

Система локализации робота на основе полусферической камеры

Александр Овчинников, Хоа Фан
Кафедра Радиоэлектронники

Тульский Государственный Университет, Тула, Россия
admin_telex@mail.ru, dolphin22a@yahoo.com

Аннотация

В данной статье рассматривается задача локализации робота с помощью комбинированной системы на основе одометра и полусферической камеры. Измерения азимутальных углов выполненные на основе данных от полусферической камеры корректируют накапливаемую погрешность одометра по предложенному алгоритму, основанному на расширенном фильтре Калмана. На основе Unscented Transform предложен алгоритм инициализации вертикальных линий, который обеспечивает более точную оценку плотности распределения вероятностей координат вертикальных линий по сравнению с часто используемым фильтром Калмана.

Ключевые слова: локализация, полусферическая камера, расширенный фильтр Калмана, Unscented Transform.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для управления мобильными объектами (далее роботами) в автономном режиме главной является задача локализации, которая позволяет оценивать текущие координаты робота с максимальной возможной точностью при наличии различного рода шумов и помех. Данная задача часто решается с помощью встроенных в роботе датчиков (например, одометр, датчики расстояний) или внешних ориентиров. Самостоятельное использование систем локализации на базе датчиков расстояний или одометра затруднительно из-за наличия накапливаемой во времени погрешности по определению параметров движения робота. Это, в свою очередь, породило разработку комбинированных систем. Принцип работы таких систем, в основном, основан на калмановской фильтрации, которая рекурсивно оценивает вектор состояний системы по последовательной двухэтапной процедуре - экстраполяции и коррекции.

В последнее время всё больший интерес вызывает разработка комбинированных систем на основе систем технического зрения (СТЗ). Однако двумерные изображения, формируемые СТЗ, не позволяют полностью решить задачу локализации, т.к. они не содержат информации о глубине изображения. Для устранения данного недостатка требуются два или более изображения, полученные с различных ракурсов для определения координат интересующих объектов, что влечет за собой использование в СТЗ нескольких камер размещенных в пространстве. Модель измерения на основе СТЗ с двумя и более камерами характеризуется высокой степенью нелинейности, которая приводит к неточной оценке плотности распределения вероятностей измерений по методу расширенного фильтра Калмана [1]. Кроме того, точность определения координат объектов зависит от смещения между кадрами, которое связано с углом параллакса между позициями СТЗ до объекта.

В работе [1] представлен стандартный алгоритм локализации на основе СТЗ, но не рассмотрено влияние нелинейности модели наблюдения на результат обработки алгоритма.

Игнорирование нелинейностей и предельное упрощение ситуации может существенно снизить эффективность алгоритмов оценивания координат в реальных системах локализации. В работе [2] предложен метод оценки одномерной плотности распределения вероятностей наблюдений, который по времени наблюдения улучшает её аппроксимацию, но при этом требует высоких вычислительных затрат.

В данной работе предлагается алгоритм локализации робота на основе комбинированной системы включающей одометр и полусферическую камеру. Рассмотрены вопросы инициализации характерных объектов, приведены результаты экспериментальных исследований.

2. РАЗРАБОТКА РАСШИРЕННОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ РОБОТА

Известные системы локализации при обработке информации от датчиков опираются на оптимальную фильтрацию на основе фильтра Калмана, который рассматривает состояние системы как гауссовое распределение, и постоянно оценивает математическое ожидание и ковариационную матрицу его апостериорной плотности распределения вероятностей [3]. Для нелинейных систем используется расширенный фильтр Калмана - нелинейная система линеаризуется с помощью разложения в ряд Тейлора с последующим отбрасыванием членов ряда выше первой степени.

Использование полусферической камеры в системе локализации робота подразумевает трансформацию известных алгоритмов обработки данных на основе расширенного фильтра Калмана с целью обеспечения возможности использования последовательных измерений выполняемых видеокамерой для формирования оптимальной оценки состояния робота.

Объектами измерений полусферической камеры являются вертикальные линии в пространстве, изображение которых имеют вид радиальной линии на плоскости изображения, формируемого полусферической камерой. Вертикальные линии выделяются на каждом кадре изображения и идентифицируются между кадрами (рис.1) на основе алгоритма ранее разработанного авторами. Это позволяет инициализировать координаты вертикальных линий и корректировать априорные измерения.

Пусть состояние робота описывается вектором $\mathbf{x}_R = [x_r \ y_r \ \phi_r]^T$, где x_r , y_r , ϕ_r - соответственно координаты и направление робота глобальной системе координат; под координатами вертикальных линий $\mathbf{x}_L = [x_L \ y_L]^T$ подразумевается проекция данных линий на горизонтальную плоскость. Вектор состояний системы в шаге k $\mathbf{x}[k] = [x_R^T[k] \ x_{L_1}^T[k] \ \dots \ x_{L_n}^T[k]]^T$ состоит из состояния робота и координат совокупности наблюдаемых вертикальных линий. В расширенном фильтре Кальмана вектор состояний $\mathbf{x}[k]$

рассматривается как гауссовская переменная с ковариационной матрицей $\mathbf{P}[k]$, имеющей следующий вид:

$$\mathbf{P}[k] = \begin{bmatrix} rr & rl \\ lr & ll \end{bmatrix},$$

где rr – ковариационная матрица состояния робота; ll – ковариационная матрица координат совокупности наблюдаемых вертикальных линий; rl , lr – ковариационная матрица состояния робота и координат вертикальных линий, при этом $\mathbf{P}_{rl} = \mathbf{P}_{lr}^T$.

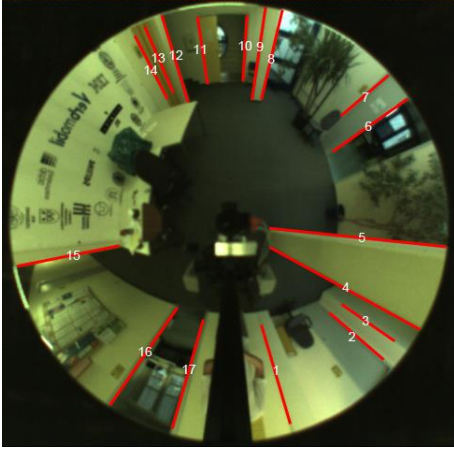


Рис. 1. Результат выделения и инициализации вертикальных линий на полусферическом изображении

Структурная схема алгоритма локализации робота на основе расширенного фильтра Калмана представлена на рис. 2.

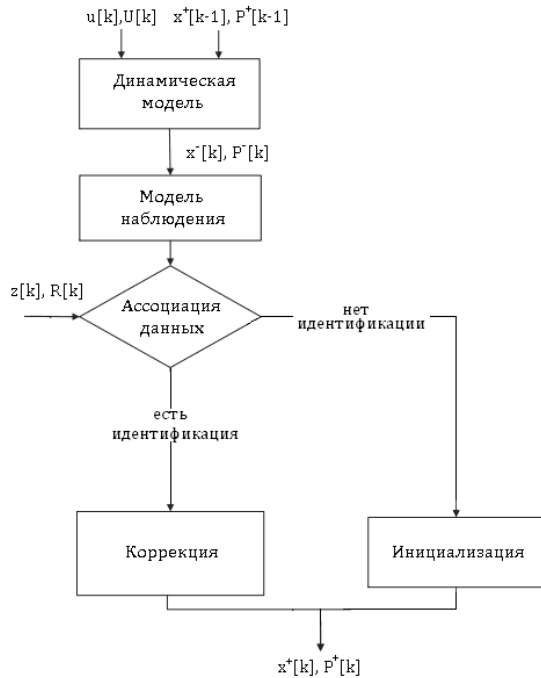


Рис. 2. Структурная схема предложенного алгоритма.

В шаге k сначала проводится экстраполяция, при которой получается априорная оценка вектора состояний системы $\mathbf{x}^-[k]$ по его апостериорной оценке с предыдущего шага на

основе динамической модели системы. Процесс экстраполяции описывается динамической моделью изменения вектора состояний:

$$\mathbf{x}^-[k] = \begin{bmatrix} x_r^-[k] \\ y_r^-[k] \\ \phi_r^-[k] \\ x_{L_1}^-[k] \\ \vdots \\ x_{L_n}^-[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x_r^+[k-1], \mathbf{u}[k], \mathbf{w}[k]) \\ x_{L_1}^+[k-1] \\ \vdots \\ x_{L_n}^+[k-1] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} x_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\cos(\phi_r^+[k-1] + \gamma[k]) \\ y_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\sin(\phi_r^+[k-1] + \gamma[k]) \\ \phi_r^+[k-1] + \Delta t[k]V[k]\frac{\sin(\gamma[k])}{L} \\ x_{L_1}^+[k-1] \\ \vdots \\ x_{L_n}^+[k-1] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_x[k] \\ w_y[k] \\ w_\phi[k] \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{u}[k] = [V[k] \ \gamma[k]]^T$ – вектор управляющих воздействий, который состоит из скорости движения и угла поворота робота; $\mathbf{w}[k] = [w_x[k] \ w_y[k] \ w_\phi[k]]^T$ – вектор шумов состояния робота; L – длина робота.

Ковариационная матрица экстраполированного вектора состояний определяется:

$$\bar{\mathbf{P}}[k] = \begin{bmatrix} \bar{rr}[k] & \bar{rl}[k] \\ \bar{lr}[k] & \bar{ll}[k] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_R \bar{r}^+[k-1]\mathbf{F}_R^T + \mathbf{F}_U \mathbf{U}[k]\mathbf{F}_U^T + \mathbf{Q}[k] & \mathbf{F}_R \bar{rl}^+[k-1] \\ \bar{rl}^+[k-1]\mathbf{F}_R^T & \bar{ll}^+[k-1] \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{U}[k] = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\gamma^2 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q}[k] = \begin{bmatrix} \sigma_{w_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{w_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{w_\phi}^2 \end{bmatrix}$ –

ковариационная матрица шумов управляющих воздействий и состояния робота; $\mathbf{F}_R = \nabla_{x_R} \mathbf{f}$, $\mathbf{F}_U = \nabla_{\mathbf{u}} \mathbf{f}$ – матрицы Якоби векторной функции $\mathbf{f}(\mathbf{x}_R, \mathbf{u}, \mathbf{w})$ относительно состояния робота и вектора управляющих воздействий.

В шаге k полусферическая камера наблюдает набор вертикальных линий, координаты некоторых из них были оценены в предыдущих шагах. Измерения азимутальных углов вертикальных линий, которые повторно наблюдаются, используются для вычисления ошибки от измерений, ожидаемых при произведенной экстраполяции вектора состояний системы:

$$\mathbf{v}[k] = \mathbf{z}[k] - \mathbf{z}^-[k] = \mathbf{z}[k] - \mathbf{h}(\mathbf{x}^-[k], \mathbf{v}[k]);$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}^-[k], \mathbf{v}[k]) = \arctg\left(\frac{y_r^-[k] - y_L[k]}{x_r^-[k] - x_L[k]}\right) - \phi_r^-[k] + \mathbf{v}[k],$$

где $\mathbf{h}(\mathbf{x}[k], \mathbf{v}[k])$ – векторная функция наблюдения; и $\mathbf{v}[k]$ – вектор гауссовских шумов измерений.

Аналогично, ковариационная матрица вектора ошибки вычисляется с помощью матрицы Якоби функции наблюдения в $\mathbf{x}^-[k]$:

$$\mathbf{S}[k] = \mathbf{H}_R \bar{rr}[k]\mathbf{H}_R^T + \mathbf{H}_R \bar{rl}[k]\mathbf{H}_L^T + \mathbf{H}_L \bar{lr}[k]\mathbf{H}_R^T + \mathbf{H}_L \bar{ll}[k]\mathbf{H}_L^T + \mathbf{R}[k],$$

где $\mathbf{H}_R = \nabla_{x_R} \mathbf{h}$, $\mathbf{H}_L = \nabla_{x_L} \mathbf{h}$ – матрицы Якоби векторной функции $\mathbf{h}(\mathbf{x}_v, \mathbf{v})$ относительно вектора состояния робота и координат вертикальных линий; $\mathbf{R}[k]$ – ковариационная матрица шумов наблюдений.

В случае, что инициализированные вертикальные линии в предыдущих шагах наблюдаются в текущем шаге, априорную оценку вектора состояний системы могут корректировать на основании ковариационной матрицы имеющейся

экстраполяции вектора состояний и полученных измерений. Коррекция ранее полученной априорной оценки вектора состояний с помощью текущими измерениями является апостериорной оценкой вектора состояний системы:

$$\mathbf{x}^+[k] = \mathbf{x}^-[k] + \mathbf{K}[k]\mathbf{v}[k].$$

Матрица коэффициентов усиления Калмана $\mathbf{K}[k]$ определяется по формуле:

$$\mathbf{K}[k] = -[k](\nabla_x \mathbf{h}[k])^T (\mathbf{S}[k])^T.$$

Наконец, ковариационная матрица апостериорной оценки вектора состояний системы определяется:

$$\mathbf{S}^+[k] = \mathbf{S}^-[k] - \mathbf{K}[k]\mathbf{S}[k](\mathbf{K}[k])^T.$$

3. АЛГОРИТМ ИНИЦИАЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Под инициализацией вертикальных линий подразумевается оценка их координат; оценка ковариационной матрицы их координат и ковариационной матрицы их координат с компонентами текущего вектора состояний системы, чтобы далее прибавить их к текущему вектору состояний и ковариационной матрице системы.

Известно, что для инициализации вертикальной линии необходимо её наблюдение с различных позиций робота. Такая модель, как было показано выше, характеризуется высокой степенью нелинейности, особенно при малом угле параллакса [5]. Поэтому при прохождении через эту модель измерения гауссовская форма плотности распределения вероятностей координат вертикальных линий сильно искажена и неточно оценивается с помощью только двух моментов (мат. ожидание и ковариационная матрица) по методу расширенного фильтра Калмана. Для преодоления данной проблемы предлагается алгоритм инициализации вертикальных линий, который улучшает оценку плотности распределения вероятности координат вертикальных линий.

3.1 Оценка координат вертикальных линий

Пусть робот наблюдает вертикальные линии в n разных позициях, которые выражаются проекционными матрицами \mathbf{M}_i ($i = 1 \dots n$) относительно первой позиции наблюдения вертикальной линии. Матрица \mathbf{M}_i определяет пространственное преобразование (поворот, трансляция) между позициями робота относительно первой позиции:

$$\mathbf{M}_1 = [\mathbf{I} | \mathbf{0}];$$

$$\mathbf{M}_i = [\mathbf{R}_i | \mathbf{t}_i] \quad (i = 2 \dots n),$$

где $\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \sin\theta_i \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}$ - матрица поворота; $\mathbf{t}_i = [t_{ix} \quad t_{iy}]^T$ - вектор трансляции; θ_i, t_{ix}, t_{iy} являются углом поворота, трансляцией по Ox, Oy робота в позиции i относительно первой и определяются апостериорными оценками соответствующих шагов.

Пусть координаты вертикальной линии относительно первой позиции робота выражаются в двухмерном проективном пространстве в виде $\mathbf{x}_L = [x_L \quad y_L \quad 1]^T$. Изображение вертикальной линии, формируемое полусферической камерой, является радиальной линией, которая характеризуется измерением азимутального угла $z = \theta$. Поэтому координаты изображения вертикальной линии могут быть выражены по формуле $\mathbf{u} = [\cos\theta \quad \sin\theta]^T = [u_1 \quad u_2]^T$.

За счет того, что азимутальные углы вертикальной линии и её изображения одинаковы, соотношение между их координатами в одной системе координат определяется скалярным параметром λ :

$$\lambda_i \mathbf{u}_i = \mathbf{M}_i \mathbf{x}_L.$$

Координаты вертикальной линии \mathbf{x}_L определяются пересечением прямых $\lambda_i \mathbf{u}_i$. Система уравнений в матричном виде имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & \mathbf{u}_1 & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_2 & \mathbf{0} & \mathbf{u}_2 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{M}_n & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{u}_n \end{bmatrix} [\mathbf{x}_L \quad -\lambda_1 \quad -\lambda_2 \quad \dots \quad -\lambda_n]^T = \mathbf{0}.$$

За счет наличия шумов оценок состояния робота и измерений азимутальных углов, прямые $\lambda_i \mathbf{u}_i$, в общем случае, не пересекаются в одной точке. Для решения данной системы уравнений предлагается применить метод сингулярного разложения, который обеспечивает решение с минимальной ошибкой соответствующее наименьшему сингулярному числу матрицы коэффициентов системы.

3.2 Оценки плотности распределения вероятностей вертикальных линий

Оценка плотности распределения вероятностей координат вертикальных линий основана на методе Unscented Transform [4]. Поскольку не существует единого отечественного терминологического аналога, мы предлагаем, что использовано оригинальное авторское название Unscented Transform (UT). Сущность метода заключается в том, что ансамбль \mathbf{x} содержащий $2n + 1$ взвешенных точек, называемых сигма-точками [4], используется для описания плотности распределения вероятностей случайной величины; вместо математического ожидания и ковариационной матрицы сигма-точки преобразуются нелинейной системой и в результате математическое описание и ковариационная матрица преобразованных сигма-точек описывает аппроксимацию искомой плотности распределения вероятностей.

Для применения метода UT необходимо задать вектор оценки $\boldsymbol{\mu}$, который состоит из состояний робота \mathbf{x}_{r_i} в n позициях и измерений азимутальных углов θ_i :

$$\boldsymbol{\mu} = [\mathbf{x}_{r_1}^T \quad \dots \quad \mathbf{x}_{r_n}^T \quad \theta_1 \quad \dots \quad \theta_n].$$

Ковариационная матрица вектора оценки $\boldsymbol{\mu}$ является диагональной матрицей, ненулевые элементы которой соответствуют дисперсии состояний робота и измерений. Взвешенные коэффициенты сигма-точек ансамбля \mathbf{x} определяются следующим образом:

$$\boldsymbol{\chi}_0 = \boldsymbol{\mu};$$

$$\boldsymbol{\chi}_i = \boldsymbol{\mu} + (\sqrt{(n + \rho)\mathbf{P}})_i \quad \text{для } i = 1 \dots n;$$

$$\boldsymbol{\chi}_i = \boldsymbol{\mu} - (\sqrt{(n + \rho)\mathbf{P}})_{i-n} \quad \text{для } i = n + 1 \dots 2n;$$

$$W_0^{(m)} = \frac{\rho}{n + \rho};$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\rho}{n + \rho} + (1 - \alpha^2 + \beta);$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(n + \rho)} \quad \text{для } i = 1 \dots 2n,$$

где $\rho = \alpha^2(n + \kappa) - n$ представляет собой коэффициент масштаба, при этом по [4] $\alpha = 10^{-3}$, κ часто равняется 0; $\beta = 2$; $(\sqrt{(n + \rho)\mathbf{P}})_i$ обозначает i -ую строку матрицы $\sqrt{(n + \rho)\mathbf{P}}$.

Далее проводится вычисление оценки координат вертикальных линий \mathbf{x}_{L_i} на основе соответствующего набора сигма-точек $\boldsymbol{\chi}_i$ по алгоритму показанному в п.3.1. Среднее

значение \bar{x}_L и ковариационная матрица P_l координат вертикальных линий определяются по формуле:

$$\bar{x}_L = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} x_{L_i};$$

$$P_l = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} (x_{L_i} - \bar{x}_L)(x_{L_i} - \bar{x}_L)^T.$$

\bar{x}_L является оценкой координат вертикальной линии относительно первой позиции робота, поэтому для нахождения её координат в глобальной системе координат необходимо провести геометрическое преобразование $g(\bar{x}_L, x_{R_1}, \theta_1)$, где x_{R_1} – вектор состояния робота на первой позиции:

$$\bar{x}_{L_n} = \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{r_1} + \bar{x}_L \cos(\phi_{r_1} + \theta_1) \\ y_{r_1} + \bar{y}_L \sin(\phi_{r_1} + \theta_1) \end{bmatrix}.$$

Ковариационная матрица новой вертикальной линии определяется с помощью матриц Якоби $G_{x_L} = \nabla_{\bar{x}_L} g$, $G_\theta = \nabla_{\theta_1} g$ и $G_{x_R} = \nabla_{x_{R_1}} g$:

$$P_n = G_{x_L} P_l G_{x_L}^T + G_{x_R} P_{r_1} G_{x_R}^T + G_\theta P_{\theta_1} G_\theta^T.$$

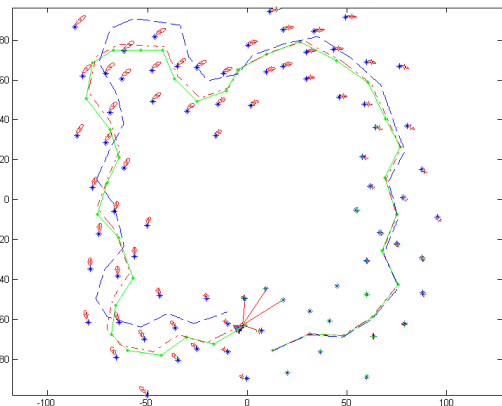
После инициализации математическое ожидание и ковариационная матрица вертикальных линий добавляются к вектору состояний и ковариационной матрице системы, соответственно. Ковариационные матрицы для существующих компонентов вектора состояний системы и новой вертикальной линии добавляются следующим образом:

$$x^+[k] = [x_r^+[k] \quad x_{l_1}^+[k] \quad \dots \quad x_{l_n}^+[k] \quad \bar{x}_{L_n}]^T,$$

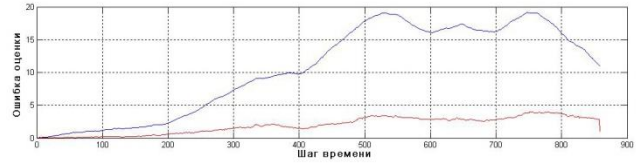
$$P^+[k] = \begin{bmatrix} P_{rr}^+ & P_{rl}^+ & P_{rn}^+ \\ P_{lr}^+ & P_{ll}^+ & P_{ln}^+ \\ P_{nr}^+ & P_{nl}^+ & P_{nn}^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{rr}^+ & P_{rl}^+ & P_{rn}^+ G_{x_R}^T \\ P_{lr}^+ & P_{ll}^+ & P_{ln}^+ G_{x_R}^T \\ G_{x_R} P_{rr}^+ & G_{x_R} P_{rl}^+ & P_{nn}^+ \end{bmatrix}.$$

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

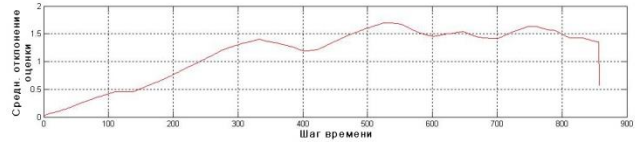
Для апробации предлагаемого алгоритма было разработано программное обеспечение для пакета MatLab моделирующее исследуемую среду размера 80м × 80м с заданными вертикальными линиями и траекторией движения робота. Робот движется по траектории с линейной скоростью 3 м/с и угловой скоростью 3 м/с. Среднеквадратические отклонения шумов одометра, установленного на робот составляют $\sigma_V = 0.3$ м/с, $\sigma_\gamma = 3$ градуса; и шума измерений полусферической камеры - $\sigma_\theta = 1$ градус.



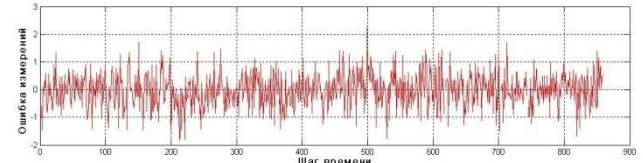
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. а) Результаты моделирование алгоритма локализации (зеленная траектория – заданная; красная, штриховая – оцененная предложенным алгоритмом траектория; синий, штрихпунктирная – траектория одометра; синие звезды - заданные вертикальные линии; красные плюсы – оцененные; красные эллипсы – ковариационная матрица координат вертикальных линий); б) ошибка оценки координат робота (красная – алгоритма, синяя - одометра); в) среднеквадратическое отклонение оценки координат робота; г) ошибка измерений

На рис. 3а показан результат моделирования предложенного алгоритма локализации. Очевидно, что при повышении накапливаемой погрешности одометра, адаптируя коэффициенты усиления Калмана для ошибки измерений, алгоритм корректирует погрешность одометра. Рис. 3б, 3в показаны ошибки и среднеквадратическое отклонение оценки координат робота для предложенного алгоритма и одометра. Очевидно, что неопределенность оценки координат робота стабилизируется после установления и сильно снижается при возвращении робота в начальное место. Это объясняется тем, что в момент возвращения робота в начальное место соотношение между вертикальными линиями станет тесным, и коррекция для первых наблюдаемых вертикальных линий приводит к коррекции и других существенных в карте вертикальных линий. Рис. 3г показана ошибка измерений ожидаемых при произведенной экстраполяции вектора состояний системы. Небольшая ошибка измерений показывает, что априорная оценка хорошо корректируется так, что дает ожидаемое измерение близко к реальному измерению.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в данной статье алгоритм локализации позволяет корректировать накапливаемую погрешность одометра и обеспечивает стабильную неопределенность оценки координат робота.

б)

6. ССЫЛКИ

- [1] T. Bailey. Constrained Initialisation for Bearing-only SLAM. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003.
- [2] A.J. Davison. Real-time Simultaneous Localisation and Mapping with a Single Camera. In *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision*, 2003.
- [3] R.E. Kalman. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME*, 1960.
- [4] J.J. Simon, J.K. Uhlmann. New extension of the Kalman filter to nonlinear systems. In *Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls*, 1997.
- [5] J. Sola, A. Monin, M. Devy, T. Lemaire. Undelayed Initialisation in Bearing-Only SLAM. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005.

Об авторах

Александр В. Овчинников – к.т.н., доцент Тульского государственного университета. E-mail: admin_telex@mail.ru.
Хоа Д. Фан – аспирант Тульского государственного университета. E-mail: dolphin22a@yahoo.com.