



УДК 007.51

АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СЕНСОРОВ ДЕТЕКТИРУЮЩИХ ПРЕПЯТСТВИЯ УСТРОЙСТВ

М.Ю. Сачков, А.Ю. Юсупова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: 79995292508@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 27.06.18, принята к печати 14.02.19
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-326-332
Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Сачков М.Ю., Юсупова А.Ю. Алгоритмы фильтрации сигналов ультразвуковых сенсоров детектирующих препятствия устройств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 326–332. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-326-332

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы методы снижения шумов сигнала ультразвукового сенсора модуля, детектирующего препятствия. Модуль посредством вибраций извещает человека с ограниченными возможностями зрения о неподвижных или движущихся перед ним с малой скоростью предметах. **Метод.** Предложенный алгоритм содержит медианный цифровой фильтр. Фильтр позволяет устранить случайные флуктуации выходного сигнала сенсора, вызванные попаданием в поле зрения сложноидентифицируемых объектов, собственных шумов устройств. **Основные результаты.** Спроектировано функциональное устройство и изготовлен его макет. В макете применен ультразвуковой сенсор HC-SR04. Предлагаемое устройство позволяет отказаться от звуковых извещателей (наушников) и передавать информацию об окружающей обстановке посредством вибродвигателя, закрепляемого на предплечье человека. Для обработки сигнала использована плата Arduino Nano. Предложенный алгоритм реализован с помощью программного пакета MATLAB. По известной методике рассчитаны параметры, обеспечивающие работоспособность ультразвукового сенсора при различных параметрах среды. Изложены результаты обработки сигнала от ультразвукового сенсора посредством цифровых фильтров. Показано, что среднеквадратичное отклонение измеренных параметров (расстояния) снижено более чем в два раза. Представлены результаты обработки сигнала сенсора макета устройства в условиях лаборатории для неподвижных предметов и предметов с малой линейной скоростью (до 1 м/с). **Практическая значимость.** Разрабатываемое устройство способствует повышению точности навигации при передвижении слабовидящих людей.

Ключевые слова

фильтрация цифрового сигнала, ультразвуковой сенсор, медианный фильтр, макет функционального устройства, фильтр Калмана

FILTRATION ALGORITHMS OF ULTRASONIC SENSOR SIGNALS FOR OBSTACLE DETECTION DEVICES

M.Yu. Sachkov, A.Yu. Yusupova

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
Corresponding author: 79995292508@yandex.ru

Article info

Received 27.06.18, accepted 14.02.19
doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-326-332
Article in Russian

For citation: Sachkov M.Yu., Yusupova A.Yu. Filtration algorithms of ultrasonic sensor signals for obstacle detection devices. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 326–332 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-326-332

Abstract

Subject of Research. The paper proposes a study of methods for reducing the signal noise from an ultrasonic sensor of module detecting obstacles. Through vibrations the sensor notifies a person with visual disabilities of objects that are stationary or moving in front of him at low speed. **Method.** The proposed algorithm contains a median digital filter. The filter gives the possibility to eliminate random fluctuations of the sensor output signal owing to the fact that non-informative objects and the intrinsic noise of the devices come in view. **Main Results.** A mock-up of functional device is designed and manufactured. Ultrasonic HC-SR04 sensor is applied in the item mock-up. The proposed device enables the person to abandon the sound detectors (headphones) and transmit information about the environment through a vibration motor,

attached to the person's forearm. The Arduino Nano board was used for the signal processing. The proposed algorithm is programmed on the board using the MatLab software package. By the known method parameters were calculated that ensure the operability of the ultrasonic sensor for various environmental parameters. The results of ultrasonic sensor signal processing by digital filters are presented. It is shown that the standard deviation of the measured parameters (distance) is reduced by more than twice. The results of the sensor signal processing of the item mock-up in the laboratory for stationary objects and objects with low linear velocity (up to 1 m/s) are presented. **Practical Relevance.** The device being developed contributes to improved navigation accuracy for the movement of people with visual disabilities.

Keywords

digital filtering, quantized signal, median filter, inclusive formation, linear filtration

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, в мире насчитывается порядка 36 млн незрячих людей и 253 млн со слабым зрением. Растущее число людей с ограниченными возможностями зрения в совокупности с усложнением городской инфраструктуры обуславливает необходимость разработки современных технических средств информирования человека о потенциально опасных предметах.

К сожалению, во всем мире на сегодняшний день белая трость по-прежнему остается наиболее простым и доступным инструментом человека с ограниченными возможностями по зрению [1–3], что косвенно подтверждается многочисленными идеями ее модификации посредством дополнительных модулей (рис. 1, *б* [2], *з* [3]).

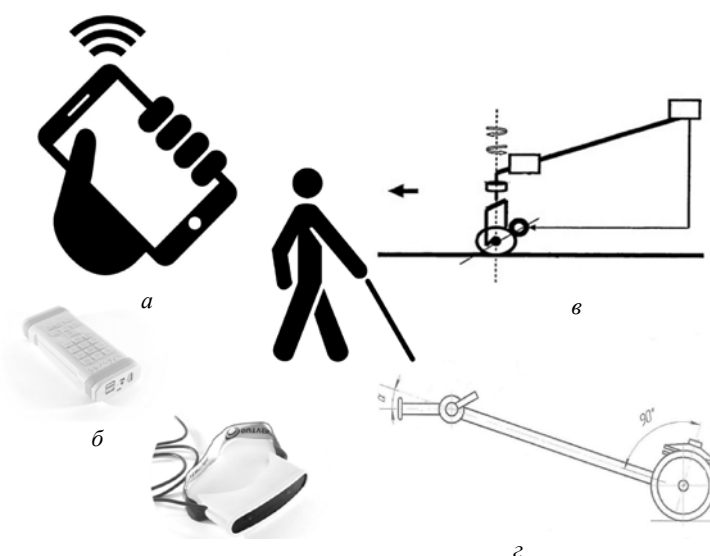


Рис. 1. Дополнительные модули и автономные устройства: *а* – система ориентирования, *б* – совокупность устройств Ogiense, *в* – устройство с поворотным блоком, *г* – инфракрасный локатор

К перспективным направлениям разработки в данной области следует отнести автономные модули. Например, система Ogiense (рис. 1, *б*) представляет собой «навигатор» (модуль, отслеживающий местоположение человека) с функцией хранения настраиваемых пользователем карт и камеру, фиксирующую препятствия. Высокая стоимость делает систему малодоступной, а сложность алгоритмов распознавания изображений снижает время автономной работы.

Следует отметить, что навигационные функции может выполнять приложение для смартфона (рис. 1, *а*) [1]. Оно определяет местоположение человека, а от оператора сотовой связи получает данные о местности.

Анализ технических параметров представленных выше устройств выявил ряд критических недостатков: значительные габариты, необходимость использования наушников для передачи информации. Эти недостатки учтены авторами настоящей статьи при разработке макета устройства на базе ультразвукового сенсора (рис. 2). Предполагается совместное применение устройства с белой тростью, которая позволяет сигнализировать окружающим о наличии у человека проблем со зрением. Исследование базируется на новейших данных о взаимодействии слабовидящего человека с окружающей средой и перестройке функций организма [4–10].

В настоящей работе представлены результаты обработки сигнала сенсора макета функционального устройства в условиях лаборатории для неподвижных предметов и предметов с малой линейной скоростью.

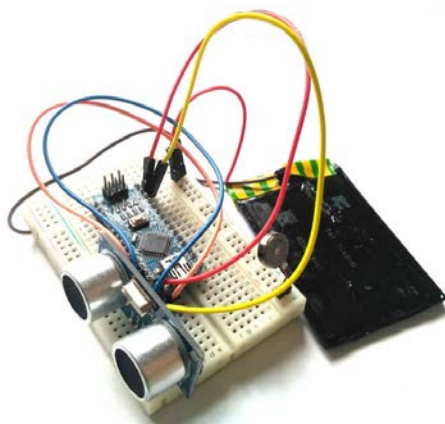


Рис. 2. Макет функционального устройства (100×60×40 мм)

Определение геометрической области детектирования препятствий и принцип работы устройства

В макете устройства применяется ультразвуковой сенсор HC-SR04 (Китай), что накладывает ограничения на акустическую прозрачность среды распространения волн с целью обеспечения работоспособности [11]. Угол расхождения волн φ в среде зависит от соотношения длины волны λ и диаметра излучателя d :

$$\varphi = \arcsin 0,61 \frac{\lambda}{d}. \quad (1)$$

Длина волны зависит от соотношения скорости ее распространения в среде и частоты колебаний. Расчетное значение длины волны, излучаемой ультразвуковым сенсором, в воздушной среде 8,27 мм может незначительно изменяться ввиду неоднородности последней.

Расчитанное по формуле (1) максимальное значение $\varphi = 23,8^\circ$, но на практике оно ограничено 15° , заявленными в документации к сенсору. В непосредственной близости от излучателя ультразвуковые волны распространяются без расхождения. Протяженность зоны без расхождения ультразвуковых лучей для $d=12,5$ мм составляет 4,8 мм.

Макет устройства должен работать в двух зонах (ближней и дальней). Для расчета ближней зоны прием рабочей областью пространства равной верхней части туловища человека – не менее 70 см. С учетом $\varphi = 15^\circ$ протяженность ближней зоны не превышает 265 см.

К параметрам ультразвуковых волн, необходимых для детектирования препятствия по дальности, относятся: разрешающая способность, коэффициент затухания и расстояние до препятствия.

Лучевая разрешающая способность сенсора зависит от длины ультразвуковой волны $\Delta r \geq 3\lambda / 2$ и составляет 12,4 мм. Фронтальная разрешающая способность сенсора также зависит от диаметра излучателя $\Delta L \geq 3\lambda / d$ и равна 4 мм (по данным производителя, 3 мм).

Для детектирования препятствий по углу расположения к оси излучателя следует учесть влияние акустического сопротивления. Оно определяет условия прохождения и отражения ультразвуковых колебаний (УЗК) от границы раздела двух сред. Среды, обладающие акустическим сопротивлением меньшим, чем у воздуха ($414 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$), поглощают ультразвуковые волны или же отражают их лишь частично. Так, различные ткани, шерсть и т.п. обладают низким акустическим сопротивлением – менее $300 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$, следовательно, не могут быть обнаружены данным типом сенсора.

Анализ углов падения и отражения при детектировании с помощью ультразвукового сенсора при расстоянии между сенсором и объектом в 200 мм определяет максимальный угол поворота препятствия к оси излучения в пределах 6° . Расчетное значение возрастает до 7° , с учетом расхождения волн в среде.

Полученные значения позволяют сказать, что при оптимальных параметрах среды возможно детектировать даже небольшие препятствия. Распространение звука в механической среде происходит со снижением амплитуды ультразвуковой волны вследствие дифракции, рассеивания, поглощения и необратимого превращения звуковой энергии в другие формы. Связанный с данными процессами коэффициент затухания равен 0,84 дБ/м при частоте УЗК 40 кГц и относительной влажности воздуха 50 % равны.

Расчет расстояния до препятствия производится по формуле:

$$L = \frac{V \times t_e}{2}, \quad (2)$$

где L – расстояние, V – скорость звука в воздухе, t_e – время ожидания эха отраженной волны.

Во время работы сенсор посылает 8 импульсов с частотой 40 кГц и ожидает возвращения «эха». Рекомендованный период между импульсами составляет 50 мс. Тогда максимальная дистанция будет составлять $L=8,6$ м, с учетом коэффициента затухания – $L=7,3$ м.

В соответствии с расчетами области детектирования и данными производителя сенсора HC-SR04 установлены следующие параметры сигналов с широтно-импульсной модуляцией: в дальней зоне микроконтроллер генерирует импульсы с частотой 5 Гц, в ближней – 10 Гц. Данные настройки рекомендованы производителем, таким образом, ближняя зона заканчивается на расстоянии 265 см от сенсора, а дальняя – на 400 см.

Отраженные УЗК, поступая на микроконтроллер, предварительно обрабатываются при помощи логической функции «исключающего ИЛИ». Применение данной функции позволяет разграничить сигналы дальней и ближней зоны, не повышая нагрузку на микроконтроллер.

Обработка сигнала ультразвукового сенсора

Выходной дискретный сигнал ультразвукового сенсора имеет недостатки: многократное отражение сигнала от препятствия, погрешности измерения, связанные с формой и материалом препятствия, шум сигнала, выбросы и импульсные помехи. Несмотря на то что сенсор обладает рядом усилительных каскадов, требуется последующая фильтрация значений выходного сигнала сенсора на микроконтроллере.

В условиях ограниченности априорных данных о составляющих сигнала метод его обработки должен обеспечивать работоспособность изделия и при малых его значениях. Таким образом, для достижения необходимого компромисса между ослаблением смешанного шума и получением гладкой оценки необходимо знать статистические характеристики сигнала. В условиях лаборатории распределение значений дискретного сигнала принято нормальным.

Обработка сигнала с макета устройства выполнялась посредством нелинейного медианного фильтра [12, 13] и линейного фильтра Калмана [14].

Метод медианной фильтрации, широко применяемый для ослабления воздействия смешанных помех (гауссовых, аддитивных и импульсных), по сравнению с методом простого скользящего среднего, обеспечивает большую устойчивость оценки полезного сигнала при возникновении одиночных экстремальных значений в выходном сигнале.

Выходной сигнал y_k медианного фильтра шириной $2n+1$ для текущего отсчета k формируется из входной последовательности $\{x_{k-1}, x_k, x_{k+1}\}$:

$$y_k = \text{med}(x_{k-n}, x_{k-n+1}, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+n-1}, x_{k+n}), \quad (3)$$

где $\text{med}(x_1, \dots, x_m, \dots, x_{2n+1}) = x_{n+1}, x_{n+1}, x_m$ – элементы, ранжированные в порядке возрастания.

На макете функционального устройства с сенсором HC-SR04 протестирован медианный фильтр с постоянным и скользящим окном. Значения внутри окна ранжируются по возрастанию пузырьковым методом.

Результат обработки выходного сигнала сенсора медианным фильтром с шириной маски 45 отсчетов представлен на рис. 3.

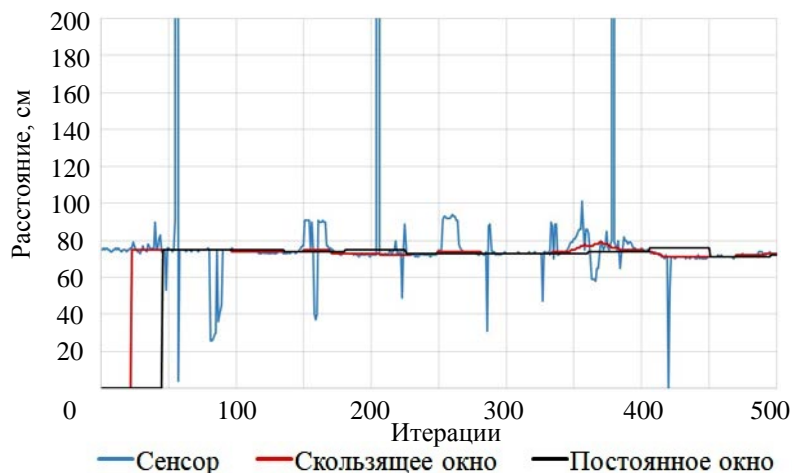


Рис. 3. Значения сигналов без фильтрации и с медианным фильтром

Отсутствие изменений выходного сигнала в пределах доверительного уровня после фильтрации подтверждает невосприимчивость системы к кратковременным возмущениям. Медианный фильтр

является нелинейным, в зависимости от функции полезного сигнала можно варьировать размер маски (число усредняемых элементов). Время вычисления выходного значения сигнала аппаратной платформой Arduino Nano с тактовой частотой 16 МГц составляет 2,26 мс для 45 отсчетов при скользящем окне.

Устройство должно сохранять работоспособность при детектировании предметов с линейной скоростью перемещения не выше 1 м/с.

Для подтверждения сохранения функциональных параметров в случае детектирования малоподвижных предметов анализировались результаты фильтрации сигнала, отраженного от маятника, совершающего свободные колебания (рис. 4). Частота колебаний маятника: $w_0 = 2\pi\nu = 6,28$ рад/с, где $\nu = 1$ с.

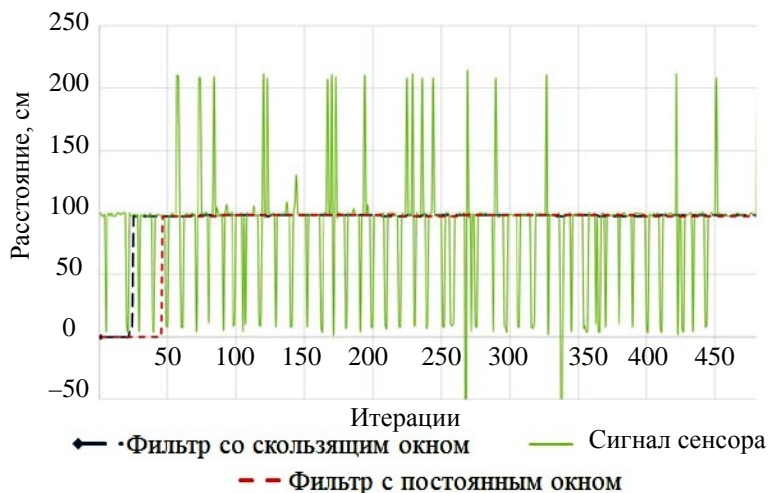


Рис. 4. Экспериментальные значения исходного и отфильтрованного сигналов

Недостатки медианного метода обработки аналогичны недостаткам метода скользящего среднего: первые и последние n значений ряда не обрабатываются. Значимое отличие от метода простого скользящего среднего заключается в низкой эффективности работы при ослаблении помехи, близкой к гауссову закону распределения.

Реализация фильтра Калмана основана на рекуррентной формуле

$$x_{f(k+1)} = Kz_{k+1} + (1 - K)(x_{fk} + u_k), \quad (4)$$

где $x_{f(k+1)}$ – отфильтрованное значение на данном шаге, z_{k+1} – выходной сигнал сенсора, u_k – скорость обмена данными, x_{fk} x_{fk} – отфильтрованное значение на предыдущем шаге; коэффициент Калмана:

$$K = \frac{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}, \quad (5)$$

E – среднеквадратичное отклонение ошибки e_k , σ_ξ – дисперсия ошибки сенсора, σ_η – дисперсия ошибки координаты. Результат обработки выходного сигнала сенсора фильтром Калмана представлен на рис. 5.

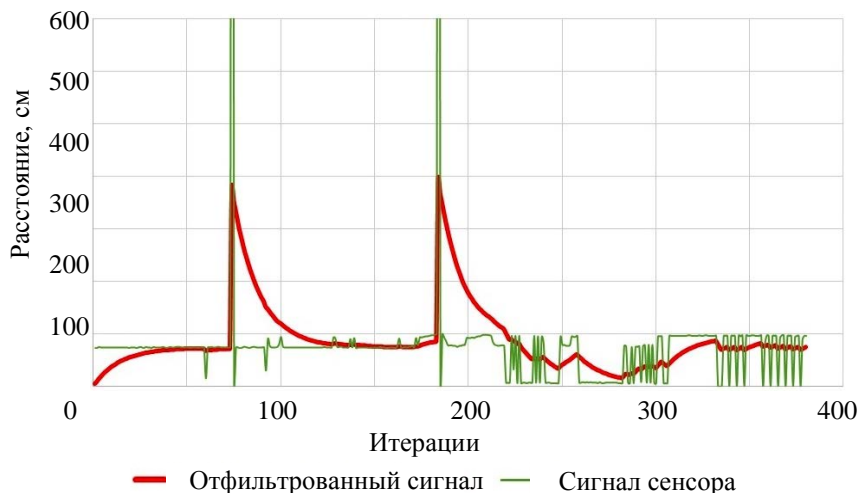


Рис. 5. Значения показателя сенсора без фильтрации и с фильтром Калмана

Общий недостаток рассмотренных методов локальной оценки полезного сигнала в скользящем окне заключается в зависимости погрешности оценки полезного сигнала от априорно выбранного значения окна, краевых эффектов, существенных при работе сенсора в ограниченном объеме.

Использование линейных или нелинейных методов оценивания на каждом скользящем интервале во многом определяется законом распределения шумовой составляющей и функцией полезного сигнала.

Полученные характеристики наглядно демонстрируют, что фильтр Калмана не может эффективно использоваться в подобных задачах. Фильтрация существенно уменьшает шумы, но чувствительна к выбросам.

Ошибка сенсора увеличивается на больших дистанциях, и перед началом работы необходим пересчет коэффициента Калмана. Время расчета выходного значения сигнала на Arduino Nano 1,98 мс. Фильтр Калмана в отсутствие априорной информации о статистических характеристиках нестационарного случайного процесса приведет к значительной ошибке оценки полезного сигнала.

Применение иных методов обработки исходного сигнала повышает требования к аппаратной части изделия по причине более высокой вычислительной сложности, что может быть нецелесообразно в условиях настоящей задачи.

Заключение

Алгоритм работы макета функционального устройства при эксплуатации подтвердил работоспособность в ближней (до 265 см) и дальней (до 400 см) зонах. Выполнены расчет геометрической области детектирования препятствий и анализ существующих методов фильтрации сигналов в условиях различных законов распределений их флуктуаций.

Показано, что разработанный алгоритм нелинейной цифровой фильтрации удобен к реализации на аппаратной платформе Arduino Nano. Установлено, что при различных реализациях сигнала сенсора скользящее окно медианного фильтра в 45 отсчетов занимает 2,26 мс машинного времени.

Разработанный макет функционального устройства позволяет информировать пользователя при помощи вибрации, а не звуковых извещателей (наушников) о неподвижных и малоподвижных препятствиях. Данное обстоятельство является существенным достоинством.

Литература

1. Руй да Силва Фрейташ Д. Система ориентирования, навигации и информации, специально адаптированная для слепых или людей с ограниченными зрительными возможностями. Патент RU №2490694. Заявл. 29.06.2009. Оpubл. 20.08.2013.
2. Шапиро В.А. Способ ориентации незрячего человека и устройство для его реализации. Патент RU №2451501. Заявл. 06.11.2009. Оpubл. 27.05.2012.
3. Телеш В.А., Шабакоев Е.И. Инфракрасный локатор для людей с ослабленным зрением. Патент RU №2359287. Заявл. 17.10.2007. Оpubл. 20.06.2009.
4. Вяжякуопус Е., Кантор В.З. Социальная реабилитация инвалидов с нарушениями сенсорной, двигательной и интеллектуальной сферы. М.: Папирус, 2009. 304 с.
5. Литвак А.Г. Психология слепых и слабовидящих. СПб: РГПУ, 1998. 271 с.
6. Малиновская Н.Д. Психология развития незрячих и слабовидящих людей // Medline.ru. 2001. Т. 2. С. 141–143.
7. Gaunes F. Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas // *Universal Access in the Information Society*. 2006. N 4. P. 338–353. doi: 10.1007/s10209-003-0086-2
8. Schinazi V., Thrash T., Chebat D. Spatial navigation by congenitally blind individuals // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*. 2016. V. 7. N 1. P. 37–58. doi: 10.1002/wcs.1375
9. Kyung-Wook N., Sun-Kyun K., Dong-Hyuk L., Jangmyung L. Vibration pattern for the implementation of Haptic Joystick // *Lecture Notes in Computer Science*. 2013. V. 8102. P. 55–65. doi: 10.1007/978-3-642-40852-6_8
10. Bourbakis N.G., Kaviraki D. A 2D vibration array for sensing dynamic changes and 3D space for Blinds' navigation // *Proc. 5th IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE'05)*. Minneapolis, USA, 2005. doi: 10.1109/bibe.2005.1
11. Юлдашев М.Н. Ультразвуковые системы для определения пространственного положения подвижного объекта // Сборник научных трудов 17й научно-технической

References

1. Ruj da Silva Frejtash D. Guidance, navigation and information system especially adapted for blind or partially sighted people. *Patent RU2490694*, 2013.
2. Shapiro V.A. Method of blind person orientation and device for implementing it. *Patent RU2451501*, 2012.
3. Telesh V.A., Shabakov E.I. Infrared radar for people with weak sight. *Patent RU2359287*, 2009.
4. Vyakhyaquopus E., Kantor V.Z. *Social Rehabilitation of Persons with Disabilities with Sensory, Motor and Intellectual Impairments*. Moscow, Papirus Publ., 2009, 304 p. (in Russian)
5. Litvak A.G. *Psychology of the Blind and Visually Impaired*. St. Petersburg, RSPU Publ., 1998, 271 p. (in Russian)
6. Malinovskaya N.D. Psychology of development of blind and visually impaired people. *Medline.ru*, 2001, vol. 2, pp. 141–143. (in Russian)
7. Gaunes F. Verbal guidance rules for a localized wayfinding aid intended for blind-pedestrians in urban areas. *Universal Access in the Information Society*, 2006, no. 4, pp. 338–353. doi: 10.1007/s10209-003-0086-2
8. Schinazi V., Thrash T., Chebat D. Spatial navigation by congenitally blind individuals. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2016, vol. 7, no. 1, pp. 37–58. doi: 10.1002/wcs.1375
9. Kyung-Wook N., Sun-Kyun K., Dong-Hyuk L., Jangmyung L. Vibration pattern for the implementation of Haptic Joystick. *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, vol. 8102, pp. 55–65. doi: 10.1007/978-3-642-40852-6_8
10. Bourbakis N.G., Kaviraki D. A 2D vibration array for sensing dynamic changes and 3D space for Blinds' navigation. *Proc. 5th IEEE Symposium on Bioinformatics and Bioengineering, BIBE'05*. Minneapolis, USA, 2005. doi: 10.1109/bibe.2005.1
11. Yuldashev M.N. Ultrasound systems for determining the spatial position of a moving object. *Proc. 17th Scientific-Technical Conf. High Technologies and Intelligent Systems*. Moscow, 2015, pp. 465–472. (in Russian)
12. Devillard N. *Fast median search: an ANSI C implementation*, 1998, 14 p.
13. Harres D. *Median filters - an efficient way to remove impulse*

- конференции «Наукоемкие технологии и интеллектуальные системы». Москва, 2015. С. 465–472.
12. Devillard N. Fast median search: an ANSI C implementation. 1998. 14 p.
 13. Harres D. Median filters - an efficient way to remove impulse noise. 2012. 8 p.
 14. Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. SIGGRAPH, ACM, 2001. 81 p.
- noise*, 2012, 8 p.
14. Welch G., Bishop G. *An Introduction to the Kalman Filter*. SIGGRAPH, ACM, 2001, 81 p.

Авторы

Сачков Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57191376574, ORCID ID: 0000-0002-6389-9506, Urie2006@yandex.ru

Юсупова Анастасия Юрьевна – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-1534-1030, 79995292508@yandex.ru

Authors

Mikhail Yu. Sachkov – PhD, Senior lecturer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57191376574, ORCID ID: 0000-0002-6389-9506, Urie2006@yandex.ru

Anastasiya Yu. Yusupova – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-1534-1030, 79995292508@yandex.ru