ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТРОЛЯ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА «КОЛЕСО ИЛОНА»

RESEARCH ON THE MOTION DIRECTION CONTROL OF MECANUM WHEEL MOBILE ROBOT

Чжан Чэнпэн, студент**,** Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана.

Zhang Chengpeng, Student, Bauman Moscow State Technical University.

Аннотация

В классической универсальной конструкции колеса Колесо Илона играет очень важную роль в использовании четырехколесных роботов. Колесо Илона имеет широкие перспективы практического использования, например, в качестве логистических роботов на складах и всенаправленных мобильных инвалидных колясок. Данная работа в целом посвящена исследованию управления движения четырехколесного мобильного робота на основе Колеса Илона. Она предполагает два различных режима движения, а именно, когда направление передней части конструкции не меняется и когда направление меняется. Анализируется движение и дается метод измерения, а также теоретические исследования.

Summary

Mecanum wheel caster as a classical structure, with a very important position in the four-wheel robot. Mecanum wheels have broad prospects in practical use, such as logistics robots in warehouses and omnidirectional mobile wheelchairs. This article is mainly aimed at the research on the motion control of the four-wheel mobile robot based on the Mecanum wheel. It assumes two different motion modes, namely, the direction of the front of the car is unchanged and the direction changes. The motion is analyzed and the measurement method is given. Determine the measurement method and complete the theoretical research.

Ключевые слова: колесо Mecanum, датчик, машинное зрение, управление движением, фильтр Калмана.

Keywords: Mecanum wheel, sensor, machine vision, motion control, Kalman filter.

Колесо Илона и его кинематический анализ

Как показано на рисунке, это карта движения колеса робота.

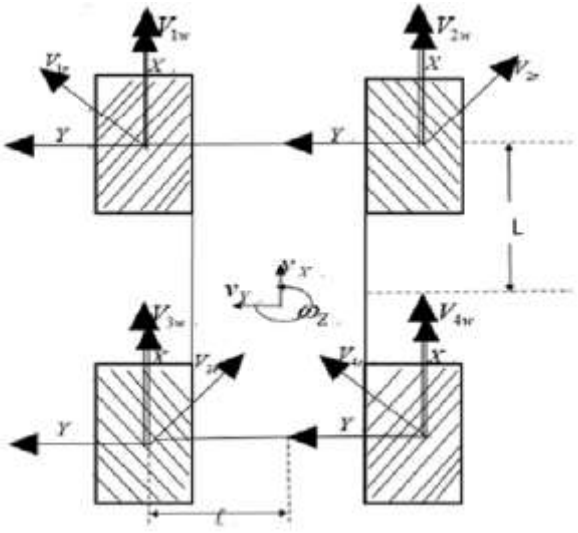

рис 1

Среди них $V_{iw}(\mathrm{i}=1,2,3,4) \in R^{4\times1}$ это скорость движения четырех колес, а$V_{iw} = R_w \times w_{iw}$, Где R_w - радиус колеса, w_{iw} - угловая скорость вращения каждого колеса, ， $V_{ir}(\mathrm{i}=1,2,3,4) \in R^{4\times1}$- контакт колеса Вектор тангенциальной скорости у пола. V_{iX} состоит из скорости вращения колеса V_{iw} и $V_{ir}/\cos 45°$. Точно так же V_{iY}состоит из V_{ir} и $V_{ir}/\sin 45°$.

$$V_{1X} = V_{1w} + \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}}, V_{1Y} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{2X} = V_{2w} + \frac{V_{2r}}{\sqrt{2}}, V_{1Y} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{3X} = V_{3w} + \frac{V_{3r}}{\sqrt{2}}, V_{1Y} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{4X} = V_{1w} + \frac{V_{4r}}{\sqrt{2}}, V_{1Y} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}}$$

получим：

$$V_{1X} = v_X - l \cdot \omega_z, V_{1Y} = v_Y + L \cdot \omega_z$$

$$V_{2X} = v_X + l \cdot \omega_z, V_{2Y} = v_Y - L \cdot \omega_z$$

$$V_{3X} = v_X - l \cdot \omega_z, V_{3Y} = v_Y + L \cdot \omega_z$$

$$V_{4X} = v_X + l \cdot \omega_z, V_{4Y} = v_Y - L \cdot \omega_z$$

Среди нихv_X， v_Y， ω_z представляют скорость общего движения автомобиля по оси X и оси Y, а также угловую скорость вращения в центре автомобиля, выраженную матрицей:

$$V_w = [V_{1w} \quad V_{2w} \quad V_{3w} \quad V_{4w}]^T$$

$$V_0 = [v_X \quad v_Y \quad v_Z]^T$$

Потом：

$$V_{1w} = v_X - v_Y - (L + l)\omega_z$$

$$V_{2w} = v_X + v_Y + (L + l)\omega_z$$

$$V_{3w} = v_X + v_Y - (L + l)\omega_z$$

$$V_{4w} = v_X - v_Y + (L + l)\omega_z$$

Индуктивные уравнения получают:

$$V_w = J \cdot V_0$$

$$J = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L + l) \\ 1 & 1 & (L + l) \\ 1 & 1 & -(L + l) \\ 1 & -1 & (L + l) \end{bmatrix} \in R^{4\times3}$$

J - матрица преобразования. Общая скорость автомобиля может быть получена по скорости четырех колес автомобиля. Напротив, общая скорость автомобиля может быть получена по скорости колес.

Анализ двух спортивных режимов

Предполагая два режима движения по свободной кривой Mecanum, первый заключается в выполнении движения с разложением кривой при условии, что направление движения автомобиля не меняется. Для него характерно то, что движение легко достичь, но эффект отслеживания траектории недостаточно точен; второй метод заключается в том, что при условии, что передняя часть автомобиля постоянно меняется, направление передней части автомобиля всегда совпадает с направлением движения кривой, и процесс движения можно рассматривать поскольку робот всегда движется по середине дороги, и направление всегда следует направлению дороги; его применение к изменяющемуся закону скорости в разных системах координат.

Способ управления передней частью автомобиля без прогиба

Из-за уникального режима движения мобильного робота, основанного на колесе Mecanum, в этой статье используется гипотетическое условие при изучении его особого состояния движения, то есть предполагается, что передняя часть автомобиля не будет изменяться при движении изгиб во время движения.

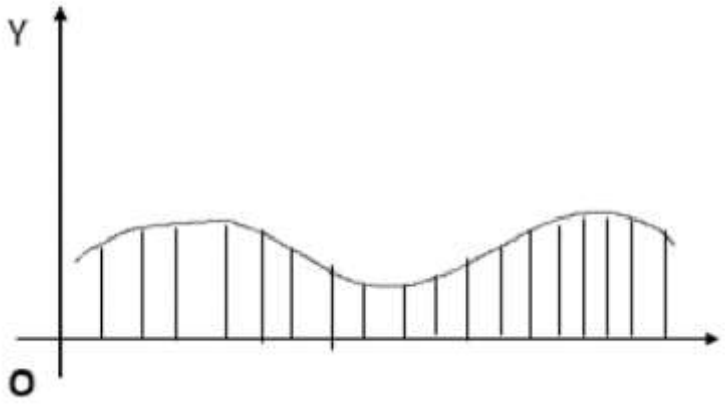

рис 2

Как показано на рисунке, кривая движения кривой движения y = y (x); в процессе движения, предполагая, что направление передней части автомобиля не отклоняется, мы разлагаем его кривое движение на движение по оси X ось и движение в направлении Y. Используется следующий метод: разделите кривую движения на множество небольших сегментов и выполните линейное движение в направлении оси X на каждом сегменте и линейное движение в направлении оси Y. Таким образом, каждый сегмент синтезируется. Движение сверху . В этом режиме метода движения мы предполагаем, что движение по оси X происходит с постоянной скоростью, а движение по оси Y - с переменной скоростью. Итак, мы разделим апеллирующую кривую движения на 4 небольшие части.

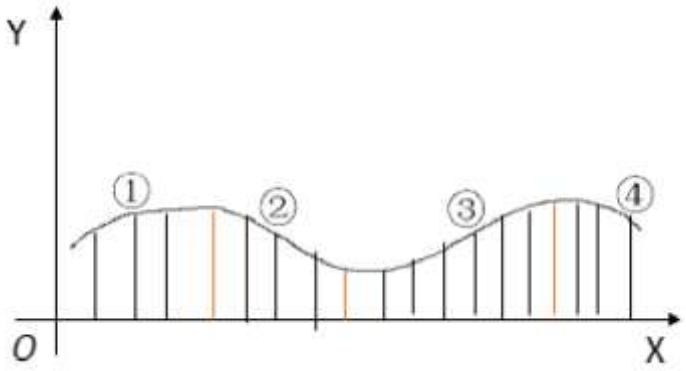

рис 3

Как показано на рисунке выше, в отдельной небольшой части вышеупомянутой кривой движения, такой как; можно видеть, что его движение в направлении оси Y монотонно увеличивается; напротив, на кривой ② его движение в направлении оси Y она монотонно убывает, поэтому при разбиении всей кривой на мелкие части ее следует разбивать в соответствии с точкой монотонного деления кривой.

Кроме того, мы предполагаем, что движение в направлении оси X является равномерным линейным движением, и небольшой интервал времени (то есть время выборки) дается для достижения движения с переменной скоростью в направлении оси Y; время выборки определяет плавность в направлении оси Y. Она также определяет совпадение синтезированной кривой движения и заданной кривой движения.

Поэтому, когда передняя часть автомобиля не прогибается, с к о движения по оси X, v_x, дистанция движения:

$$x = \sum_{1}^{n} v_x * \Delta t$$

1) Δt - время выборки. Расстояние перемещения x в указанном

направлении оси X представляет собой накопление расстояния перемещения в каждом предыдущем Δt.

2) В направлении Y реализуйте управление небольшим сегментом (например, ①) путем ускорения и замедления.
3) На предыдущем шаге 2) как определить, когда ускоряться, а когда замедляться, поэтому мы ввели параметр Partition-point с размером от 0 до 1. Следовательно, точка разделения ускорения и замедления находится в средней точке оси Y монотонного сегмента.
4) Рассчитайте время ускорения и время замедления через точку разделения; время ускорения и замедления используется для подтверждения соответствующей временной точки и в сочетании со временем выборки для подтверждения того, на сколько сегментов делится процесс движения.
5) Для каждого Δt в соответствии с изменением направления Y подтвердите ускорение a и найдите соответствующую начальную скорость v_0.
6) Со скоростью v_y в направлении оси Y и v_x в направлении оси X, соответствующую скорость каждого колеса можно получить по формуле.

Метод контроля переднего прогиба

По сравнению с предыдущим разделом, когда голова транспортного средства отклонена, состояние движения основано на добавлении степени свободы на основе угловой скорости вращения головы, равной 0, то есть для

всего логистического робота в целом, $w = \dot{\theta}$. Прежде всего, нам необходимо знать соответствующую взаимосвязь между скоростями в разных системах координат, как показано на рисунке：

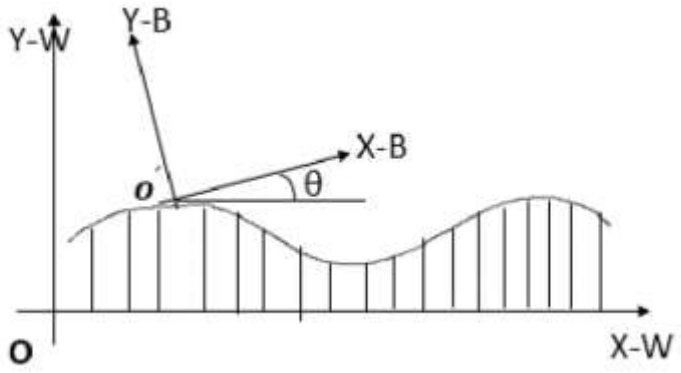

рис 4

Мы определяем параметр скорости $[v_x \quad v_y \quad w]^T$ в глобальной системе координат, а параметр скорости $[u \quad v \quad r]^T$ - в локальной системе координат, поэтому мы получаем отношение преобразования скорости из локальной системы координат B в глобальную систему координат W

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}$$

Следовательно, при условии заданной кривой движения траектории y = y (x); в глобальной системе координат задайте скорость движения по оси x как v_x; таким образом, связь между расстоянием движения и временем в X направление может быть：

$$X = v_x \cdot t$$

Отношение между расстоянием движения и временем в направлении Y равно：

$$Y = y(\mathrm{X}) = \mathrm{y}(v_x \cdot t)$$

А связь между величиной угла θ и временем равна

$$\theta = \frac{dY}{dX} = \frac{\frac{dY}{dt}}{\frac{dX}{dx}} = \frac{v_x \cdot \frac{dy(v_x \cdot t)}{dt}}{v_x} = \frac{\delta y(v_x \cdot t)}{\delta t}$$

Отсюда мы получаем теоретическое положение $[x(\mathrm{t}) \quad \mathrm{y}(\mathrm{t}) \quad \theta(\mathrm{t})]^{\mathrm{T}}$ в соответствующее время, и в то же время мы можем получить взаимосвязь между теоретическим значением скорости и временем, соответствующим каждой временной точке $\left[\dot{x} \quad (t) \quad \dot{y}(t) \quad \dot{\theta}(t)\right]^T$, локальную скорость можно получить из глобальной скорости, используя соотношение соответствия скоростей между глобальной системой координат W и локальной системой координат B：

$$\left[\dot{u}(\mathrm{t}) \quad \dot{\mathrm{v}}(\mathrm{t}) \quad \dot{\mathrm{r}}(\mathrm{t})\right]^T = \begin{bmatrix} \cos\theta(\mathrm{t}) & \sin\theta(\mathrm{t}) & 0 \\ -\sin\theta(\mathrm{t}) & \cos\theta(\mathrm{t}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\dot{x}(\mathrm{t}) \quad \mathrm{y}(\mathrm{t}) \quad \theta(\mathrm{t})]$$

Отсюда мы можем получить выражение скорости и времени каждого колеса

$$V_{\mathrm{w}}(\mathrm{t}) = J \cdot \left[\dot{u}(\mathrm{t}) \quad \dot{\mathrm{v}}(\mathrm{t}) \quad \dot{\mathrm{r}}(\mathrm{t})\right]^T$$

Но полученный $[\dot{u}(\mathrm{t})\dot{\mathrm{v}}(\mathrm{t})\dot{\mathrm{r}}(\mathrm{t})]^T$ и $V_{\mathrm{w}}(\mathrm{t})$ - это только ожидаемые скорости. В фактическом движении будут нарушения, включая ошибки в обработке изображений и ошибки в процессе движения, поэтому нам нужно определить положение Сам логистический робот и направление головы транспортного средства могут найти более точную $V_{\mathrm{w}}(\mathrm{t})$.

Модель измерения положения логистического робота и угла головы

В универсальном мобильном логистическом роботе на базе четырех механических колес его мультисенсорная система в основном включает в себя два аспекта: объединение нескольких датчиков, используемое в этом методе,

включает бортовые датчики, включая датчик вала двигателя, акселерометр и гироскоп. Измерьте скорость каждого колеса робота, а также угловую скорость движения; также есть датчик обзора, используемый для определения положения и угла поворота робота.

В соответствии с уравнением используйте уравнение EULER, чтобы получить, когда интервал времени равен T：

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \theta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ \theta_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1} \cdot T & -\sin\theta_{n-1} \cdot T & 0 \\ -\sin\theta_{n-1} \cdot T & \cos\theta_{n-1} \cdot T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{\mathrm{n-1}} \\ \hat{v}_{\mathrm{n-1}} \\ \hat{r}_{\mathrm{n-1}} \end{bmatrix}$$

В роботе, движущемся во всех направлениях, состояние его собственного движения может быть получено с помощью бортовых датчиков, а информация о местоположении может быть получена с помощью визуальных датчиков. Предположим, собственное движение робота определяется как$[\hat{u}_n \quad \hat{v}_n \quad \hat{r}_n]^T$ в n-й момент времени.

$$[\hat{u}_n \quad \hat{v}_n \quad \hat{r}_n]^T = [u_n \quad v_n \quad r_n]^T + \left[\mathrm{nv}_{1,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{2,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{3,\mathrm{n}}\right]^T$$

Среди них $\left[\mathrm{n}_{1,k}, \mathrm{n}_{2,k}, \mathrm{n}_{3,k}\right]^T$ - ошибка, измеренная самим роботом. То же самое верно для положения, измеренного датчиком обзора$[z_{1,n} \quad z_{2,n} \quad z_{3,n}]^T$ в n-й момент времени

$$[z_{1,n} \quad z_{2,n} \quad z_{3,n}]^T = [x_n \quad y_n \quad \theta_n]^T + \left[\mathrm{np}_{1,n}, \mathrm{np}_{2,n}, \mathrm{np}_{3,n}\right]^T$$

Где $\left[\mathrm{nv}_{1,k}, \mathrm{nv}_{2,k}, \mathrm{nv}_{3,k}\right]^T$ и $\left[\mathrm{nv}_{1,k}, \mathrm{nv}_{2,k}, \mathrm{nv}_{3,k}\right]^T$ мы предполагаем, что он подчиняется нормальному распределению, поэтому

$$p\left(\mathrm{nv}_{1,k}, \mathrm{nv}_{2,k}, \mathrm{nv}_{3,k}\right) \sim \mathrm{N}(0, \mathrm{Q})$$
$$p\left(\mathrm{np}_{1,k}, \mathrm{np}_{2,k}, \mathrm{np}_{3,k}\right) \sim \mathrm{N}(0, \mathrm{R})$$

Где $\mathrm{Q} \in R^{3\times3}$ - ковариационная матрица бортовых измерений, а $\mathrm{R} \in$

$R^{3\times3}$ - ковариационная матрица визуальных измерений.

Используйте нелинейный фильтр Калмана для измерения положения и направления головы

Сначала определите $[x_n^-\quad y_n^-\quad \theta_n^-]^T$ как прогнозируемое значение, которое вычисляется и выводится через n-1-ю позицию. Математическая формула

$$\begin{bmatrix} x_n^- \\ y_n^- \\ \theta_n^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{y}_{n-1} \\ \hat{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1}\cdot T & -\sin\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ -\sin\theta_{n-1}\cdot T & \cos\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{n-1} \\ \hat{v}_{n-1} \\ \hat{r}_{n-1} \end{bmatrix}$$

Мы определяем прогнозируемое положение наблюдения зрительной системы как$[z_{1,\mathrm{n}}^-\quad z_{2,\mathrm{n}}^-\quad z_{3,\mathrm{n}}^-]^T$, где$[z_{1,\mathrm{n}}^-\quad z_{2,\mathrm{n}}^-\quad z_{3,\mathrm{n}}^-]^T = [x_n^-\quad y_n^-\quad \theta_n^-]^T$

Мы знаем, что прогноз неточный. Также есть ошибки между предсказанным значением, наблюдаемым в зрительной системе, и значением, полученным фактической зрительной системой. Есть два типа классификации ошибок: первый - это временной интервал, через который проходит скорость на n-1-й момент. Ошибка положения между предсказанием положения и фактическим положением, полученным T в n-й момент времени, определяется как $[e_{xn}\quad e_{yn}\quad e_{zn}]^T$и

$$\begin{bmatrix} ex_n \\ ey_n \\ ez_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n^- \\ y_n^- \\ \theta_n^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{1,n} \\ z_{2,n} \\ z_{3,n} \end{bmatrix}$$

Путем линеаризации уравнения в соответствии с фактическим положением тележки можно получить оценку динамической ошибки, уравнение выглядит следующим образом:

$$\begin{bmatrix} e_{xn} \\ e_{yn} \\ e_{zn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta_{n-1}\cdot u_{n-1}\cdot T - \cos\theta_{n-1}\cdot v_{n-1}\cdot T \\ 0 & 1 & \cos\theta_{n-1}\cdot v_{n-1}\cdot T - \sin\theta_{n-1}\cdot u_{n-1}\cdot T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{y}_{n-1} \\ \hat{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ \theta_{n-1} \end{bmatrix} \Bigg)$$

$$+ \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1}\cdot T & -\sin\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ \sin\theta_{n-1}\cdot T & \cos\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left[\mathrm{nv}_{1,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{2,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{3,\mathrm{n}}\right]^T$$

$$\begin{bmatrix} ex_n \\ ey_n \\ ez_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{xn} \\ e_{yn} \\ e_{zn} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathrm{np}_{1,n} \\ \mathrm{np}_{1,n} \\ \mathrm{np}_{1,n} \end{bmatrix}$$

В формуле$[\hat{x}_{n-1} \quad \hat{y}_{n-1} \quad \hat{\theta}_{n-1}]^T - [x_{n-1} \quad y_{n-1} \quad \theta_{n-1}]^T$ на самом деле является оценкой ошибки во время n-1, но реальное значение управления положением и скоростью во время n-1 равно. не знаю, но теоретическое положение и теоретическая скорость известны . Поэтому, чтобы приблизить траекторию к заданной кривой, мы заменяем фактическое значение теоретическим значением, а затем линеаризуем нелинейное выражение, чтобы получить:

$$\begin{bmatrix} e_{xn} \\ e_{yn} \\ e_{zn} \end{bmatrix} = \mathrm{A}_{k-1} \left(\begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{y}_{n-1} \\ \hat{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{x}_{n-1} \\ \bar{y}_{n-1} \\ \bar{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} \right) + B_{k-1} \cdot \left[\mathrm{nv}_{1,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{2,\mathrm{n}}, \mathrm{nv}_{3,\mathrm{n}}\right]^T$$

$$\mathrm{A}_{k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta_{n-1}\cdot \bar{u}_{n-1}\cdot T - \cos\theta_{n-1}\cdot \bar{v}_{n-1}\cdot T \\ 0 & 1 & \cos\theta_{n-1}\cdot \bar{v}_{n-1}\cdot T - \sin\theta_{n-1}\cdot \bar{u}_{n-1}\cdot T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B_{k-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1}\cdot T & -\sin\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ \sin\theta_{n-1}\cdot T & \cos\theta_{n-1}\cdot T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Согласно уравнению может быть построен нелинейный фильтр Калмана, который можно просто понимать как получение оптимального истинного значения через предсказанное значение положения и угла в n-й раз и отображаемое значение визуальной системы, но предсказанное значение Сам по

себе имеет ошибки. Отображаемое значение зрительной системы также колеблется.

Первый шаг: используйте значение скорости при обратной связи по времени n-1 от установленного на транспортном средстве датчика $[\hat{u}_{n-1} \quad \hat{v}_{n-1} \quad \hat{r}_{n-1}]^T$ для оценки положения в n-й раз

$$\begin{bmatrix} x_n^- \\ y_n^- \\ \theta_n^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{n-1} \\ \hat{y}_{n-1} \\ \hat{\theta}_{n-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\theta_{n-1} \cdot T & -\sin\theta_{n-1} \cdot T & 0 \\ -\sin\theta_{n-1} \cdot T & \cos\theta_{n-1} \cdot T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_{n-1} \\ \hat{v}_{n-1} \\ r_{n-1} \end{bmatrix}$$

Шаг 2. Обновите ковариационную матрицу значения измерения скорости бортового датчика.

$$Q_k = B_k \cdot Q_{k-1} \cdot B_k^T$$
$$P_k^- = A_k \cdot P_{k-1} \cdot A_k^T + Q_k$$

Шаг 3. Исправьте коэффициент усиления Калмана.

$$K_k = P_k^-(P_k^- + R)^{-1}$$
$$P_k = (I - K_k)P_k^-$$

ГдеP_k - ковариация шума, выводимая визуальной системой; поэтому на основе оптимального значения оценки положения при фильтрации Калмана.

$$[\hat{x}_n \quad \hat{y}_n \quad \hat{\theta}_n]^T = [x_n^- \quad y_n^- \quad \theta_n^-]^T + K_k([z_{1,n} \quad z_{2,n} \quad z_{3,n}]^T - [x_n^- \quad y_n^- \quad \theta_n^-]^T)$$

Подведение итогов

В этой статье в основном рассматривается взаимосвязь между общей скоростью и локальной скоростью четырехколесного робота на основе колеса Mecanum, анализируются два режима движения и используются сенсорные технологии для определения положения и скорости робота. Во-первых, подробно описывается проблема достижения свободного движения всенаправленного робота, изучаемого в этой статье. Основными рассматриваемыми проблемами

являются непостоянство движения, скорость и время прерывистого движения, а также ошибка прогнозирования положения и фактического значения. Далее мы представим два вида режимов движения для реализации проблемы, изучаемой в этой статье: первый - это декомпозиция состояния движения; второй - метод преобразования выражения скорости в различных системах координат. Второй - измерение положения и направления курса на основе технологии объединения нескольких датчиков: включая бортовые датчики (включая энкодеры вала двигателя, акселерометры и гироскопы) и визуальные датчики в сочетании с обычно используемым методом фильтра Калмана для определения положения и направление направления Фактическое измерение. В этой статье улучшены и обновлены классические методы измерения положения и угла.

Литература

1. [1] Б. Баршан и Х. Ф. Даррант-Уайт. Инерциальные навигационные системы для мобильных роботов. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 11 (3): 328 {342, июнь 1995.
2. [2] С.И. Румелиотис, Г.С. Сухатме, Г.А. Бекей. Трехмерная оценка положения мобильных роботов на основе более гладкого подхода. В материалах Международной конференции IEEE 1999 г. по робототехнике и автоматизации, май 1999 г.
3. [3] Р. Г. Браун и П. Ю. К. Хванг, Введение в случайные сигналы и применяемую фильтрацию Калмана: с упражнениями и решениями MATLAB, 3-е изд., Wiley, New York.

4. [4] Дж. Ричард и Н. Д. Сигпурвалла, «Понимание фильтра Калмана», «Американский статистик», май 1983 г., том 37, № 2.
5. [5] Дж. Дж. Чжу, А. С. Ходел, К. Фанстон, К. и К. Э. Холл, «Проектирование полетного контроллера начального уровня X-33 путем линеаризации траектории - сингулярный пертурбационный подход», AAS-01-012, Конференция Американского астронавтического общества по руководству и управлению. , Брекенридж, Колорадо, январь 2001 г.
6. [6] Li Shi gang Управление движением на основе мобильного робота MECANUM wheel Tsinghua University 2018.

Literature

1. [1] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte. Inertial navigation systems for mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 11(3):328{342, June 1995.
2. [2] S.I. Roumeliotis, G.S. Sukhatme, and G.A. Bekey. Smoother based 3-d attitude estimation for mobile robot localization. In Proceedings of the 1999 IEEE International Conference in Robotics and Automation, May 1999.
3. [3] R. G. Brown, and P. Y. C. Hwang, Introduction to random signals and applied Kalman filtering : with MATLAB exercises and solutions, 3rd ed, Wiley, New York.
4. [4] J. Richard and N. D. Sigpurwalla, “Understanding the Kalman Filter”, The American Statistician, May 1983, Volume 37, N0. 2 .

5. [5] J. J. Zhu, A. S. Hodel, K. Funston, K. and C. E. Hall, “X-33 entry flight controller design by trajectory linearization - a singular perturbational approach,” AAS-01-012, American Astronautical Society Guidance and Control Conference, Breckenridge, Colorado, Jan. 2001.
6. [6] Li Shi gang Motion control based on MECANUM wheel mobile robot Tsinghua University 2018.