погрешности. Исследования датчиков МЭМС по уходу гироскопа и смещению нуля акселерометра проведены в работе [3].

В работе [4] исследуется возможность навигации мобильного робота и определения его местоположения в неизвестных средах с последующим созданием карт. Предлагается решение проблемы с хранением собранных данных о среде на основе облачной реализации.

В настоящей работе предлагается определение местоположения и ориентации выполнять совместным объединением данных от различных датчиков по кадрам видеонаблюдения, инерциальной навигации и одометрии колесного робота (КР) для выравнивания и синхронизации координат на карте. Для доступа к данным предлагается использование веб-сервера. Результаты показывают, что предложенный метод является надежным и точным, сохраняя при этом некоторую простоту и эффективность затрат.

1. Измерение и оценка положения робота

Конфигурация жесткого мобильного робота обычно описывается шестью переменными: трехмерными декартовыми координатами и тремя углами Эйлера (курсовой угол, тангаж, крен) относительно внешней системы координат. В докладе мы ограничимся мобильным колесным роботом, работающим в плоских средах, чье кинематическое состояние или поза определяется тремя переменными. Это показано на рисунке 1. Поза робота определяется позицией, которую характеризуют его двумерные плоские координаты $X_N(t), X_E(t)$ относительно внешней системы координат ONE и угловой ориентацией $\alpha(t)$. Ориентацию робота $\alpha(t)$ часто называют азимутом или направлением движения. Таким образом, поза мобильного робота описывается вектором $[X_N(t), X_E(t), \alpha(t)]^T$.

Локальная навигация КР может быть реализована как с помощью активных (инерциальная навигация, системы технического зрения), так и с помощью пассивных схем навигации (спутниковая, по радиомаякам и маркерам) [5]. В настоящем докладе рассматривается реализация с помощью инерциальной навигации, одометрии и видеокамеры.

Измерение и оценка позы робота $[X_N(t), X_E(t), \alpha(t)]^T$ подразумевает выполнение нескольких операций, таких как:

- считывание значений энкодера E для обеих осей колес (пересчитанное как передаточное число для вала двигателя);
- вычисление расстояния перемещения и угла поворота, а затем оценка положения;
- учет проскальзывания, механической и кумулятивной ошибки;
- компенсация положения с помощью инерциального датчика IMU (Inertial Measurement Unit, инерциальный измерительный блок), включающего в себя акселерометр, гироскоп и магнитометр. Существует ошибка между рассчитанным расстоянием при вращении колеса и фактическим расстоянием движения. Поэтому информация от датчика IMU может быть использована для уменьшения ошибки путем компенсации ошибки положения и ориентации между расчетным и фактическим значением.

2. Постановка задачи

Необходимо оценить двумерные плоские координаты $X_N(t), X_E(t)$ робота относительно внешней системы координат ONE и его угловую ориентацию $\alpha(t)$ с использованием одометрии, инерциальных датчиков и видеокамеры.

Одометрия является средством оценки определения положения колесного робота. Для этого используются энкодеры, считывающие углы поворота колес. Пройденное расстояние вычисляется по суммарному углу поворота каждого колеса с учетом их радиуса (при отсутствии проскальзывания). По найденному расстоянию перемещения колесного робота производится оценка его положения относительно начального положения.

Инерциальный измерительный блок состоит из 3х-осевого гироскопа, 3х-осевого акселерометра и 3х-осевого магнитометра. Для инерциального определения координат местоположения объекта необходимо знать информацию о начальных значениях координат $X_N(t_0), X_E(t_0)$ и скоростей $V_N(t_0), V_E(t_0)$, непрерывно измерять проекции ускорения объекта с помощью акселерометра $a_x(t), a_y(t)$, определять с помощью гироскопа ориентацию осей чувствительности акселерометров относительно навигационной системы координат и дважды интегрировать ускорения объекта по времени.

Видеокамера участвует в определении положения колесного робота как дополнительный сенсор с использованием технологий компьютерного зрения по обнаружению, распознаванию и слежению объекта по QR-кодам.

3. Решение задачи определения положения и ориентации колесного робота

3.1. Одометрия

Для вычисления перемещения, угла поворота и оценки положения робота (Рис. 1) необходимо произвести следующие расчеты [6]:

Скорости вращения левого и правого колес

$$\omega_l = \frac{(E_{lc} - E_{lp})}{T_e} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} [рад/с], \quad \omega_r = \frac{(E_{rc} - E_{rp})}{T_e} \cdot \frac{\pi}{180^\circ} [рад/с], \quad (1)$$

где E_{lc}, E_{rc} – текущее значение энкодера; E_{lp}, E_{rp} – предыдущее значение энкодера; T_e – время пройденного расстояния.

Скорости левого и правого колес

$$v_l = \omega_l \cdot r [м/с], \quad v_r = \omega_r \cdot r [м/с], \quad (2)$$

где r – радиус колеса.

Линейная скорость КР $v_k = \frac{(v_l + v_r)}{2} [м/с]$.

Угловая скорость КР $\omega_k = \frac{(v_r - v_l)}{D} [rad/c]$,

где D – расстояние между колесами.

Пройденный путь $\Delta s_k = v_k \cdot T_e$.

Угол поворота $\Delta \alpha_k = \omega_k T_e$.

Расчет приблизительных значений координат перемещенного положения робота выполняется по формуле Рунге-Кутты:

$$\begin{aligned} X_{N(k+1)} &= X_{N(k)} + \Delta s_k \cos\left(\alpha_k + \frac{\Delta \alpha_k}{2}\right), \\ X_{E(k+1)} &= X_{E(k)} + \Delta s_k \sin\left(\alpha_k + \frac{\Delta \alpha_k}{2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Ориентация перемещенного робота $\alpha_{k+1} = \alpha_k + \Delta \alpha_k$.

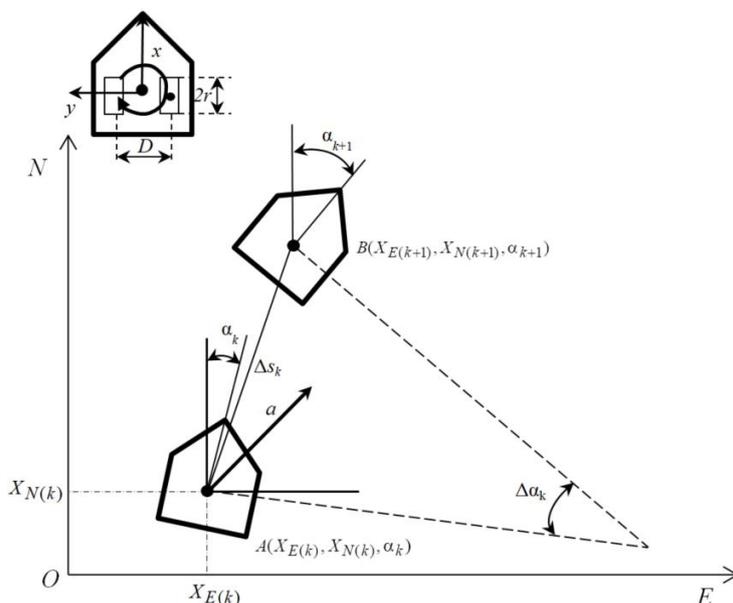


Рис. 1. Оценка положения КР по одометрии

3.2. Инерциальная навигационная система

Для инерциального определения координат местоположения объекта на плоскости и направления движения робота необходимо (Рис. 2):

- знать информацию о начальных значениях координат $X_N(t_0), X_E(t_0)$ и скоростей $V_N(t_0), V_E(t_0)$;
- непрерывно измерять проекции ускорения объекта с помощью акселерометров $a_x(t), a_y(t)$;
- пересчитывать измеренные ускорения $a_x(t), a_y(t)$ для связанной системы координат ONE

$a_N(t), a_E(t)$ по формулам [5]:

$$\begin{bmatrix} a_N \\ a_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}; \quad (4)$$

- дважды интегрировать ускорения объекта $a_N(t), a_E(t)$ по времени:

$$\begin{aligned} V_N(t) &= V_N(t_0) + \int_{t_0}^t a_N(t) dt; & X_N(t) &= X_N(t_0) + \int_{t_0}^t V_N(t) dt; \\ V_E(t) &= V_E(t_0) + \int_{t_0}^t a_E(t) dt; & X_E(t) &= X_E(t_0) + \int_{t_0}^t V_E(t) dt; \end{aligned} \quad (5)$$

- определять угловую ориентацию с помощью выражения $\dot{\alpha} = \omega_V$,

где $\alpha(t)$ – курсовой угол; $\omega_V(t)$ – измеряемая угловая скорость мобильного робота относительно вертикальной оси V .

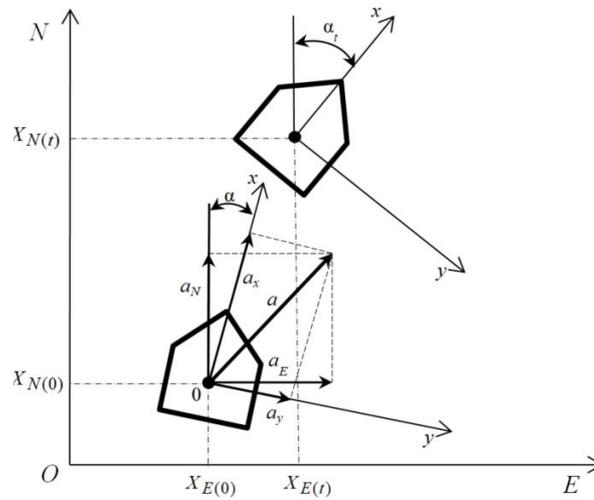


Рис. 2. Оценка положения КР с использованием инерциальных датчиков

3.3. Визуальная система

Для измерения положения робота по видеоизображениям необходимо стационарно закрепить видеокамеру на высоте h . За основу для разработки системы локализации робота взята математическая модель [7], которая определяет на изображении координаты области интереса объектов, вписанных в прямоугольник. Данная модель доработана в части определения координат робота относительно центральной точки обзора камеры по QR-коду, размещенному на роботе. Расстояние L , координаты центральной точки обзора камеры $C(X_E, X_N)$ можно определить по формулам (Рис. 3):

$$\begin{aligned} L &= h \cdot \operatorname{tg} \varphi; \\ X_E &= X_E^0 + L \cdot \cos \theta; \\ X_N &= X_N^0 + L \cdot \sin \theta; \end{aligned} \quad (6)$$

где h – высота камеры над поверхностью перемещения робота; φ – угол между направлением обзора камеры и поверхностью перемещения робота; θ – угол между проекцией направления обзора камеры и осью OE . Схематическое изображение указанных расчетов представлено на Рис. 3.

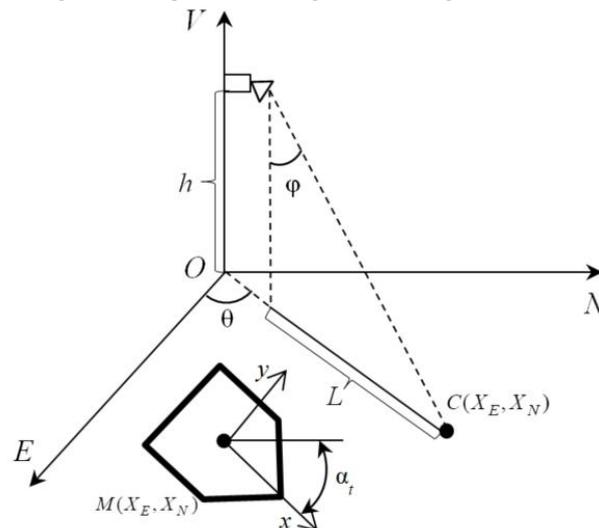


Рис. 3. Определение центра обзора камеры

Расчеты координат положения робота $M(X_E, X_N)$ на изображении относительно центральной точки обзора $C(X_E, X_N)$ проводились по следующим формулам:

$$LM_h = h \cdot \operatorname{tg}(\varphi + AV \cdot \frac{IH - X_N}{IH - 0,5});$$

$$LM_w = LM_h \cdot \operatorname{tg}(AH \cdot \frac{IW - X_E}{IW - 0,5});$$

$$X_E = X_E^0 + LM_h;$$

$$X_N = X_N^0 + LM_w;$$

где AV – вертикальный угол обзора камеры; AH – горизонтальный угол обзора камеры; IH – высота изображения с камеры в пикселях; IW – ширина изображения с камеры в пикселях; X_E, X_N – координаты пикселей на изображении в декартовой системе координат.

В случае Full HD высота и ширина изображения следующие: $IH = 1080$; $IW = 1920$.

Таким образом, математическая модель позволяет определить положение КР в декартовой системе координат. Особенностью разработанного метода является возможность определения положения объекта с использованием всего одной видеокамеры.

4. Пример

В настоящей работе реализация ориентации и навигации исследуется на мобильном колесном роботе TurtleBot3 Burger. TurtleBot3 работает на операционной системе робота (Robot Operating System, ROS), оснащен 2D лазерным дальномером 360° (Laser Distance Sensor LDS-01, LiDAR HLS-LFCD2) с USB2LDS, микроконтроллером OpenCR (ARM Cortex®-M7) со встроенными датчиками: 3х-осевой гироскоп, 3х-осевой акселерометр, 3х-осевой магнитометр (MPU9250), одноплатным миникомпьютером Raspberry Pi 4, двумя сервоприводами Dynamixel x2 for Wheels (XL430-W250-T) для управления колесами с бесконтактными магнитными энкодерами, обеспечивающими вращение на 360° со скоростью до 61 об/мин и аккумуляторной батареей LIPO Battery 11.1V 1000mAh LB-010 (Рис. 4) [8]. Основание робота может передвигаться благодаря двум колесам и металлическому шарик, удерживающему его в устойчивом положении. Его можно полностью запрограммировать, т.к. робот с открытым исходным кодом.

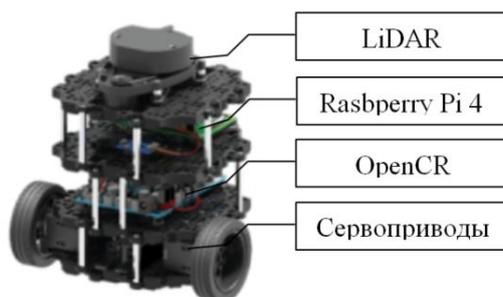


Рис. 4. Оснащение мобильного колесного робота TurtleBot3 Burger

Программа управления КР запускается на персональном компьютере (ПК), для которого робот действует как подчиненный. В фоновом режиме на ПК запускается соединяющий узел, позволяющий обмениваться данными. TurtleBot3 и удаленный компьютер должны быть настроены для установки связи в одной локальной Wi-Fi сети. Для записи и хранения информации по ориентации и навигации КР и данных, полученных от видеокамеры, предлагается использовать веб-сервис, чтобы получить доступ к информации в любое время и из любого места через Интернет.

Для определения местоположения КР используется IP камера HikVision – модель DS-2CD2322WD-I, разрешение 1920×1080, матрица 1/3, при фокусном расстоянии в 2,8 мм угол обзора камеры: по горизонтали $AH=108^\circ$, по вертикали $AV=62^\circ$. Для локализации объекта на видео разместили QR-код на КР. Для декодирования и обнаружения QR-кода на видео используется функция **decode** из пакета **pyzbar** Python. На QR-коде выделяем нижний край и две угловые точки в

пикселях (Рис. 4), которые включаем в расчет формул (7), как значения IH и IW для детектированного объекта.



Рис. 4. Координаты положения робота на видео относительно центральной точки обзора камеры

Результаты эксперимента по определению ошибки положения КР для прямолинейного движения с постоянной скоростью в течение 10 с показали следующее:

- по инерциальной навигационной системе ошибка составила от 6 до 12 см;
- по одометрии ошибка от 9 до 16 см;
- по визуальной системе – до 5 см.

Эксперимент проводился в помещении на ровной поверхности при нормальных условиях.

Наиболее точный результат дает использование видеокamеры. Близкий результат оценки положения КР к оценке координат видеокamерой получен для ИНС. Однако, ошибки ИНС с течением времени будут нарастать, как и ошибки одометра при выполнении маневров КР в процессе движения по более сложной траектории.

Исследованию этих ошибок при более продолжительном времени движения и сложным маневрам и будет посвящено дальнейшее исследование, чтобы использовать комплексирование данных для повышения точности при навигации робота.

5. Заключение

Приведена постановка задачи оценивания положения и ориентации колесного робота с использованием одометрии, инерциальных датчиков и видеокamеры. Предложено решение определения местоположения КР с использованием видеокamеры с уточнением координат робота через веб-сервер.

Рассмотрены алгоритмы определения положения и ориентации колесного робота по данным одометрии, инерциальным датчикам и видеокamеры. Представлены математические модели навигации для КР в плоской среде. Рассмотрен пример решения задачи оценки положения мобильного робота TurtleBot3 Burger.

Литература

1. Черноножкин В.А., Половко С.А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник ИТМО. 2008. №57. – С. 13–22.
2. Баженов Е.И., Мокрушин С.А., Оханкин С.И. Разработка системы ориентации мобильного робота в пространстве // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 4. – С. 354–359.
3. Amosov O.S., Amosova S.G. Peculiarities and Applications of Stochastic Processes with Fractal Properties // SENSORS. 2021. Vol. 21, Iss. 17, №5960, DOI: 10.3390/s21175960.
4. Abdulsahab J.A., Kadhim D.J. Real-Time SLAM Mobile Robot and Navigation Based on Cloud-Based Implementation // Research Article, – 2023. – Vol. 2023, Article ID 9967236.
5. Basic Principles of Inertial Navigation // Seminar on inertial navigation systems. Tampere University of Technology. 17 April 2018. URL: [http:// atlas.physics.arizona.edu/~kjohns/downloads/inertial/InertialNavigationSystems.pdf](http://atlas.physics.arizona.edu/~kjohns/downloads/inertial/InertialNavigationSystems.pdf).
6. Pyo Y.S. ROS Robot Programming / Y.S. Pyo, H.Ch. Cho, R.W. Jung, T.H. Lim. – Republic of Korea: ROBOTIS Co.,Ltd, 2017. – 460 p.
7. Юрьев А. Проецирование положения объектов с камеры видеонаблюдения на карту, используя лишь школьную геометрию // Блог компании Singularis. 13 июня 2021. URL: <https://habr.com/ru/companies/singularis/articles/561008/>.
8. Robotis e-Manual. TurtleBot3 // ROBOTIS. 2023. URL: <https://manual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/overview/>.