

УДК 621.375.826; 656.052.1

## ПОВЫШЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ ТРИАНГУЛЯЦИИ В 3D СКАНЕРАХ ДЛЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ РОБОТА

О.Ю. Сергиенко, доцент, к.т.н.,

Институт Инженерии Автономного университета Нижней Калифорнии, Мексика

*Аннотация.* Представлена система технического зрения, разработанная для решения задач автономной навигации: обнаружение препятствий для мобильного робота, определение его местоположения в обозреваемом секторе пространства и создания цифровой карты видимой поверхности с метрологической точностью. Рассматриваются вопросы формирования сигнала, его обработки и повышения разрешающей способности.

*Ключевые слова:* робот, навигация, система технического зрения, фильтр помех.

## ПІДВИЩЕННЯ РОЗРІЗНЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОЇ ТРИАНГУЛЯЦІЇ У 3D СКАНЕРАХ ДЛЯ ЗАДАЧІ НАВІГАЦІЇ РОБОТА

О.Ю. Сергієнко, доцент, к.т.н.,

Інститут Інженерії Автономного університету Нижньої Каліфорнії, Мексика

*Анотація.* Представлено систему технічного зору, розроблену для вирішення багатьох задач автономної навігації: виявлення перешкод для мобільного робота, визначення його місцезнаходження та створення цифрової карти поверхні з високою точністю. Розглядаються питання формування сигналу, його обробки та збільшення розрізняючої здатності.

*Ключові слова:* робот, навігація, система технічного зору, фільтр завад.

## IMPROVEMENT OF DYNAMIC TRIANGULATION METHOD 3D RESOLUTION FOR ROBOT NAVIGATION

O. Sergiyenko, Associate Professor, Candidate of Technical Science,  
Engineering Institute of Autonomous University of Baja California, Mexico

*Abstract.* A technical vision system to resolve multiple tasks which are fundamental for autonomous navigation is represented. These tasks include detecting the presence of significant obstacles for a mobile robot, locating its position in the mobile robot's field of view and creation of a digital map of the obstacle's visible surface with metrological accuracy. This technical vision system has been introduced and explained in other publications; therefore this paper focuses mostly on signal conditioning, processing and resolution increase for mobile robot navigation.

*Key words:* robot, navigation, technical vision system, noise filter.

### Введение

На протяжении многих лет автоматическая навигация является очень интересной и сложной областью, привлекая многочисленных исследователей для решения задач автономного движения мобильного робота. Среди этих задач одна из самых важных – про-

блема обнаружения окружающих препятствий для предотвращения столкновения. Для решения этой проблемы разработаны различные подходы, такие как стереовидение, системы спутниковой навигации, радары, инфракрасные датчики, ультразвуковые датчики, лазеры и различные сочетания перечисленных ранее систем.

### Анализ публикаций

В настоящее время устройства GPS в состоянии установить положения с ошибками от 1 см до 100 м в режиме реального времени, однако есть определенные области, где спутники не могут обеспечить полный или частичный охват, и точность не может быть гарантирована [1].

Другие системы используют монокулярное представление, обрабатывая единственное двумерное изображение, полученное с камеры, чтобы представить реальный трехмерный мир, но оно не передает объемной картинки изображения, поэтому требуются дополнительные датчики. Кроме того, обработка изображения является весьма трудоёмкой из-за большого количества информации [2].

### Цель и постановка задачи

Целью данной работы является создание Системы Технического зрения (СТЗ). Эта система должна решать следующие задачи: использовать лазерное сканирование и метод, названный динамической триангуляцией, которая позволяет системе выдавать цифровую карту местности вокруг робота, и для каждого пункта цифровой карты идет вычисление трехмерной координаты ( $X, Y, Z$ ), при этом вся информация сохраняется в памяти. Проанализированные данные могут использоваться мобильной системой навигации робота, чтобы решить задачу предотвращения столкновения с препятствием и планирования своего пути.

### Работа системы

СТЗ и динамическая триангуляция позволяют получить информацию о положении препятствия, которое возникло перед роботом, в ее трехмерном виде.

СТЗ состоит из двух устройств (рис. 1) [3], которые устанавливаются по бокам робота. Это лазерное оборудование, которое может отслеживать изменения и впоследствии формировать модель окружающей среды вокруг робота.

Мы назвали наш метод динамической триангуляцией вследствие того, что лазер определения положения имеет возможность вращать и переводить лазерный луч на  $180^\circ$  теоретически, и сама сканирующая установка вращается на  $360^\circ$  с постоянной скоростью;

значение координат СТЗ вычисляет используя два динамических угла, существующих на протяжении долей секунды [4, 5].

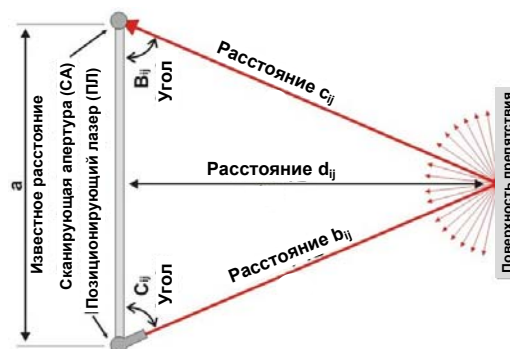


Рис. 1. Динамическая триангуляция

Положение лазера контролируется шаговым двигателем, использующим зеркало со срезом под  $45^\circ$ . После попадания на поверхность препятствия лазерные лучи отражаются, часть их перенаправляется отражающей поверхностью назад к приёмнику, согласно закону отражения (рис. 2) [6].

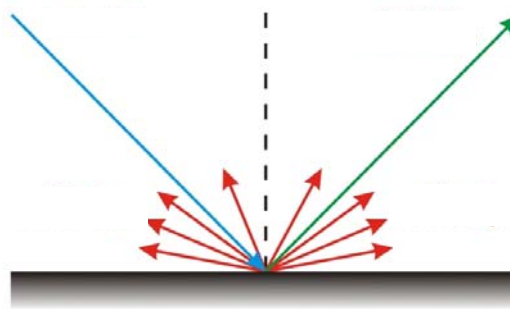


Рис. 2. Схема смешанного отражения (зеркально-диффузного)

Лучи, которые отражены из зоны просмотра, достигают зеркала, которое переадресовывает их на фотоприемник. В этот момент сформированный лазером треугольник фиксируется на короткий отрезок времени, и может быть рассчитан угол  $B_{ij}$  (рис. 1) [7].

Основываясь на законе синусов, мы находим расстояние  $d$  от основания до пункта, освещенного лазерным лучом (рис. 1). Используя углы  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$  и базу измерения  $a$ , вычисляем трехмерные координаты для каждого отсканированного пункта по формулам

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (1)$$

$$y_{ij} = a \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad (2)$$

$$y_{ij} = -a \left( \frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad (3)$$

$$z_{ij} = a \cdot \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin [180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \quad (4)$$

Рис. 3 показывает СТЗ, установленную на мобильном роботе и её действие в окружающей среде. Точность работы СТЗ иллюстрирует рис. 4.

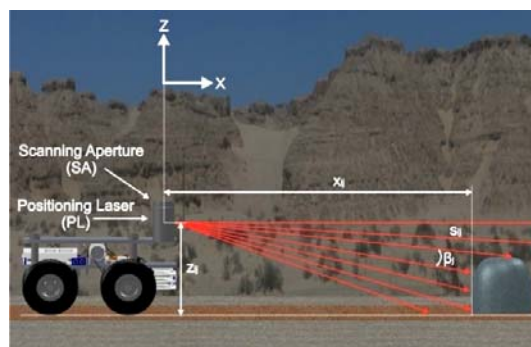
### Фильтр помехи для гарантированной локализации

Одна из главных проблем в работе СТЗ – присутствие типичного входного искажения, накладывающегося на последовательность стоповых импульсов (рис. 6) Этот шум может быть фильтрован (рис. 7) с целью гарантированного обнаружения истинного положения отраженных объектов; другими словами, гарантированная локализация реального места остановки луча на препятствии.

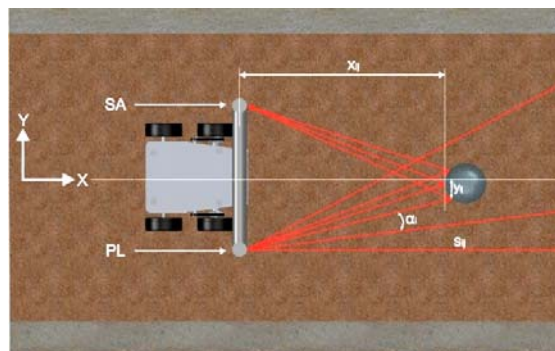
Предварительный анализ источников шума приводит нас к заключению, что помехи являются сложной комбинацией механического шума в электроприводе и синусоидального шума электропитания, произвольно распространяемого по цепям электропитания СТЗ. Поэтому лучшее решение в данном случае – проектирование специального фильтра (рис. 7) для экспериментально определенного шумового спектра.

Как указано ранее, СТЗ имеет два устройства: систему позиционирования лазера и сканирующую апертуру. В последнем есть зеркало со срезом под 45 градусов, линза и фотоприемник (рис. 5).

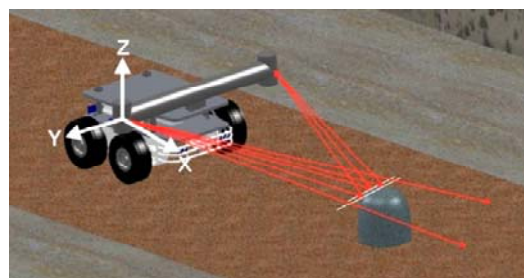
Лазерные лучи рассеиваются во всех направлениях, и только несколько лучей достигают фотоприемника, от полной энергии лазерного луча, который направлен к препятствию только 2% – 5% (как показывает моделирование в MathCAD).



а



б



в

Рис. 3. Работа СТЗ, установленного на роботе: а – главный вид; б – вид сверху; в – изометрический вид

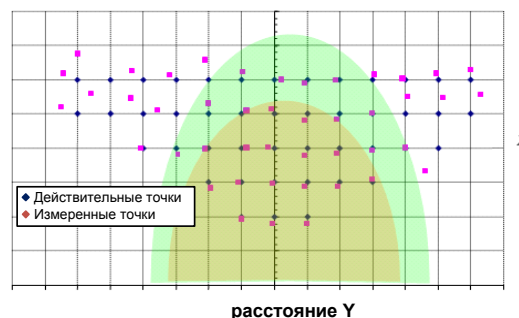


Рис. 4. Распознаваемая зона СТЗ и зона точности (в соответствии с [7])

Отражаются и ощущаются нашим фотоприемником, поэтому сигнал будет находится в диапазоне милливольт и это требует дополнительного усиления сигнала, создающего условия для возможности его последующей обработки.

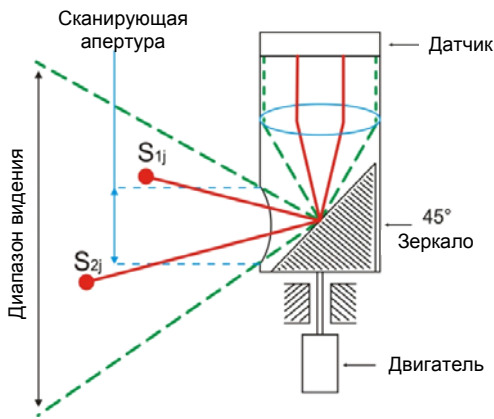


Рис. 5. Анализ угла зрения и прохождения света по оптическому каналу

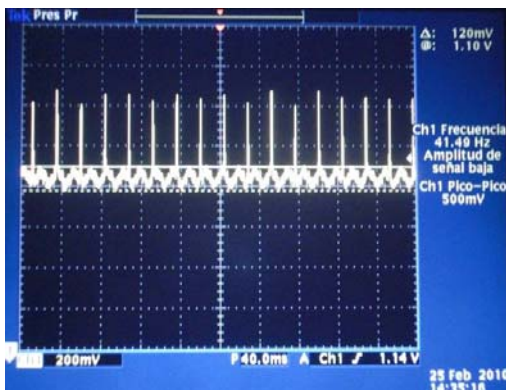


Рис. 6. Изображение амплитуды и частоты реального полезного сигнала и сигнала помехи

Как и в любой системе, шум присутствует здесь также в сигнале, полученном от фотоприемника. После изучения сигнала мы заметили, что шум достигает максимальной амплитуды 120 мВ (рис. 6) с частотами, которые изменяются между 400 Гц и 20 кГц. Для ликвидации этой помехи был разработан и применён узкополосный ( $-60$  дБ/дек) фильтр Баттерворта 3-го порядка. Для понижения амплитуды шума выход фильтра соединяется с датчиком уровня напряжения с

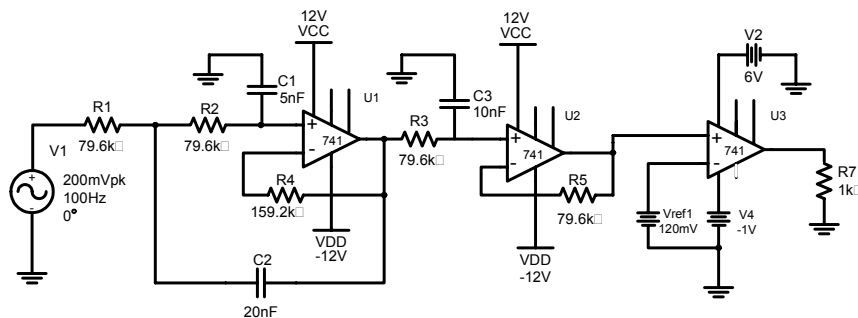


Рис. 7. Схема фильтра низких частот ( $-60$  дБ/дек) и датчик уровня напряжения

эталонном 120 мВ. Всякий раз, когда фотоприемник обнаружит препятствие, в сигнале регистрируется всплеск, напряжение этого скачка изменяется в зависимости от расстояния до обнаруженного препятствия, но всегда больше, чем 120 мВ от уровня шумовой амплитуды.

Выходной сигнал датчика уровня напряжения имеет два значения – 5 В, когда препятствие обнаружено, и 0 В, когда нет никакого препятствия.

Анализ показал, что фильтр Баттерворта имеет большую линейность и более гладкую частотную характеристику в пределах полосы пропускания, поэтому ему было отдано предпочтение перед фильтром Чебышева. Наш фильтр был разработан следующим образом

$$\omega_c = 200; C_3 = 10 \text{ нФ}, \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{2} C_3 = 5 \text{ нФ}, \quad (6)$$

$$C_2 = 2C_3 = 20 \text{ пФ}, \quad (7)$$

$$R = \frac{1}{\omega_c C_3} = 79,617 \text{ кОм}, \quad (8)$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R = 79,617 \text{ кОм} \quad (9)$$

$$R_{f1} = 2R = 159,235 \text{ кОм}, \quad (10)$$

$$R_{f2} = R = 79,617 \text{ кОм}, \quad (11)$$

где  $\omega_c$  – частота среза, её значение в 200 Гц позволяет пропускать сигнал обнаруженного препятствия и ослабляет все частоты выше чем 200 Гц.

Схема фильтра низких частот и выходного датчика уровня напряжения показана на рис. 7.

Фильтр с наклоном ЛАЧХ на  $-60$  дБ/дек получен путём каскадирования двух фильтров: фильтра на  $-40$  дБ/дек и фильтра на  $-20$  дБ/дек. Суммарный коэффициент усиления замкнутого контура определяется умножением коэффициентов усиления каждого фильтра. На рис. 8 показана частотная характеристика для цепи, представленной на рис. 7.

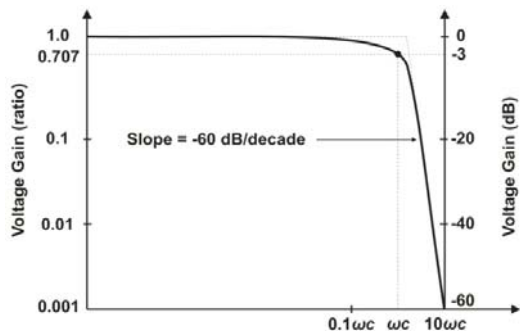


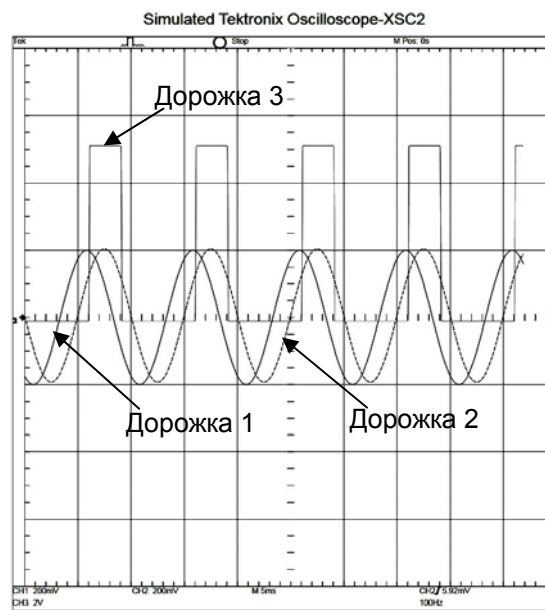
Рис. 8. Амплитудно-частотная характеристика разработанного фильтра

### Результаты моделирования

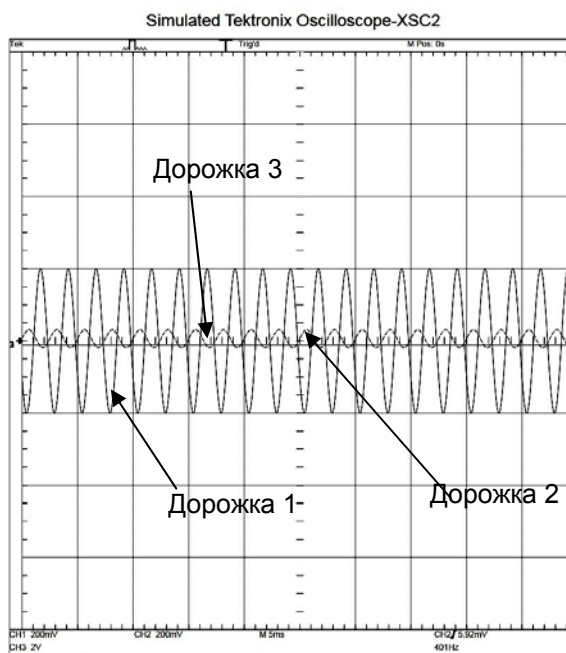
Схема, представленная на рис. 7, моделировалась при помощи программного обеспечения Multisim 10. Рис. 9, а представляет собой вид экрана моделируемого осциллографа Tektronix с тремя сигналами: 1 – сигнал входа фильтра, который моделирует выходной сигнал фотоприемника; он фильтруется и усиливается при моделировании, входной сигнал имеет параметры:  $200$  мВ при  $100$  Гц. Дорожка 2 – выход фильтра, как показано ниже, сигнал имеет ту же самую амплитуду, что и исходный, а его частота находится в области полосы пропускания (ниже  $200$  Гц), то есть сигнал не ослаблен, имеет запаздывание  $8$  мс, но это является допустимым.

И, наконец, дорожка 3 – выход датчика уровня напряжения. Этот сигнал будет принимать значение  $5$  В, если напряжение сигнала с фильтра будет больше, чем эталонное значение  $V_{ref}$  ( $120$  мВ), означая, что препятствие было обнаружено, и остается  $0$  В, если нет никакого препятствия в поле зрения.

Рис. 9, б показывает случай, когда входной сигнал составляет  $200$  мВ при  $400$  Гц. Эта частота находится в области заграждения фильтра (выше чем  $200$  Гц); по этой причине отфильтрованный сигнал (дорожка 2) уменьшен до  $35$  мВ, что подразумевает уровень  $0$  В. Поэтому дорожка 3 тоже имеет значение  $0$  В.



а



б

Рис. 9. Результаты моделирования: а – частота входного сигнала  $100$  Гц; б – частота входного сигнала  $400$  Гц

Таким образом, моделирование демонстрирует, что разработанный фильтр может уменьшить экспериментально обнаруженный нежелательный шум в опытном образце СТЗ с частотой выше  $400$  Гц.

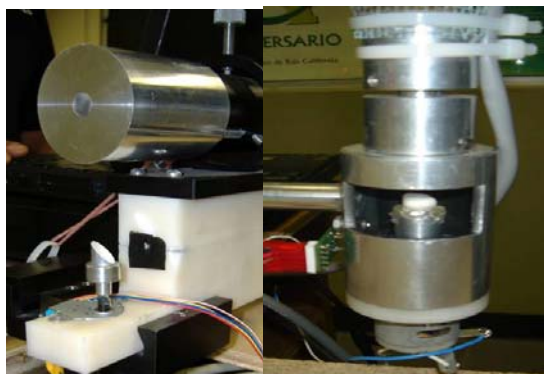
### Эксперимент

На действующем опытном образце (прототип №1), представленном на рис.10, был проведен ряд экспериментов. В результате получена  $95\%$ -ая точность измерения 2-мерных

координат. Погрешность измерения не превышала 5 %-ный порог в любом из точек, в которых проводились измерения. Результаты эксперимента описаны в [3, 4, 7]. В настоящее время на 80 % завершено изготовление прототипа №2. По его завершению, эксперимент будет повторён для измерения 3-мерных координат.



а



б

в

Рис. 10. Прототип I системы зрения: а – общий вид; б – лазерный эмиттер для определения местоположения объекта; в – сканнер изображения

Рис. 10 показывает первый прототип системы, построенный, чтобы продемонстрировать предложенный метод в действии и проверить практические ограничения нашего метода. В результате были обнаружены некоторые недостатки (рис. 4), которые могут быть устранены в новом экспериментальном образце путём улучшения механической части.

Второй опытный образец показан на рис. 11, а, имеет несколько преимуществ по сравнению с его предшественником; самое важное то, что в новом проекте большинство компонентов, включая лазер, установлены в цилиндрической трубе, что уменьшает момент инерции в целом, улучшает баланс сис-

темы и обеспечивает более легкое и точное вращение, нежели зубчатая ременная передача в опытном образце I (рис. 10, а). Другими словами, это усовершенствование уменьшает собственный вращающий момент СТЗ, что обеспечивает нам ряд преимуществ перед первым опытным образцом:

- возможность использования электрического двигателя с более низким вращающим моментом и напряжением;
- в результате уменьшается полный расход энергии системы;
- повышение срока службы аккумулятора, что является существенным преимуществом при использовании на мобильных объектах.

Сравним 10, б и рис. 11, б. Оба варианта позиционера лазера используют 2 зеркала, чтобы дважды преломить лазерный луч на  $90^\circ$ . Второе зеркало, непосредственно присоединенное к шаговому двигателю (рис. 10, б), в итоге переадресовывает лазерный луч в плоскость, для просмотра области перед роботом.

Новый проект прототипа №2 (рис. 11, б) основан на том же общем принципе, но имеет разницу в конструкции. Одно из зеркал (первое) заменено зеркальной шлифовкой корпуса механической конструкции. Главное усовершенствование в этом случае – то, что расстояние между лазером и зеркалами, то есть свободный ход лазерного луча был уменьшен от сантиметров до миллиметров, позволяя уменьшить рассеяние и увеличение диаметра лазерного луча в проекции. СТЗ поэтому теоретически увеличивает диапазон и дальность действия. Изменение диаметра лазерного пятна играет существенную роль в суммарной погрешности, и эта часть проекта важна для уменьшения погрешности системы в целом.

Конструкция сканирующей апертуры подобна в опытных образцах I и II (рис. 10, в и рис. 11, в), единственная разница – то, что новая СА имеет меньшие размеры и установлена внутри цилиндрической трубы. Важно упомянуть, что плоскость, в которой работает СА, должна по возможности идеально совпадать с плоскостью, в которой перемещается лазерный луч. На практике этого не получается достигнуть в полной мере, но это является необходимым условием для созда-

ния динамического треугольника в плоскости, и совершенно понятно, что при изготовлении механической части необходимо применять специальные процедуры юстировки осей вращения.

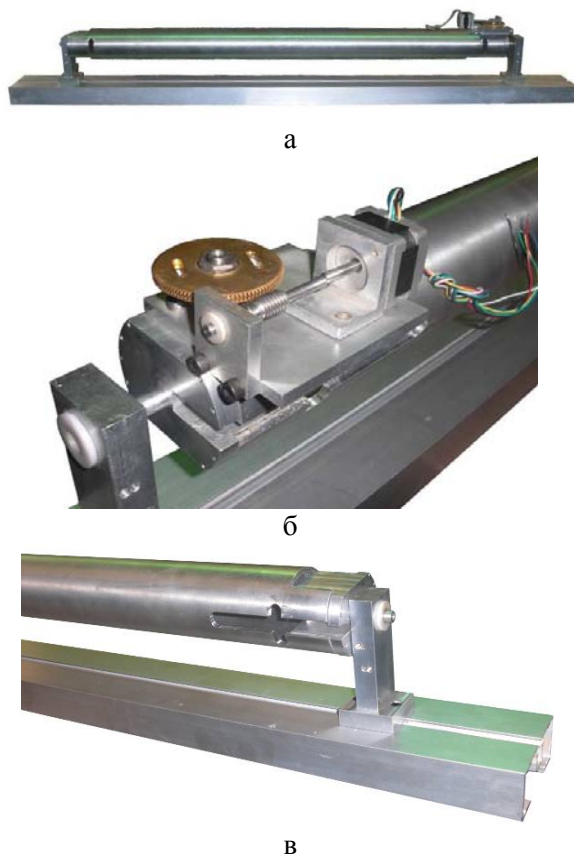


Рис. 11. Прототип II СТЗ: а – внешний вид; б – подсистема позиционирования лазера; в – апертура сканера

**Выводы**

Представленная СТЗ полностью пригодна к решению задачи обнаружения препятствия в автономном режиме, обнаруживает любое число препятствий в поле зрения робота, определяет их положения, создаёт цифровую карту видимой поверхности препятствия в процессе движения с метрологической точностью.

Уменьшение времени срабатывания системы может быть достигнуто заменой стандартных усилителей в фильтрах специальными, благодаря чему можно уменьшить время вычисления координат препятствия и тем самым дать больше времени для навигационных за-

дач робота, например планирования траектории пути.

Также полезным результатом для задач навигации является то, что СТЗ представляет трехмерную модель поля зрения робота.

**Литература**

1. Guivant J. Autonomous Navigation and Map building Using Laser Range Sensors in Outdoor Applications/ J. Guivant, E. Nebot, S.Baiker // Journal of Robotic Systems. – October 2000. – Vol. 17, No 10. – P. 565–583.
2. Quoc V. Vision-Based Autonomous Robot Navigation / V.Do Quoc, P.Loza, L.C. Lakhmi // Studies in Computational Intelligence. – 2005. – Vol. 8. – P. 65–103.
3. Sergiyenko O. Precise Optical Scanning for practical multiapplications / O. Sergiyenko et al. // Proceedings of IEEE 34th Annual IEEE Conference IECON’08, Florida, USA. – 2008. – P. 1656–1661.
4. Lopez M.R. Computer vision / M. Rivas Lopez, O. Sergiyenko, V. Tyrsa. Edited by Xiong Zhihui. – Vienna: Editorial I-TECH, 2008. – 538 p.
5. Petrov M. Optical 3D Digitizers: Bringing Life to the Virtual World / M. Petrov et al // IEEE Computer Graphics and Applications. – May/June 1998. – Vol. 18, Issue 3. – P. 28–37.
6. Serway R.A. Physics: for Scientists and Engineers with Modern Physics / R.A. Serway. – Philadelphia: Saunders, 1990. – 1253 p.
7. Rivas M. Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task / M. Rivas, O. Sergiyenko, M. Aguirre, L. Devia, V. Tyrsa, I. Rendón // IEEE-IES Proceedings International Symposium on Industrial Electronics. – 30 of June –2 of July, 2008. – Cambridge: United Kingdom. – P. 1458–1463.

Рецензент: Л.И. Нефёдов, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2011 г.