

**Acknowledgements:** The work was supported by grant of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No. № 9.3408.2017/4.6).

For citation:

**Poduraev Y. V.** Approach and Experience of Designing Medical Collaborative Robotics for Laser Surgery and Bio-Printing, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 749–752.

DOI: 10/17587/mau.18.749-752

### References

1. **Bujnov M. A., Vorotnikov A. A., Klimov D. D., Malyshev I. Yu., Mironov V. A., Parfenov V. A., Perejra D. A. S., Poduraev Yu. V., Hesuani Yu. D.** *Roboticheskie tekhnologii v medicine i bioprintinge: sostoyanie problemy i sovremennye tendencii* (Robotic technologies in medicine and bioprinting: the state of the problem and current trends), *Vestnik MGTU "STANKIN"*, 2017, no. 1 (40) (in Russian).  
2. Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=a2SdbM4qWkU&feature=youtu.be>
3. **Kolontarev K. B., Pushkar' D. Yu., Govorov A. V., Sheptunov S. A.** *Istoriya razvitiya roboticheskikh tekhnologij v medicine* (History of the development of robotic technologies in medicine), *Izvestiya Vuzov. Povolzhskij region. Medicinskie nauki*, 2014, no. 4 (32), pp. 125–140 (in Russian).

4. **Bazikyan Eh. A., Chunihin A. A.** *Maloinvazivnye lazernye tekhnologii na osnove robotizirovannykh multifunktional'nykh kompleksov v chelyustno-licevoj hirurgii i stomatologii* (Minimally invasive laser technologies based on robotic multifunctional complexes in maxillofacial surgery and dentistry), *Rossijskij Stomatologicheskij Zhurnal*, 2016, vol. 20, no. 5, pp. 228–231 (in Russian).

5. **Chunihin A. A., Saakyan M. Yu., Gazhva S. I., Bazikyan Eh. A.** *Razrabotka nanosekundnogo lazernogo modulya, vstraivaemogo v robotizirovannyj mnogofunktional'nyj hirurgicaleskij kompleks dlya maloinvazivnoj terapii patologii chelyustno-licevoj oblasti i opredelenie ehffektov ego vozdeystviya na plazmu krovi* (Development of a nanosecond laser module embedded in a robotic multifunctional surgical complex for minimally invasive treatment of the pathology of the maxillofacial area and determining the effects of its effect on blood plasma), *Sovremennye Tekhnologii v Medicine*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 30–35 (in Russian).

6. **Mironov V., Kasyanov V., Markwald R.** Organ printing: from bioprinter to organ biofabrication line, *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, no. 22, pp. 667–673.

7. **Manyi Wang, Jiankang He, Yaxiong Liu, Meng Li, Dichen Li, Zhongmin Jin.** The trend towards in vivo bioprinting, *International Journal of Bioprinting*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 15–26.

8. **Mironov V. A.** *Tekhnologiya trekhmernoj biopechati* (Technology of three-dimensional bioprinting), available at: [http://umedp.ru/news/vladimir\\_aleksandrovich\\_mironov\\_tekhnologiya\\_trekhmernoj\\_biopec\\_hati.html](http://umedp.ru/news/vladimir_aleksandrovich_mironov_tekhnologiya_trekhmernoj_biopec_hati.html) (in Russian).

9. **Kagan V. G.** 50, 40, 30, 20, 10 let spustya (50, 40, 30, 20, 10 years later), Moscow, RASKHN, 2003, 76 p. (in Russian).

УДК 004.896

DOI: 10.17587/mau.18.752-758

**Д. Н. Степанов**, нач. лаборатории, [dnstepanov@rtc.ru](mailto:dnstepanov@rtc.ru), **Е. Ю. Смирнова**, нач. отдела, [eus@rtc.ru](mailto:eus@rtc.ru),  
Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики,  
Санкт-Петербург

## Метод коррекции оценки положения мобильного робота с использованием визуальной локации естественных ориентиров

Представлен подход к использованию визуальной локации известных ориентиров для повышения точности навигации мобильного робота (МР). Подход основывается на анализе изображений от одной или нескольких телевизионных камер МР и применении нелинейной фильтрации для коррекции навигационной оценки по визуальной локации. Ключевыми достоинствами является возможность коррекции положения и ориентации МР по любому числу ориентиров (начиная с одного), а также возможность использования произвольного числа камер. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь погрешностей по смещению в плоскости дороги порядка 10 см и менее  $1^\circ$  по углу ориентации МР в пределах всей траектории.

**Ключевые слова:** мобильный робот, автономное транспортное средство, визуальная навигация, визуальная локация, техническое зрение, фильтр Калмана, комплексирование, оптимальная фильтрация

### Введение

Задача определения положения беспилотного автомобиля (мобильного робота) при движении по дорогам общего пользования и пересеченной местности в настоящее время чаще всего решается с применением комплекса дорогостоящих многолучевых лазерных дальномеров (лидаров). Активное развитие систем технического зрения позволяет создавать значительно менее дорогие и громоздкие системы, базирующиеся на анализе изображений от телевизионных камер мобильных роботов (МР). В ряде случаев такие системы по-прежнему дополняются относительно дешевыми однолучевыми лидарами небольшого радиуса действия для конт-

роля положения транспортного средства на проезжей части. Однако существуют ситуации, когда такой дальномер использован быть не может, например, при проезде перекрестков он не позволяет определить края проезжей части и дорожной разметки. В таких ситуациях МР приходится полагаться только на использование GPS (ГЛОНАСС) и внутренних сенсоров и систем — одометров и БИНС [1]. Это ограничивает точность прохождения перекрестков, приводит к резкому маневрированию при выезде с перекрестка (когда лидар снова может быть применен для определения полосы движения) и потенциально может приводить к столкновениям с дорожной инфраструктурой.

## Обзор существующих решений

Система технического зрения позволяет парировать указанные недостатки и в целом повышать точность навигации. Ряд известных публикаций предлагает использовать для визуальной локации маркеры специального типа — пассивные или активные [2]. Несмотря на очевидные преимущества специально разработанных маркеров (надежность обнаружения препятствий при относительно небольших вычислительных затратах), размещение таких маркеров обычно затруднительно как в помещениях, где работают люди (например, из соображений эргономики), так и в условиях открытой местности. Поэтому актуальной является задача использования для навигации "естественных" визуальных ориентиров, которые уже существуют в рабочей зоне МР.

Известными подходами применения СТЗ для навигации без специальных маркеров являются визуальный SLAM [3] и визуальная одометрия [4], однако они не позволяют достигать необходимой точности, особенно при маневрировании на месте, когда движение камер МР является в значительной степени вращательным. При наличии карты визуальных ориентиров возможно применение СТЗ для определения направлений на такие ориентиры в каждый момент времени. Существующие решения предлагают решение частных задач при ограничении на минимальное необходимое число ориентиров. Так, в работе [5] представлено решение задачи определения только ориентации МР (одна координата) с использованием трех и более ориентиров.

Предлагаемый подход основан на применении расширенного фильтра Калмана для эффективного комплексирования данных "традиционной" навигационной системы и визуальной локации произвольного числа ориентиров. При этом прогноз положения МР осуществляется с использованием одометрии ("традиционной" навигационной системы МР в общем случае), а информация, получаемая при наблюдении ориентиров, используется для коррекции оценки положения.

Основные подходы к проблеме обнаружения произвольных ориентиров изложены в публикациях [6—9]. Одним из лучших по производительности и качеству обнаружения объектов алгоритмов по данным разных исследований на данный момент является каскадный классификатор, основанный на принципах, заложенных в работе [6]. Актуальной альтернативой являются также нейронные сети глубокого обучения [10], однако для их эффективного обучения необходимо использовать очень большие наборы исходных данных (образцов объектов). Наши экспериментальные исследования [11] показывают, что при ограниченной обучающей выборке (до нескольких тысяч образцов на класс) каскадные классификаторы имеют преимущество перед нейронными сетями. Нейронные сети можно эффективно использовать для широко распро-

страненных ориентиров, таких как дорожные знаки, светофоры и т. п.

## Модель движения мобильного робота

В качестве наиболее близкой модели движения используемого транспортного средства выбрана модель с поворотными передними колесами (Ackermann Steering Model) [12], показанная на рис. 1.

Кинематические уравнения движения определяются формулами

$$\begin{aligned}\dot{x} &= V\cos\theta; \\ \dot{y} &= V\sin\theta; \\ \dot{\theta} &= \frac{V\operatorname{tg}\Phi}{L},\end{aligned}$$

где  $X = (x, y, \theta)$  — координаты транспортного средства;  $V$  — скорость движения;  $L$  — расстояние между задней и передней осями;  $\Phi$  — угол поворота колес.

Записывая уравнения в приращениях относительно временного шага  $\Delta t$ , получим изменение вектора состояния при переходе от шага  $k$  к шагу  $k + 1$  (нелинейная модель движения):

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ \theta_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k + \Delta t V \cos \theta_k \\ y_k + \Delta t V \sin \theta_k \\ \theta_k + \frac{\Delta t V \operatorname{tg} \Phi_k}{L} \end{bmatrix}.$$

Вектор управления имеет вид

$$u_k = \begin{bmatrix} V_k \\ \Phi_k \end{bmatrix} + w_k;$$

$$w_k = N \left( 0, \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix} \right),$$

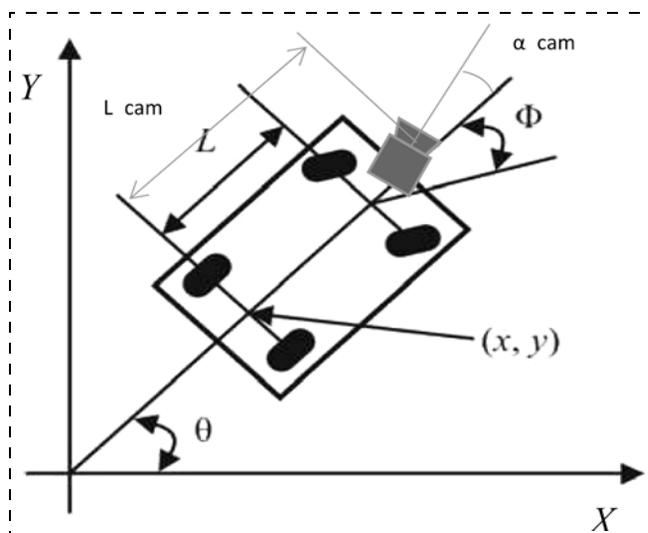


Рис. 1. Модель транспортного средства с поворотными колесами

где  $V_k$  — скорость движения;  $\Phi_k$  — угол поворота колес;  $w_k$  — ошибка обработки управления (нормальное двумерное распределение с нулевым средним).

Поскольку экспериментальное транспортное средство не оснащено датчиком скорости, в качестве оценки  $V_k$  мы используем среднее изменение показаний двух одометров за время  $\Delta t$ :

$$V_k = \frac{2\pi A_k r_{wheel}}{N\Delta t},$$

где  $A_k$  — среднее изменение показаний двух одометров за время  $\Delta t$ ;  $r_{wheel}$  — радиус колеса;  $N$  — число отсчетов одометра на один полный оборот колеса.

Для определения угла поворота колес  $\Phi_k$  используются данные датчика положения линейного актуатора и эмпирическая функция пересчета этих данных в угол поворота.

### Формулировка расширенного фильтра Калмана для визуальной локации

Поскольку модель движения (и наблюдений в случае использования коррекции по направлениям на ориентиры) является нелинейной, для прогноза и коррекции положения необходимо использовать обобщенный (расширенный) фильтр Калмана — Extended Kalman Filter [13] (ЕКФ).

Задание начального состояния ЕКФ выполняем следующим образом. Положение транспортного средства в начальный момент времени:

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \theta_0 \end{bmatrix}.$$

Реальное положение известно с ошибкой. Достоверность оценки начального положения описывается начальным состоянием ковариационной матрицы ошибок  $P$ :

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta0}^2 \end{bmatrix}.$$

Шаг прогноза (time update) расширенного фильтра Калмана задается в виде:

$$\hat{X}_k^- = f(\hat{X}_{k-1}^-, u_{k-1});$$

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + W_k Q_{k-1} W_k^T,$$

где  $\hat{X}_{k-1}^-$  — вектор состояния в момент времени  $k-1$ ;  $\hat{X}_k^-$  — вектор состояния в момент времени  $k$ ;

$u_{k-1}$  — вектор управления;  $f$  — функция движения;

$P_k^-$  — ковариационная матрица ошибок после прогноза;  $P_{k-1}$  — ковариационная матрица ошибок до прогноза;  $W_k$  — якобиан частных производных функции  $f$  по отношению к вектору управления;  $F_k$  — якобиан  $f$  по отношению к вектору состояния.

В рассматриваемом случае:

- матрица ковариаций ошибок управления

$$Q_k = Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix};$$

- якобиан по отношению к вектору состояния

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -V_k \Delta t \cos \theta_k \\ 0 & 1 & V_k \Delta t \sin \theta_k \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

- якобиан по отношению к вектору управления

$$W_k = \begin{bmatrix} \Delta t \cos \theta_k & 0 \\ \Delta t \sin \theta_k & 0 \\ \frac{\Delta t \operatorname{tg} \Phi_k}{L} & \frac{\Delta t V_k \sec^2 \Phi_k}{L} \end{bmatrix}.$$

Наблюдения (угловые координаты визуальных ориентиров) применяются на шаге коррекции ЕКФ, который выполняется асинхронно с шагом прогноза, в соответствии с частотой обработки кадров. Коррекция применяется к моменту времени, когда был получен кадр с обнаруженным ориентиром.

В общем виде функция наблюдений записывается в виде

$$z_k = h(x_k, v_k).$$

Здесь  $v_k$  — вектор ошибки наблюдений, имеющий нормальное гауссово распределение с матрицей ковариаций  $R_k = [\sigma_\alpha^2]$ .

В случае непосредственной локации  $m$  визуальных ориентиров с угловыми координатами  $\alpha_i$ ,  $i = 1, \dots, m$ , имеем:

$$\alpha_i = z = \arctg \frac{y_b - y_c}{x_b - x_c} - \theta_{cam} - \alpha_{cam};$$

$$x_c = x + L_{cam} \cos \theta_{cam} - T_{cam} \sin \theta_{cam};$$

$$y_c = y + L_{cam} \sin \theta_{cam} - T_{cam} \cos \theta_{cam},$$

где  $(x_b, y_b)$  — координаты текущего ориентира;  $L_{cam}$ ,  $T_{cam}$ ,  $\theta_{cam}$  — координаты камеры в СК МР.

Шаг коррекции в такой формулировке выполняется последовательно для всех  $m$  ориентиров, угловые координаты которых определены для кадра, полученного в момент времени  $k$ .

Коррекция оценки вектора состояния из априорной оценки в апостериорную  $\hat{x}_k^- \rightarrow \hat{x}_k^+$  выполняется в соответствии с формулами

$$\begin{aligned}\hat{x}_k^+ &= \hat{x}_k^- + K_k(z_k - h(\hat{x}_k^-)); \\ K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1}; \\ P_k^+ &= (I - K_k H_k) P_k^-.\end{aligned}$$

Здесь  $K_k$  — коэффициент обратной связи;  $h$  — функция наблюдений, вычисленная для априорной оценки положения  $\hat{x}_k^-$ ;  $P_k^-$  — априорное значение ковариационной матрицы ошибок (после шага прогноза);  $P_k^+$  — апостериорное значение ковариационной матрицы ошибок;  $I$  — единичная матрица;  $H_k$  — якобиан частных производных функции наблюдений  $h$ , вычисленный по отношению к вектору состояний  $X$ ;  $R_k$  — матрица ковариаций наблюдений.

Соответствующий якобиан в частных производных имеет вид (в обозначениях опущен индекс "cam"):

$$H_k = \begin{bmatrix} \frac{y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2 \left( \frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \right)} \\ \frac{1}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x) \left( \frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \right)} \\ \frac{T \sin \theta - L \cos \theta}{x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x} - \frac{(L \sin \theta - T \cos \theta)(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} - 1 \\ \frac{(y_b - L \sin \theta - T \cos \theta - y)^2}{(x_b - L \cos \theta + T \sin \theta - x)^2} + 1 \end{bmatrix};$$

$R_k = [\sigma_\alpha^2]$  — дисперсия угла визирования ориентира.

Основными параметрами описанного фильтра Калмана являются:

- достоверность начальной оценки положения — матрица ковариаций оценки начального положения

$$P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x0}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta 0}^2 \end{bmatrix};$$

- достоверность прогноза (управления) — матрица ковариаций управления

$$Q = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\Phi^2 \end{bmatrix};$$

- достоверность измерения направления на ориентир — дисперсия оценки углового положения ориентира

$$R_k = [\sigma_\alpha^2];$$

- достоверность определения угла ориентации робота — дисперсия оценки угла ориентации

$$R_k = [\sigma_\tau^2];$$

- достоверность определения положения робота — ковариационная матрица оценки положения

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}.$$

Помимо этого необходимо учитывать наличие ошибки в построении карты, что на уровне модели представляется в виде стандартного отклонения координат маркера на плоскости  $\sigma_{map}$ . Эта величина не участвует в вычислениях фильтра Калмана и используется только для моделирования.

### Экспериментальные исследования

Для отработки представленного метода разработана компьютерная модель с использованием пакета MATLAB. Ниже представлены результаты моделирования проездов без коррекции (рис. 2), с коррекцией по одному (рис. 3), двум (рис. 4) и трем ориентирам (рис. 5). На этих рисунках единицы измерения по осям абсцисс и ординат — смещения относительно системы координат полигона в метрах. Черные кружки — реальное положение МР, кресты — математическое ожидание оценки положения, эллипсы показывают неопределенность в оценке положения (на основе матрицы ко-

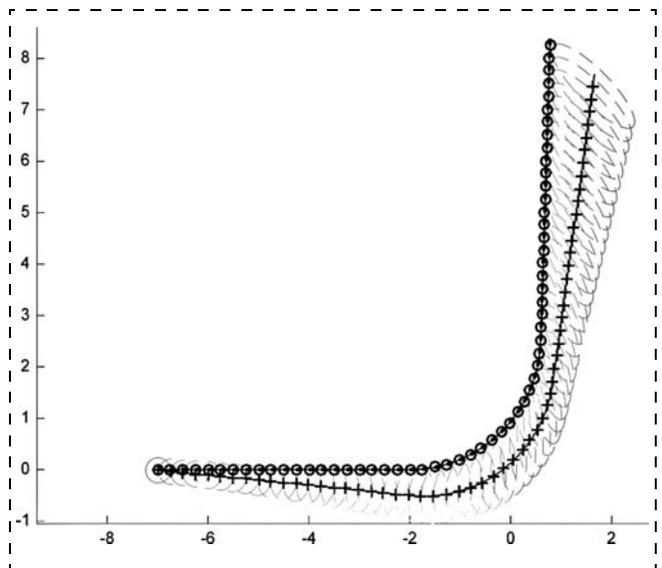


Рис. 2. Моделирование проезда без коррекции

вариации). На рис. 3—5 справа приведено увеличенное изображение одного из шагов коррекции.

Видно, что со временем ошибка в оценке положения накапливается. При этом истинное положение находится внутри эллипса неопределенности, что говорит о корректности модели.

В случае периодической коррекции по ориентиру (показан звездочкой) оценка координат в на-

правлении, ортогональном линии визирования (сплошная линия, соединяющая ориентир и реальное положение МР; неопределенность в оценке угла визирования показана штриховыми линиями), становится более достоверной. Поскольку при совершении маневра направление визирования ориентира меняется, это позволяет эффективно снижать ошибку навигации во всех направлениях.

Видно, что даже применение одного ориентира позволяет избежать неконтролируемого накопления ошибки со временем, которое возникает при использовании одометрии и БИНС.

Использование двух ориентиров позволяет сразу обеспечить коррекцию по двум направлениям. Однако по мере удаления от ориентиров направления на них становятся близки, что приводит к накоплению поперечной ошибки.

Применение трех ориентиров обеспечивает дальнейшее повышение точности навигации в пределах всего тестового участка.

Моделирование показало эффективность коррекции даже по одному ориентиру. При этом важно осуществлять коррекцию с достаточной частотой, поскольку применение линеаризации в алгоритме расширенного фильтра Калмана предполагает малые отклонения от реального положения. При больших отклонениях фильтр может давать оценку, значительно отличающуюся от оптимальной (из-за ошибок линеаризации).

Реальные камеры в большинстве случаев имеют ограниченный угол зрения, что приводит к невозможности использования одной камеры для локации ориентиров в пределах всего тестового участка. Для решения этой проблемы предлагается использовать две и более камер, направленных в разные стороны (например, вперед и назад). Моделирование и последующие натурные эксперименты показали эффективность такой схемы.

Натурные экспериментальные исследования проводились на тестовом полигоне ЦНИИ РТК с использованием автономного транспортного средства с поворотными колесами. МР оснащен бортовым вычислителем на базе NVidia Jetson TX1 и двумя телевизионными камерами с объективами типа "рыбий глаз" для обеспечения локации ориентиров в максимально широком угле. Для определения фактического положения робота в конт-

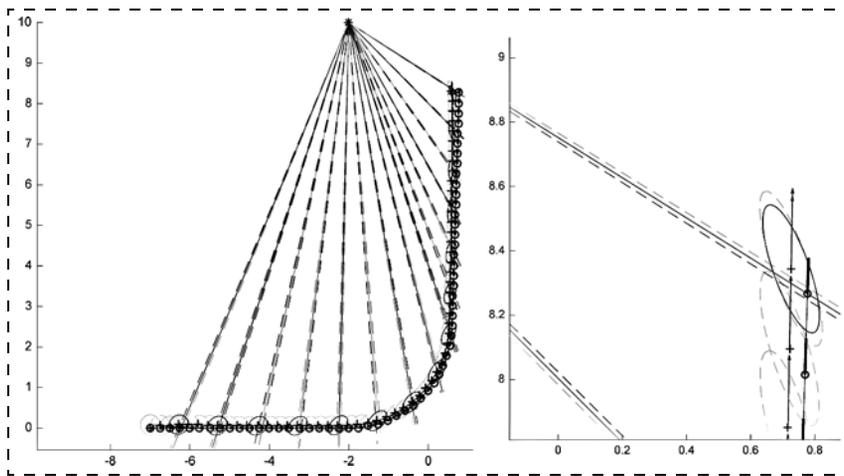


Рис. 3. Моделирование проезда с коррекцией по одному ориентиру

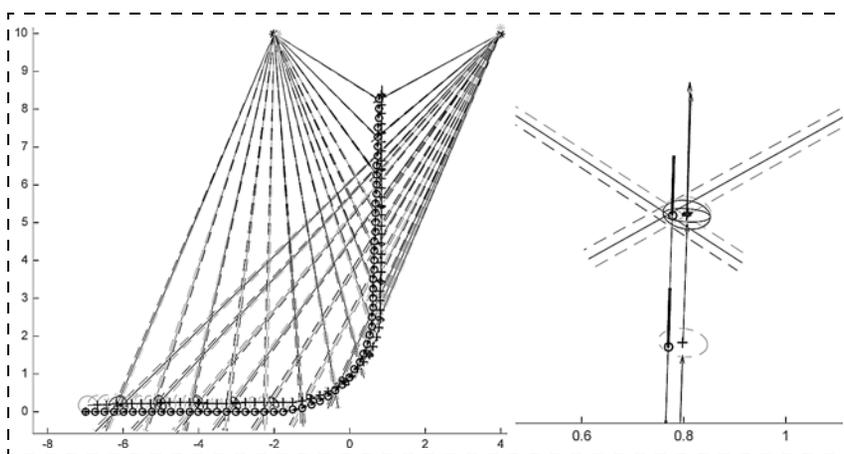


Рис. 4. Моделирование проезда с коррекцией по двум ориентирам

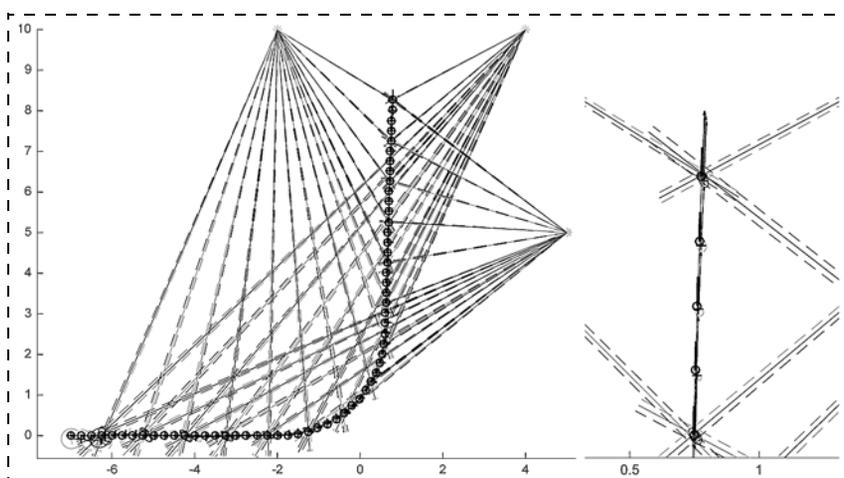


Рис. 5. Моделирование проезда с коррекцией по трем ориентирам

рольных точках использовались лазерные дальнометры, теодолит и измерительный манипулятор FARO Arm Prime.

Примеры изображений визуальных ориентиров, полученных от камер МР, представлены на рис. 6.

Экспериментальные исследования показали, что при отсутствии коррекции транспортное средство осуществляет навигацию с погрешностью порядка 50 см в конечной точке контрольной траектории (аналогичной проезду перекрестка с поворотом). Применение визуальной коррекции позволяет достичь погрешности не более 10 см в том же положении МР.

### Заключение

Ключевым достоинством представленного подхода является возможность коррекции по любому числу ориентиров (начиная с одного), а также использования как одной, так и множества телевизионных камер. Однократное наблюдение ориентира с известными координатами обеспечивает уменьшение ошибки навигации в направлении, перпендикулярном линии визирования ориентира. Поскольку каждый ориентир обычно наблюдается в течение некоторого времени, даже при использовании только одного ориентира постепенно может быть списана ошибка по всем координатам. Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод позволяет достичь точностей порядка 10 см при проезде перекрестков различной конфигурации. При этом точность не уменьшается по мере продвижения по траектории. Предложенный подход является универсальным и может быть применен для коррекции по известным визуальным ориентирам в различных случаях, например, при определении относительного положения автономных спасательных средств морского базирования [14], космических аппаратов [15] или при выполнении стыковки автономных необитаемых подводных аппаратов с носителем [16].

### Список литературы

1. Черноножкин В. А., Половко С. А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2008. № 57. С. 13—22.
2. Тюкин А. Л., Лебедев И. М., Приоров А. Л. Анализ телевизионного изображения для работы системы позиционирования мобильного робота в помещении по маякам с цветовой кодировкой // Тезисы научно-технической конференции "Техническое зрение в системах управления — 2015". 2015. С. 77—78.
3. Raül Mur-Artal, J. M. M. Montiel and Juan D. Tardós. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System // IEEE Transactions on Robotics. 2015. Vol. 31, N. 5. P. 1147—1163.
4. Девятериков Е. А., Михайлов Б. Б. Использование данных визуального одометра для автономного возвращения мо-

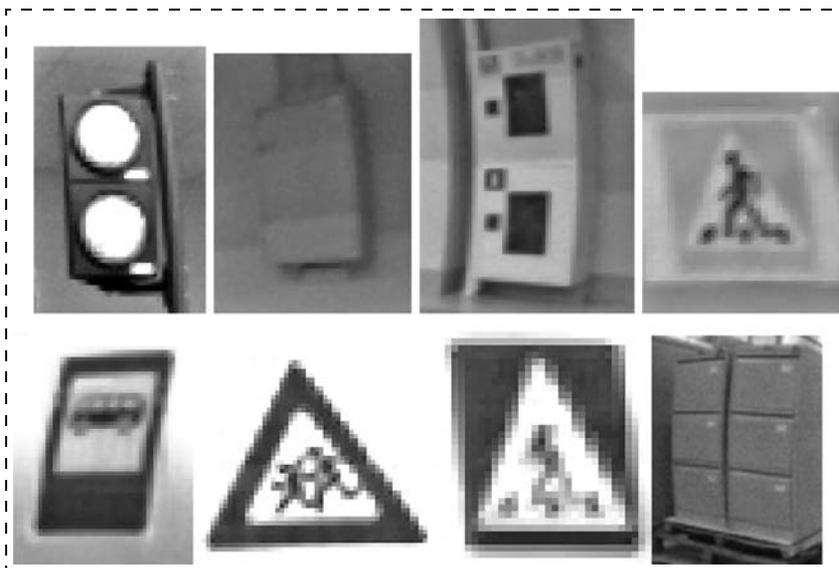


Рис. 6. Примеры изображений визуальных ориентиров от сверхширокоугольной камеры МР

бильного робота в среде без фиксированных точек отсчета // Экстремальная робототехника. 2015. № 1. С. 351—361.

5. Korsakov A., Fomin I., Gromoshinsky D., Bakhshiev A., Stepanov D., Smirnova E. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts. Yekaterinburg, Russia. 2015. Vol. 1710. P. 91—101.

6. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Face Detection // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 57. P. 137—154.

7. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-learning-detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 34. P. 1409—1422.

8. Shengcai Liao, Xiangxin Zhu, Zhen Lei, Lun Zhang, Stan Z. Li. Learning Multiscale Block Local Binary Patterns for Face Recognition // International conference on Advances in Biometrics. 2007. P. 828—837.

9. Freund Y., Schapire R. E. A Short Introduction to Boosting // International joint conference on Artificial intelligence. 1999. Vol. 2. P. 1401—1406.

10. Girshick R. Fast R-CNN // The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). 2015. P. 1440—1448.

11. Fomin I., Gromoshinskii D., Stepanov D. Visual features detection based on deep neural network in autonomous driving tasks // 26 международная конференция "GraphiCon2016". Нижний Новгород, 2016. С. 430—434.

12. Suliman C., Cruceru C., Moldoveanu F. Mobile robot position estimation using the Kalman filter // Scientific Bulletin of the "Petru Maior" University of Targu Mures. 2009. Vol. 6. P. 75.

13. Julier S. J., Uhlmann J. K. Unscented filtering and nonlinear estimation // Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92, N. 3. P. 401—422.

14. Васильев И. А., Смирнова Е. Ю., Степанов Д. Н. Комплекс интеллектуальной навигации амфибийного спасательного средства // Робототехника и техническая кибернетика. 2015. № 2 (7). С. 30—33.

15. Stepanov D., Bakhshiev A., Gromoshinskii D., Kirpan N., Gundelakh F. Determination of the Relative Position of Space Vehicles by Detection and Tracking of Natural Visual Features with the Existing TV-Cameras // Analysis of Images, Social Networks and Texts. Springer International Publishing. 2015. Vol. 542. P. 431—442.

16. Степанов Д. Н., Кирпань Н. А., Половко С. А. Алгоритм определения взаимного положения подводных аппаратов с использованием телевизионной системы и специальных световых маркеров // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника — 2016. Матер. Всеросс. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. 2016. С. 427—431.

# A Method of Mobile Robot Position Estimation Correction Using Visual Location of Natural Landmarks

D. N. Stepanov, dnstepanov@rtc.ru✉, E. Yu. Smirnova, eus@rtc.ru,  
Institute for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, 194064

Corresponding author: **Stepanov Dmitry N.**, Head of Computer Vision Laboratory,  
Institute for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, Russia, 194064  
e-mail: dnstepanov@rtc.ru

Accepted on August 07, 2017

The article presents an approach to using of visual location of an arbitrary number of known natural landmarks for correction of position estimation of a mobile robot. The approach is based on using of the Extended Kalman Filter to perform steps of the position prediction and correction based on the visual location. The visual location is performed using a calibrated camera (or a set of cameras) installed on the mobile robot. The task of a mobile robot navigation in a case of poorly determined conditions is often solved using a set of expensive LIDARs. Other sensors like GNSS and odometer often used in mobile robots are usually not precise enough (for example when maneuvering on intersections). The recent research in the field of computer vision allows creation of much less expensive systems based on image analysis from one or several cameras. When used together with other sensors such system can significantly increase the navigation precision and stability. Known visual navigation approaches like visual SLAM and visual odometer are often used but they are often not precise enough especially when the camera movement is mostly rotating. A set of one or more natural visual landmarks can be located automatically in real time using mobile robot cameras. Existing methods provide partial solutions for the position or direction estimation using 3 or more landmarks. The proposed approach is based on using of the Extended Kalman Filter for efficient fusion of the odometer and GNSS data with the visual location of one or more landmarks. Since all the landmarks are used one at a time independently the number of landmarks, cameras, their types and positions are arbitrary. The method is working with one camera and one landmark as well as with a round view camera system with one or many landmarks. Experiments involving autonomous driving through different intersections shown the feasibility of reaching of the accuracy of horizontal position of 10 cm and rotation of 1° and below. The method has been developed for improving of unmanned vehicles navigation at intersections but can be applied to navigation of different ground, space, marine and underwater mobile robots.

**Keywords:** mobile robot, unmanned ground vehicle, visual navigation, visual location, computer vision, Kalman filter, sensor fusion

For citation:

Stepanov D. N., Smirnova E. Yu. A Method of Mobile Robot Position Estimation Correction Using Visual Location of Natural Landmarks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 11, pp. 752–758.

DOI: 10.17587/mau.18.752-758

## References

1. Chernonozhkin V. A., Polovko S. A. Sistema lokal'noj navigacii dlja nazemnyh mobil'nyh robotov (Local navigation system for terrestrial mobile robots), *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*, 2008, vol. 57, pp. 13–22 (in Russian).
2. Tjukin A. L., Lebedev I. M., Priorov A. L. Analiz televizionnogo izobrazhenija dlja raboty sistemy pozicionirovanija mobil'nogo robota v pomeschenii po majakam s cvetovoj kodirovkoj (Television image analysis for positioning system of a mobile robot by color coded beacons), *Tezisy nauchno-tehnicheskij konferencii "Tehnicheskoe zrenie v sistemah upravlenija — 2015"*, Moscow, 2015, pp. 77–78 (in Russian).
3. Raül Mur-Artal, J. M. M. Montiel and Juan D. Tardós. ORB-SLAM: A Versatile and Accurate Monocular SLAM System, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 31, no. 5, pp. 1147–1163, 2015.
4. Devjaterikov E. A., Mihajlov B. B. Ispol'zovanie dannyh vizual'nogo odometra dlja avtonomnogo vozvrashhenija mobil'nogo robota v srede bez fiksirovannyh toček otscheta (Using of visual odometer data for automatic mobile robot return in environments without fixed landmarks), *Ekstremal'naja Robototehnika*. 2015, vol. 1, pp. 351–361 (in Russian).
5. Korsakov A., Fomin I., Gromoshinsky D., Bakhshiev A., Stepanov D., Smirnova E. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks, *Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts*, Yekaterinburg, Russia, 2015, vol. 91, pp. 91–101.
6. Viola P., Jones M. J. Robust Real-Time Face Detection, *International Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 57, pp. 137–154.
7. Kalal Z., Mikolajczyk K., Matas J. Tracking-learning-detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, vol. 34, pp. 1409–1422.
8. Shengcai Liao, Xiangxin Zhu, Zhen Lei, Lun Zhang, Stan Z. Li. Learning Multiscale Block Local Binary Patterns for Face Recognition, *International conference on Advances in Biometrics*, 2007, pp. 828–837.
9. Yoav Freund, Robert E. Schapire. A Short Introduction to Boosting, *International joint conference on Artificial intelligence*, 1999, vol. 2, pp. 1401–1406.
10. Girshick R. Fast R-CNN, *The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2015, pp. 1440–1448.
11. Fomin I., Gromoshinskii D., Stepanov D. Visual features detection based on deep neural network in autonomous driving tasks, *26 international conference GraphiCon2016*, Nizsnii Novgorod, 2016, pp. 430–434.
12. Suliman C., Cruceru C., Moldoveanu F. Mobile robot position estimation using the Kalman filter, *Scientific Bulletin of the "Petru Poni" University of Targu Mures*, 2009, vol. 6, pp. 75.
13. Julier S. J., Uhlmann J. K. Unscented filtering and nonlinear estimation, *Proceedings of the IEEE*, 2004, vol. 92, no. 3, pp. 401–422.
14. Vasil'ev I. A., Smirnova E. Ju., Stepanov D. N. Kompleks intellektual'noj navigacii amfibijnogo spasatel'nogo sredstva (Intelligent navigation complex for amphibian rescue vehicle), *Robototehnika i tehnicheskaja kibernetika*, 2015, vol. 2 (7), pp. 30–33 (in Russian).
15. Stepanov D., Bakhshiev A., Gromoshinskii D., Kirpan N., Gundelakh F. Determination of the Relative Position of Space Vehicles by Detection and Tracking of Natural Visual Features with the Existing TV-Cameras", *Analysis of Images, Social Networks and Texts*, Springer International Publishing, 2015, vol. 542, pp. 431–442.
16. Stepanov D. N., Kirpan' N. A., Polovko S. A. Algoritm opredelenija vzaimnogo polozhenija podvodnyh apparatov s ispol'zovaniem televizionnoj sistemy i special'nyh svetovyh markerov (Algorithm for determining the relative position of underwater vehicles using a television system and special light markers), *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mehatronika — 2016 materialy Vserossijskoj nauchno-tehnicheskij konferencii molodyh uchenyh, aspirantov i studentov*. 2016, pp. 427–431 (in Russian).