

УДК 621.375.826; 656.052.1

**ОПТОЭЛЕКТРОННАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА РОБОТА\*****О. Ю. Сергиенко**

*Engineering Institute of Autonomous University of Baja California,  
Blvd. Benito Juárez and Calle de la Normal S/N, Col. Insurgentes Este,  
21280, Mexicali, BC, Mexico  
E-mail: srgnk@iing.mxl.uabc.mx*

Точность и надёжность спутниковых позиционирующих систем в плотно заселённых городах или внутри помещений существенно снижается из-за ограниченной доступности спутников и сильных эффектов многомаршрутности. Для обеспечения «независимой навигации» в подобных сложных условиях усовершенствуется наземная позиционирующая система. Предложен новый принцип навигации мобильного робота, способного функционировать в сложном неизвестном ландшафте (другая планета или пересечённая местность), который обеспечивает хорошее пространственное разрешение и устойчивость к эффектам многомаршрутности, а также новые оптические средства для реализации «технического зрения». Решены две связанные с этим проблемы: создание системы технического зрения для распознавания образов неизвестного ландшафта и определение направления на начальную точку траектории движения мобильного транспортного робота. Описано принципиальное устройство, функционирование и взаимодействие узлов и элементов системы. Создан математический аппарат для обработки цифровой информации, а также для определения расстояний и угловых величин. Аналитически найдены некоторые важные параметры, такие как ожидаемая точность, скорость функционирования, диапазон действия, энергопотребление и т. д.

*Ключевые слова:* лазерная позиционирующая система, пассивное оптическое сканирование, измерение пространственных координат, обработка оптического сигнала, навигация мобильного робота.

**Введение.** Исследование возможности автоматической навигации мобильного робота (МР) является чрезвычайно актуальной задачей для современной науки, особенно таких её областей, как автоматика и оптоэлектроника. Есть несколько существенно различающихся подходов к решению этой проблемы, например: использование прямого контакта сенсорного элемента с заранее заданным направлением курса [1] (дискретный магнитный, постоянный индукционный или просто визуальный), адаптация ССD- или СМОS-камер для имитации бинокулярного зрения человека [2–5], разнонаправленное зрение на базе камеры с объективом типа «рыбий глаз» [6, с. 2] и т. д. На пути развития каждого из направлений стоят определённые трудности, однако ни одна из систем не является универсальной, готовой к применению на любом мобильном объекте, в любой незнакомой среде без предварительной подготовки. Классический подход к управлению мобильным роботом использовал последовательную стратегию МСПД (Модель, Сенсор, Планирование, Действие) с низким быстродействием, приводящую к полному отказу системы при неполадках одного из модулей.

Беспроводные системы определения местоположения, основанные на системах связи GSM и CDMA2000, включающие определение соты (Cell Identity), угол прибытия (Angle of Arrival) и разницу по времени прибытия (Time-Difference of Arrival), могут обеспечить

---

\*Работа выполнена при частичной поддержке Автономного университета Нижней Калифорнии (проекты № 2352 в 2003–2004 гг. и № 2386 в 2005–2006 гг.).

хороший сигнал. Однако они не способны произвести высокоточное позиционирование, так как не предназначены для навигации. Полевые испытания с использованием сетевых методов позиционирования показали приблизительную экспериментальную точность двумерных ( $2D$ ) координат в пределах от 5 до 500 м [7].

Можно отдельно упомянуть системы навигации объектов и реконструкции поверхностей на основе GPS [8–10]. Эти системы хорошо подготовлены, имеют отличную техническую поддержку и способны выдавать высокое разрешение координат объектов в статическом состоянии, но динамические погрешности любой GSM-системы непредсказуемы. По этой причине большинство GPS-навигаторов применяют другие комбинированные методы для уменьшения подобных погрешностей с использованием осреднения различных статистических данных. Эти методы даже иногда исключают [11] GPS-системы как менее информативные по сравнению с другими датчиками (сканеры, радары, дальномеры и т. д.). Более того, необходимо отметить, что для функционирования GPS-системы нуждаются в мощных спутниковых группировках [6] и вследствие этого не могут быть использованы для навигации мобильного робота на поверхности неизвестной планеты.

В средах с ограниченной видимостью спутников и сильными эффектами многомаршрутности точность и надёжность спутниковых позиционирующих систем существенно уменьшается. Здесь может пригодиться система, основанная на технологии ультраширокого диапазона (Ultra-Wideband (UWB)) [12], обеспечивающая хорошее временное разрешение, устойчивость к многомаршрутности и оптимальную модуляцию. Однако в подобных системах концентрируются все ошибки, связанные с нестабильностью временной шкалы [12], и эти системы требуют относительно дорогого эталона времени. Преимущества оптимальной модуляции не столь очевидны и для навигации робота на другой планете.

Преобразование изображения планарной камеры в трёхмерный ( $3D$ ) формат происходит напрямую [13], так как выступающие группы объектов в  $3D$  могут быть обнаружены системой зрения человека, устроенной по тому же принципу. Это является основой подхода к стереозрению, главная посылка которого заключается в том, что правильные пиксельные соответствия реконструируются в виде выпуклых  $3D$ -поверхностей, тогда как неправильные соответствия недостаточно выровнены и не образуют связных структур. Термин «выпуклость» (saliency) используется в работах, посвящённых распознаванию структур посредством камер, и обозначает, что деталь важна, заметно выступает, является рельефной и привлекает внимание.

Определение выпуклости подразумевает структурную выпуклость, являющуюся результатом приближённости [13] и достаточной непрерывности или же способности привлекать внимание благодаря причинам, включающим новизну и несоответствие окружающим элементам [5]. Однако для хорошего распознавания выпуклости эти системы должны быть предварительно откалиброваны, т. е. должным образом расположены, позиционированы в определённой системе координат, привязаны к известному масштабу и т. д. Таким образом, данная группа технических устройств не подходит для использования на незнакомой местности со случайным начальным позиционированием.

Необходимость конкретных практических решений в этой области возникла с момента высадки МР на Луну. Тогда и были установлены основные принципы конструирования подобных систем [14, 15]. Возможность управления движущимся объектом полностью в автоматическом режиме актуальна для многих практических задач. Это управление автомобилем в дорожном движении, управление транспортированием грузов на промышленном предприятии, исследование планет Солнечной системы с помощью автоматических и радиоуправляемых устройств, доставленных к этим планетам космическими кораблями. Кроме такой передовой области научного знания предлагаемые системы технического зрения применимы и в других не менее важных областях, например: для навигации

дорожно-строительной техники в процессе работы, тяжёлой военной техники в условиях бездорожья, в качестве компонента системы круиз-контроля в автомобиле.

Сегодня успешно развиваются системы автоматического управления воздушным транспортом, так как самолёту не обязательно «исследовать» среду, в которой он движется (воздух не может его повредить). Количество же препятствий на пути самолёта чрезвычайно ограничено. Таким образом, для успешной автоматической навигации движущегося транспортного средства на поверхности необходимо иметь следующие возможности: получение информации о данной поверхности, обнаружение окружающих препятствий и их элементарная классификация (выступ или углубление), измерение расстояний до них и оценка их размеров.

В предлагаемой работе дано описание оптоэлектронной системы, выполняющей все эти функции.

В [16] концепция навигации представляется следующим образом:

- 1) наведение (на цель);
- 2) определение местоположения объекта и составление курса корабля или самолёта;
- 3) кораблевождение.

Навигация МР является следующим по сложности этапом. После самопозиционирования на поверхности с неизвестным ландшафтом и автоматической проверки работоспособности всех систем МР должен «осмотреть» некоторое пространство вокруг себя при помощи системы технического зрения (СТЗ) и начать движение в безопасном направлении от начальной точки. Пройдя небольшое расстояние, МР должен опять осмотреть пространство на своём пути в целях безопасности. Если после расхода некоторого количества энергоресурсов ( $< 50\%$ ) в задачу МР входит возвращение в начальную точку, он должен определить направление и двигаться к ней, используя СТЗ.

Таким образом, для навигации МР необходимо решение двух технических задач: создание СТЗ и создание системы, способной находить направление к начальной точке траектории, случайно расположенной на одной поверхности с МР.

В настоящее время быстродействие 3D-сканеров поверхности ограничено как полосой пропускания интерфейса компьютера, так и требованием записывать данные изображения, прежде чем программа перейдёт к вычислению  $n$  следующих необходимых точек. На базе сравнения преимуществ и недостатков нескольких подходов к задаче навигации МР в данной работе предлагается новый метод оптического сканирования с последующей обработкой аналитической информации для точного определения 3D-координат, удобный для непрерывного сканирования окружения робота. Этот метод предлагает оптимальное соотношение между точностью, низкой себестоимостью и диапазоном действия в реальном времени для получения координат необходимых  $n$  точек.

**Система технического зрения для мобильного робота.** В [13] для СТЗ, как и для адаптируемых машинных систем обучения, полагают необходимыми следующие требования:

- локальность,
- управляемость данными,
- возможность работы без оператора,
- способность к обработке больших объёмов данных,
- способность представлять все типы структур и их взаимодействия одновременно,
- устойчивость к шуму,
- способность следовать стратегии наименьших затрат с отсрочкой принятия сложных решений.

Основные элементы СТЗ, оптимально соответствующие большинству этих требований, и их расположение на МР показаны на рис. 1.

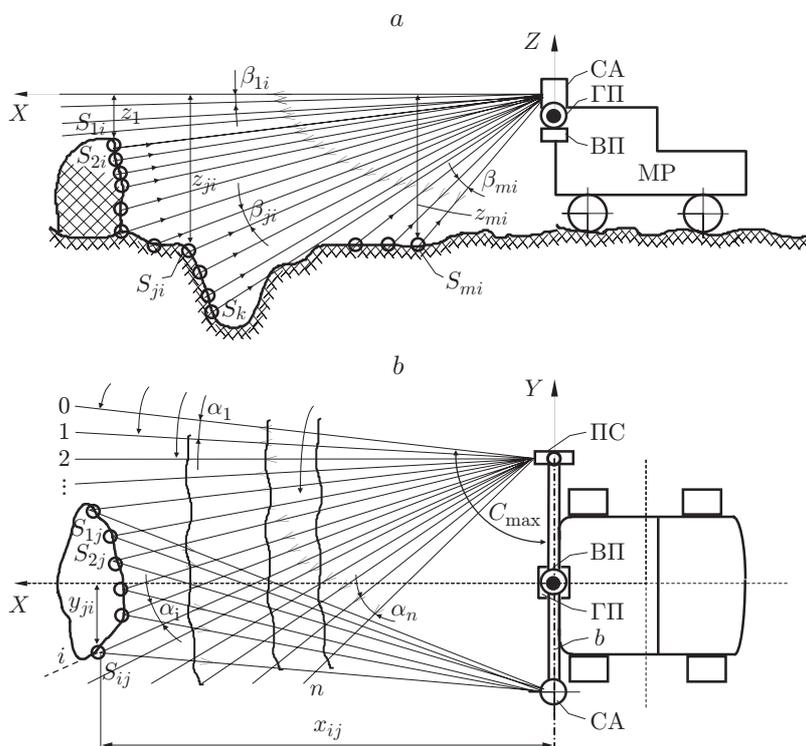


Рис. 1. Принцип функционирования СТЗ: *a* — боковая проекция, *b* — вид сверху

СТЗ представляет собой лазерную угломерно-дальномерную систему, расположенную в передней верхней части МР. СТЗ включает в себя достаточно мощный лазер с коллиматором, размещённые в собственной лазерной позиционирующей системе (ПС) (рис. 1, *b*). ПС имеет шаговый привод, который по команде бортового компьютера может поворачивать её в горизонтальной плоскости с шагом в  $1^\circ$ . Эта система находится на одном конце горизонтальной штанги *b*, а на другом — сканирующая апертура (СА) (отдельно показана на рис. 2). Ось СА перпендикулярна к штанге и плоскости  $XOY$  (точка  $O$  совмещена с центром СА). Штанга *b* своей средней частью установлена на собственной позиционирующей системе, имеющей шаговые горизонтальный привод (ГП) и вертикальный привод (ВП).

СТЗ работает следующим образом. По команде компьютера штанга устанавливается так, чтобы ось вращения СА стала перпендикулярной к плоскости  $XOY$  в эталонной системе СТЗ. ПС перемещает лазер с коллиматором, например, в крайнее правое положение. Затем при помощи шагового ВП ось коллиматора занимает крайнее верхнее положение (над горизонтом). Включаются лазер и СА. Система непрерывно вращается электродвигателем (ЭМ) с прецизионно-постоянной скоростью. С каждым поворотом СА лазерный луч, попадая на препятствие, диффузно от него отражается (точка  $S_{ij}$ ) и возвращается на зеркало (З) (см. рис. 2). В тот момент, когда три составляющие: точка отражения  $S_{ij}$ , перпендикуляр к зеркалу и вертикальная ось СА, находятся на одной плоскости, перпендикулярной к плоскости  $XOY$ , при вращающейся СА оптический сигнал проходит путь « $S_{ij}$  — зеркало — объектив (О) — оптический канал (ОК) — фотоприёмник (ФП)» и формирует электрический сигнал «Стоп». Сигнал «Старт» предварительно формируется СА с помощью датчика нуля (датчика исходного положения, закреплённого на оси штанги *b*, см. рис. 2, *b*).

Подавая импульсы эталонной частоты  $f_0$  через интервал времени  $t_{B1} = B_1/\omega$  (где  $B_1$  — угол между осью штанги (направление датчика нуля) и направлением СА ( $S_{ij}$ ))

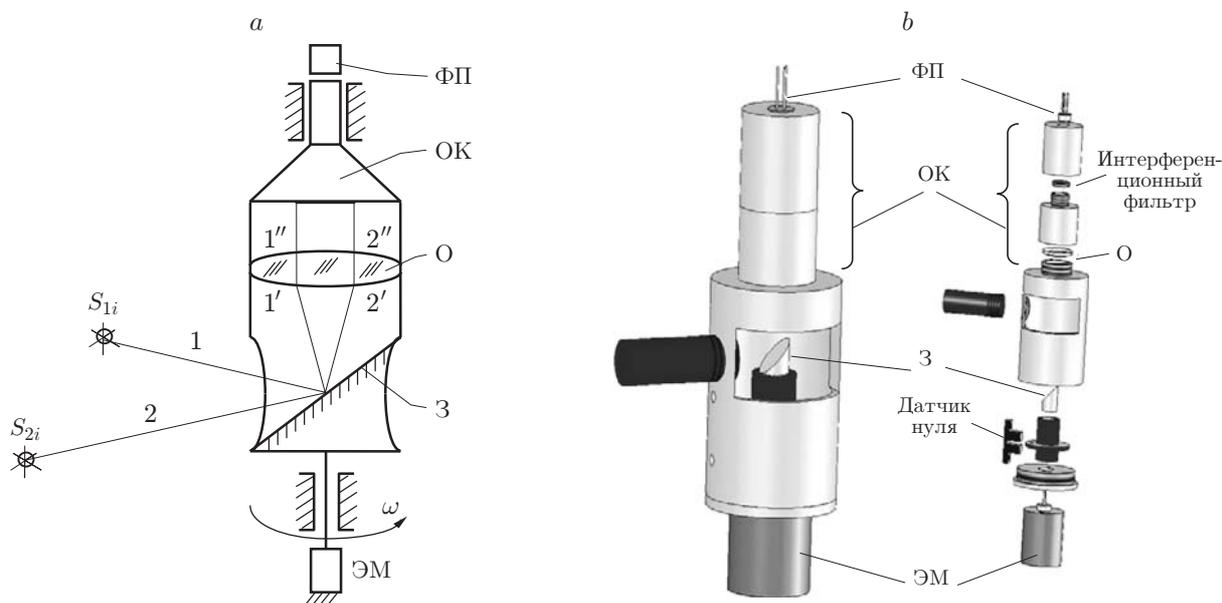


Рис. 2. Сканирующая апертура: *a* — принцип функционирования, *b* — общее устройство

(рис. 3);  $\omega$  — частота вращения СА), получим код  $N_{B1} = t_{B1} f_0$ . Время цикла вращения СА  $T_{2\pi1} = 2\pi/\omega$  одновременно заполняется такими же импульсами с частотой  $f_0$ . Формируется код  $N_{2\pi1} = T_{2\pi1} f_0$ . Запоминается угол  $B_1 = 2\pi N_{B1}/N_{2\pi1}$ .

Важно отметить, что данная СА, точнее пассивная СА, как независимый узел имеет очень высокую точность измерения угловых координат. Она может быть использована для задачи навигации, так же как и для измерения статических координат [17], например для мониторинга структурной целостности важных гражданских инженерных сооружений [18]. Так, для наименьшего предела частоты стабилизированного эталонного осциллятора 1 МГц и скорости вращения 1 оборот/с имеем точную шкалу в 1000000 единиц для полного угла  $360^\circ$ . Даже такое разрешение ( $0,00036^\circ$ ) является превосходным для упомянутой задачи. Однако его ещё можно улучшить, повысив эталонную частоту или уменьшив скорость сканирования.

Когда зеркало СА проходит направление на точку  $S_{ij}$ , лазер отключается для экономии энергии. На ПС подаётся электрический импульс, шаговый двигатель поворачивает

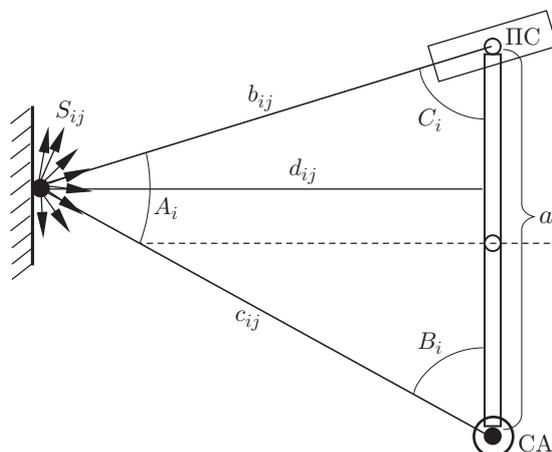


Рис. 3. Схема триангуляции для точного измерения координат

лазер вместе с коллиматором на угол  $\alpha_1$  вдоль горизонта (см. рис. 1, *b*). При приближении зеркала сканирующей апертуры к «сектору обзора» МР лазер включается. Если лазерный луч в своём новом положении встречается с препятствием, формируется новая точка отражения и цикл измерения повторяется. Если лазерный луч не встречает препятствия, то отражения не происходит и новая точка не формируется. В этом случае, как и при наличии точки отражения, формирование кода  $N_{B2}$  начинается со стартового сигнала датчика нуля. Как только этот код достигает некоторого заранее определённого значения, превышающего диапазон возможных значений кода, соответствующих сектору обзора, счётчик, формирующий коды  $N_{Bi}$ , обнуляется и лазер выключается. Шаговый привод ПС поворачивает лазер на угол  $\alpha_2$ .

Циклы с измерением углов на точки отражения, если таковые сформированы препятствиями, или единичные циклы сканирования, когда препятствия нет, повторяются в том же порядке. Величины углов  $B_i$  в цикле, где имелись точки отражения, сохраняются. Когда ПС находится в крайнем положении  $n$ , обусловленном минимальным расстоянием и максимальным углом обзора, шаговый двигатель позиционирующей системы штанги поворачивает её вокруг горизонтальной оси на угол  $\beta_1$  (см. рис. 1, *a*). Циклы с измерением углов  $B_i$  повторяются. Углы  $\alpha_i$  перебираются в обратном порядке от положения  $n$  до положения 0.

В некотором положении плоскости движения лазерного луча (справа налево или наоборот) все фиксированные лазерные лучи будут встречаться с исследуемой поверхностью, создавая точки отражения  $S_{ij}$ . Если в этом случае мощность лазерного излучения и расстояние до точек отражения, а также чувствительность фотоприёмника достаточны для формирования стоп-импульсов, то пустых циклов сканирования СА не будет. Циклы измерения повторяются до тех пор, пока плоскость, образуемая горизонтальной осью штанги  $b$  и последней точкой  $S_{ij}$ , отклоняется от плоскости  $XOY$  на угол  $\sum_{j=1}^m \beta_j$ .

Как уже упоминалось выше, измеренные значения углов  $B_{ij}$  накапливаются в памяти компьютера. Один из таких углов показан на рис. 3. Угол  $C_{ij} = C_{\max} - \sum_{i=1}^i \alpha_i$ , где  $C_{\max}$  — начальный угол положения ПС. Углы  $C_{ij}$ , так же как и углы  $\sum_{j=1}^i \beta_j$ , на каждом цикле фиксируются в памяти одновременно с измеренными углами  $B_{ij}$ .

Используя теорему синусов и соотношение между сторонами и высотой треугольника, представленного на рис. 3, можно найти формулу для вычисления наклонных расстояний  $d_{ij}$  от основания  $a$  до точек, освещённых лазером:

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

где  $a$  — базовое расстояние между осями вращения ПС и СА, которое точно измеряется предварительно.

Используя значения углов  $B_{ij}$ ,  $C_{ij}$ ,  $\sum_{j=1}^j \beta_j$  и основания  $a$ , можно вычислить прямоугольные координаты каждой освещённой лазером точки (рис. 4) в эталонной системе координат  $OXYZ$  системы технического зрения по следующим формулам:

$$x_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \cos \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}, \quad (2)$$

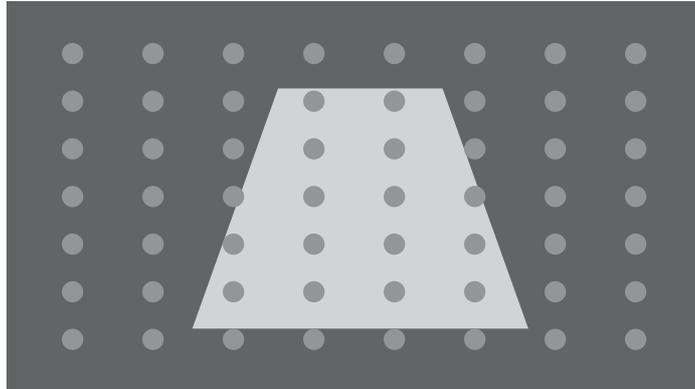


Рис. 4. Поиск препятствия в секторе посредством дискретного 3D-сканирования лучом лазера

$$y_{ij} = a \left( \frac{1}{2} - \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{при } B_{ij} \leq 90^\circ, \quad (3)$$

$$y_{ij} = -a \left( \frac{1}{2} + \frac{\sin B_{ij} \cdot \cos C_{ij}}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]} \right) \quad \text{при } B_{ij} > 90^\circ, \quad (4)$$

$$z_{ij} = a \frac{\sin B_{ij} \cdot \sin C_{ij} \cdot \sin \sum_{j=1}^j \beta_j}{\sin[180^\circ - (B_{ij} + C_{ij})]}. \quad (5)$$

Таким образом, бортовой компьютер с помощью СТЗ обеспечивает цифровую карту-описание местности в секторе обзора МР в реальном времени. Если в направлении наблюдения находятся любые объекты, например впадина или выступ на поверхности (в этих местах точки  $S_{ij}$  расположены густо), МР с использованием ВП поворачивает СТЗ на угол  $\sum_{i=1}^n \alpha_i$  влево или вправо в зависимости от расположения препятствия по отношению к оси  $OX$  и осматривает новый сектор.

**Быстродействие системы технического зрения.** В секторе обзора МР количество фиксированных точек  $K = mn$  ( $m, n$  — количество точек по вертикали и горизонтали). От него зависит как полнота полученной информации, так и быстродействие СТЗ при заданном быстродействии СА.

Зеркало СА вращается электромотором. Так как результат измерения углов  $B_i = 2\pi N_{Bi}/N_{2\pi i}$  не зависит от скорости вращения ЭМ системы поиска, возможно использование высокоскоростного ЭМ постоянного тока или асинхронного мотора переменного тока с повышенной частотой.

На рис. 2 представлен случай, когда одно измерение выполняется за время одного оборота зеркала. Если мотор вращается со скоростью  $v$  (оборот./с), то частота измерения направлений (углов) на освещённые точки в секторе обзора одна и та же. Эта частота может быть увеличена, по крайней мере, на порядок (10–12 раз), если использовать вместо зеркала пирамиду с  $l = 10 \dots 12$  отражающими гранями. Тогда частота измерения углов на освещённые точки  $fm = lv$ .

Если, например,  $v = 100$  оборот./с, тогда  $l = 10$ ,  $fm = 10 \cdot 100 = 10^3$  1/с. Для  $K = mn = 100$  СТЗ выдаёт на компьютер  $W = Fu/K = 10^3/10^2 = 10$  изображений в секунду. При  $K = mn = 1000$  СТЗ с пирамидальным зеркалом выдаёт на компьютер одно изображение в секунду. Для грузового робота на заводе 10 изображений в секунду вполне достаточно; для МР на неровной поверхности другой планеты, где скорость передвижения не является основным критерием, возможно увеличение  $K$  до  $10^3$  и выше для получения одного детального изображения в 1 или 2 с.

Предполагается, что тактовая частота всех шаговых приводов и бортового компьютера СТЗ превышает частоту измерения углов СТЗ. Измеряя углы  $B_{ij}$ , компьютер распознаёт местность и определяет маршрут в реальном времени.

**Точность составления карты наблюдаемой поверхности.** Под этим критерием будем понимать определение погрешностей координат  $X, Y, Z$  для точек на изучаемой поверхности. Необходимо иметь в виду тот факт, что ошибки в измерении углов являются основным источником погрешностей. Экспериментально доказано, что среднеквадратичная погрешность (СКП) одного измерения угла  $B_{ij}$  с помощью СА равна 10–14 угл. с. Для сравнения погрешность шага привода составляет 3–5 угл. с. Примем, однако, что СКП углов  $B_{ij}, C_{ij}, \sum_{j=1}^j \beta_j$  составляет 15 угл. с.

Для нахождения СКП в определении координат  $X, Y, Z$  точек отражения можно использовать метод моментов [19], основанный на том факте, что зависимость функции  $\psi = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_i)$  от аргумента  $x_i$  вблизи математического ожидания подобна линейной, а распределение величин аргументов является нормальным (гауссово распределение). Ожидание и СКП «почти линейных» функций можно приблизительно выразить формулами

$$M(\psi) = \varphi(M_1, M_2, \dots, M_i), \quad (6)$$

$$\sigma_\psi^2 = \sum_{i=1}^i \left( \frac{d\varphi}{dx_i} \right)_M^2 \sigma_{x_i}^2. \quad (7)$$

В рассматриваемом случае выражения (2)–(5) соответствуют формуле (6). Однако вычисление СКП для каждой координаты, определённой по формулам (2)–(5), является достаточно громоздким, поэтому используется приближённое вычисление СКП для координат  $X, Y, Z$ .

Положим

$$dB/d_{ij} = \sin \sigma_B'' \approx \sigma_B''/\rho'', \quad (8)$$

где  $dB$  — дуга, стягивающая угол  $\sigma_y$ , выраженный в радианах;  $\rho'' = 206265''$ . С другой стороны,

$$\sigma_d/d_{ij} = dB/a. \quad (9)$$

Здесь  $\sigma_d$  — СКП в определении расстояния  $d_{ij}$ . Подставляя значение  $dB$  из (8) в (9) и учитывая СКП угла  $C$ , имеем

$$\sigma_d = \frac{\sqrt{2} d_{ij}^2}{a \rho''} \sigma_B''. \quad (10)$$

Зависимость  $\sigma_d$  от  $d_{ij}$  представлена в табл. 1.

Таблица 1

$d$ , м	$\sigma_d$ , мм	$d$ , м	$\sigma_d$ , мм
1	0,10	10	10,28
2	0,41	20	41,14
3	0,93	30	92,55
4	1,65	50	257,11
5	2,57	100	1028,43

Сравнивая (1), (2) и (1), (5), видим, что они различаются только выражениями  $\cos \sum_{j=1}^j \beta_j$  и  $\sin \sum_{j=1}^j \beta_j$ , значения которых не превышают 1. Таким образом, СКП при определении координат точек на осях  $X$  и  $Z$  не превышает  $\sigma_d$ , т. е.  $\sigma_x \approx \sigma_z < \sigma_d$ .

СКП при определении координат  $Y_{ij}$  может быть рассчитана на основании (8):

$$\sigma_y = \sqrt{2} dB \approx \sqrt{2} d_{ij} \sigma_B'' / \rho''.$$

Значение  $\sigma_y$  линейно изменяется от 0,1 мм для  $d_{ij} = 1$  м до 10 мм на расстоянии 100 м от центра координат.

**Диапазон действия системы технического зрения.** Этот параметр главным образом определён и ограничен мощностью лазера и чувствительностью (порогом восприимчивости) фотоприёмника СА.

Поток лазерного излучения  $P_L$ , встречая препятствие, отражается. Допустим [20–22], что он диффузно рассеивается с постоянной интенсивностью  $I$ , распределяясь равномерно внутри телесного угла  $\Omega_S$ , т. е.

$$I = P_L / \Omega_S. \quad (11)$$

Телесный угол рассеивания  $\Omega_S = 4\pi \sin^2(i_p/2)$  [20, 21]. Здесь плоский угол рассеивания  $i_p = 180^\circ$ . Световой поток, возвращающийся на зеркало СА и попадающий на ФП, описывается как

$$P_m = I \Omega_m. \quad (12)$$

Известно [20–22], что

$$\Omega_m = S_m / d_{ij}^2 \quad (13)$$

— телесный угол с вершиной в точке отражения и основанием, находящимся на зеркале СА с общей площадью  $S_m$ , когда перпендикуляр к зеркалу, точка отражения и ось вращения СА находятся в одной плоскости. Таким образом,

$$d_{ij}^2 = S_m / \Omega_m, \quad (14)$$

Используя (11)–(14), имеем

$$d_{ij} = \left( \frac{k S_m}{(C/Ш) \Omega_S} \frac{P_L}{P_p} \right)^{0,5}, \quad (15)$$

$$P_L = \frac{(C/Ш) \Omega_S}{k S_m} P_p d_{ij}^2. \quad (16)$$

Фактор  $k \ll 1$  учитывает потери излучённой энергии на отражение и прохождение сигнала через оптический канал СА. Здесь С/Ш — отношение сигнал/шум [21], вместо светового потока  $P_m$  использована величина пороговой чувствительности ФП  $P_p \geq P_m$ . Подставляя параметры  $k = 0,2$ ,  $S_m = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $\Omega_S = 6,28 \text{ ср}$ ,  $\text{С/Ш} = 5$ ,  $P_p = 10^{-8} \text{ Вт}$ ,  $d_{ij} = 20 \text{ м}$  в (15), (16), получим

$$P_L = \frac{5 \cdot 6,28 \cdot 10^{-8} \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{0,2 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 1,26 \text{ Вт}.$$

Для  $d_{ij} = 100 \text{ м}$  поток лазерного излучения  $P_L = 31,5 \text{ Вт}$ .

**Направление от мобильного робота на начальную точку траектории.** Для разработки этой системы можно использовать СА. Если космический аппарат оснащён проблесковым маячком, то его сигналы будут служить в качестве стоп-импульсов так же, как и точки отражения лазерного луча. Угол отклонения оси  $OX$  от направления на маяк

$$A_M = \alpha_M - 90^\circ. \quad (17)$$

Используя это выражение, в любой контрольной точке пройденной траектории можно узнать направление на начальную точку этой траектории. Длина пути может быть вычислена тригонометрически или просто записана одомером, или одновременно обоими методами для дальнейшего осреднения и оценки неточности позиционирования.

**Конструирование прототипа системы технического зрения и эксперимент.** Теоретические вычисления, приведённые выше, требуют экспериментальных подтверждений. Экспериментальный образец легко реализовать на недорогой элементной базе. Для практической проверки предложенного метода был построен прототип описанной СТЗ с использованием следующих элементов:

- алюминиевой штанги длиной 1 м (с погрешностью  $\pm 0,01 \text{ мм}$  в юстировке между лазерным источником и центром СА);
- шаговых двигателей для вертикального и горизонтального сканирования;
- источника света (в данном случае лазер мощностью 20 мВт (JDS Uniphase, модель 1136P));
- пары зеркал, срезанных под углом  $45^\circ$  (срез сбалансированных по моменту вращения цилиндров является отражающей поверхностью, каталог Edmund), размещённых в излучательном блоке и сканирующей апертуре (рис. 5);

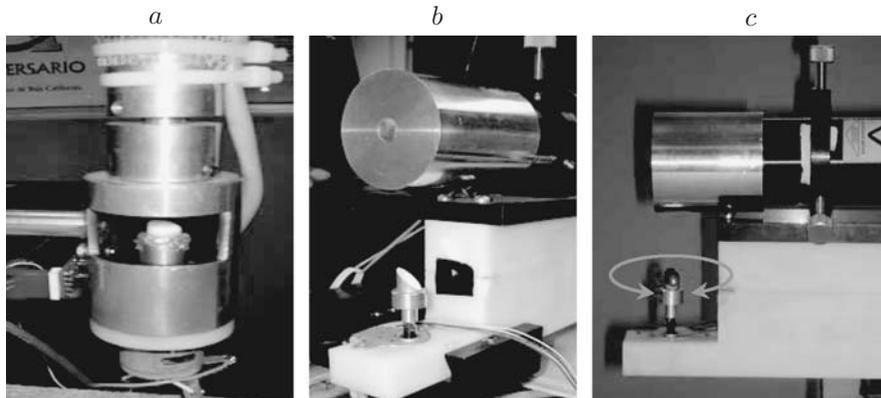


Рис. 5. Элементы СТЗ: *a* — сканирующая апертура; *b, c* — лазерный эмитсор



Рис. 6. Управляющий компьютер системы в действии: лабораторные измерения на реальных препятствиях

- двигателя постоянного тока (MD5-2554AS-AA, каталог Jamesco) для вращения СА с постоянной скоростью;
- высокоскоростного фотоприёмника (15,0 мм<sup>2</sup> TO-2 Silicon Detector) для превращения светового сигнала в электрический;
- линзы в апертурном блоке для точного сведения света на фотоприёмник;
- датчика нуля (OT124 H21A1, каталог Jamesco) в апертурном блоке для обнаружения и подсчёта оборотов зеркала;
- интерференционного фильтра для пропускания только выбранного источника света.

Это оборудование управляется компьютером IBM Pentium II с использованием программы на TurboC в MS-DOS, где сохраняются измеренные расстояния (рис. 6). Передача данных осуществляется через параллельный порт.

Длина всего прототипа не превышает 1 м. Данные могут сохраняться в другой системе. Готовый прототип со всеми элементами в действии показан на рис. 7.

Управление моторами и обработка цифровых сигналов осуществлялись основным компьютером. Два цифровых сигнала с оптических сенсоров поступают в устройство через параллельный порт. Отдельная программа на языке C++ постоянно сканирует статус порта (частота сканирования 11,467 кГц). В соответствии с частотой сенсора и частотой сканирования порта 11467 импульсов составляют полный поворот ( $2\pi$  рад). Каждый раз



Рис. 7. Общий вид экспериментальной установки в действии

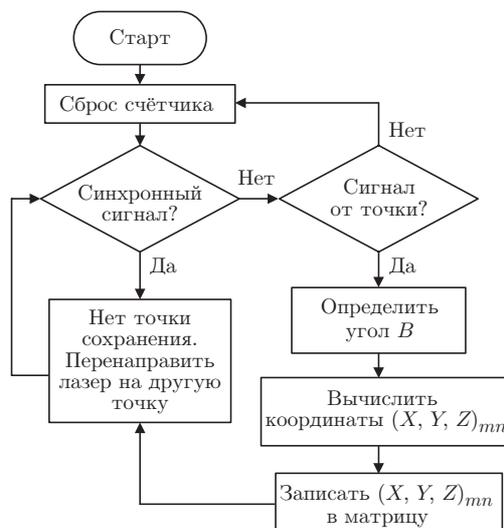


Рис. 8. Алгоритм работы системы

появление этого сигнала означает, что присутствует отражение лазера, и затем посредством тригонометрических функций (2)–(5) определяются три координаты точки (рис. 8).

Для проверки точности зрения под разными углами для  $2D$ -координат проведено 50 испытаний данного прототипа в разных положениях на узловой решётке с использованием отражающих и поглощающих объектов. В табл. 2 частично приведены результаты этих измерений, полученные прототипом на поверхности с нанесённой координатной сеткой.

Значения табл. 1 графически показаны на рис. 9: ромбы обозначают величины расстояний, полученные прототипом обычным образом (на экспериментальной установке в нормальном режиме работы); треугольники — это расстояния, измеренные прототипом, но с использованием независимого источника света в каждой точке измерений (без лазера прототипа); квадраты — действительные расстояния.

Очевидно, что величина ошибки весьма мала в центре таблицы, который также является центральной линией зрения прототипа, и что вблизи обоих краёв угла обзора ошибка максимальна. В этом прототип СТЗ напоминает зрение человека: впереди изображение очень детальное и точное, тогда как обе границы угла обзора не имеют большой точности, что может быть исправлено поворотом головы, а прототип изменяет направление обзора.

Анализируя результаты измерений и их числовые значения, можно отметить, что все эксперименты были выполнены со степенью достоверности не менее 95 %. А неточность измерений, особенно ошибка смещения, не превосходит 5 %-ного порога в любой точке, даже при расширенном угле обзора, где такая точность не обязательна.

Детальный анализ оригинальной конструкции и принципа действия сканирующей апертуры (см. рис. 2 и 5) приводит к выводу, что возможно получить результаты измерений с одинаковой погрешностью от освещённых точек, находящихся в различных положениях внутри определённого угла обзора. Это является существенным преимуществом представленного устройства перед другими известными лазерными триангуляционными сканерами [23–26].

В общем поведение погрешности повторяет график, представленный на рис. 6 в [24, с. 1765], однако точность около границ в нашей системе более высокая. Точность (смещение измеренной координаты) в контрольных точках центральной части угла обзора сканера в 2–7 раз выше по сравнению, например, с [24].

Таблица 2

Тестовая точка	Теоретическая величина				Измеренное значение			
	$X$ , м	$Y$ , м	$B$ , град	$C$ , град	$X$ , м	$Y$ , м	$B$ , град	$C$ , град
$B$	120	120	120,26	35,22	124,21	128,68	123,43	34,80
$D$	100	100	116,57	33,69	99,83	104,48	118,46	32,87
$F$	100	80	106,70	37,57	95,30	76,86	106,40	36,91
$H$	120	60	94,76	47,49	122,92	63,49	96,38	47,28
$J$	80	60	97,13	36,03	77,00	58,62	96,57	35,33
$L$	80	40	82,87	41,63	79,99	42,15	84,00	40,95
$N$	120	40	85,24	53,13	119,86	40,04	84,48	53,08
$O$	120	20	75,96	59,74	119,22	19,48	76,01	59,76
$P$	100	20	73,30	55,01	97,60	19,15	72,94	54,67
$Q$	80	20	69,44	48,81	79,11	18,70	68,39	49,04
$R$	60	20	63,43	40,60	60,33	21,70	64,30	40,07
$S$	40	20	53,13	29,74	39,14	19,59	52,07	29,35
$T$	40	0	38,66	38,66	36,52	1,06	36,52	36,73
$U$	60	0	50,19	50,19	59,80	0,90	49,39	50,625
$V$	80	0	57,99	57,99	80,93	3,49	56,70	60,11
$W$	100	0	63,43	63,43	103,58	1,51	63,45	64,68
$X$	120	0	67,38	67,38	120,72	-4,70	66,23	69,43
$Y$	120	-20	59,74	75,96	118,54	-18,36	59,95	75,05
$Z$	100	-20	55,01	73,30	96,72	-18,37	54,70	71,90
$A_1$	80	-20	48,81	69,44	75,79	-18,33	48,03	67,32
$B_1$	60	-20	40,60	63,43	58,00	-18,53	39,50	61,52
$C_1$	40	-20	29,74	53,13	36,17	-20,31	27,30	50,62
$D_1$	60	-40	33,69	80,54	58,05	-38,63	33,60	78,92
$E_1$	80	-40	41,63	82,87	77,46	-38,26	40,46	81,38
$F_1$	100	-40	48,01	84,29	97,10	-38,02	46,94	82,96
$H_1$	120	-60	47,49	94,76	123,68	-61,03	48,21	95,09
$J_1$	80	-60	36,03	97,13	78,90	-59,73	35,37	97,03
$L_1$	80	-80	31,61	110,56	80,52	-80,21	31,81	110,56
$N_1$	120	-80	42,71	104,04	121,01	-78,73	43,34	103,35
$P_1$	100	-100	33,69	116,57	101,65	-96,18	35,06	114,43
$R_1$	100	-120	30,47	124,99	111,73	-126,15	32,09	124,27

Наиболее обсуждаемым пунктом является чувствительность СТЗ с изменяемой длиной оптического канала. Обработка электрического сигнала в контуре ФП сканирующей апертуры обеспечивается трансимпендансным усилителем стоп-сигнала специальной конструкции. Проведён эксперимент со следующими начальными условиями (ограниченными параметрами оптического стола): скорость сканирования 10 оборот./с, расстояние до препятствия 7,5 м, угол сканирования  $90^\circ$  (близкий к критическому). Во время эксперимента рассеянно отражённый луч лазера был преобразован в пропорциональный электрический сигнал, вполне подходящий [27] для дальнейшей цифровой обработки.

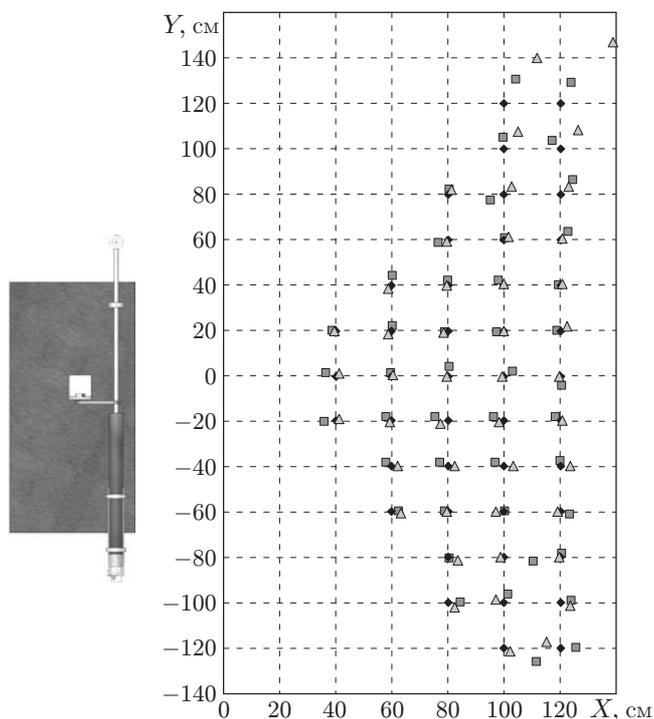


Рис. 9. Измерения 2D-координат в различных положениях препятствия

Как видно из экспериментальных данных, детально описанных в [28], затухание электрического сигнала, вызванное рассеянием энергии в диффузно отражённом лазерном луче, не столь уж критично в рассматриваемом приложении. Как в случае уменьшения угла падения, так и в случае уменьшения расстояния до препятствия величина регистрируемого сигнала вполне достаточна для расстояний, требующихся в задаче медленной навигации робота [28].

Система, показанная на рис. 5–7, спроектирована и построена для лабораторных испытаний [17, 18, 29]. Эксперимент по получению координат  $(X, Y)$  освещённых точек проведён с использованием гелий-неонового лазерного источника JDS Uniphase 1135P (20 мВт) (см. рис. 6).

Параметры прототипа [30]:

— частота дискретизации 231 точка для изображения в фиксированном секторе обзора  $1 \times 2$  м с опорной частотой 114,675 кГц;

— скорость вращения мотора постоянного тока Jamesco MD5-2554AS-AA составляет 13860 оборот./мин, при 17000 оборот./мин вращающий момент равен 72,92 г/см, но на практике скорость была уменьшена до 7–13 оборот./с из-за времени ответа выбранного фотосенсора;

— динамический диапазон 7–13 Гц с опорной частотой 114,675 кГц на максимальной скорости;

— спектральный диапазон  $\lambda = 625\text{--}740$  нм для сенсора с пиковым значением вблизи полосы частот лазера и  $\lambda = 633$  нм для лазера.

— пространственное разрешение для расстояния 2,5 м на оптическом столе составило в наилучших точках 0,001–0,010 от величин  $X, Y$  в центре сектора обзора и 0,05–0,08 от величин  $X, Y$  в наихудших точках на краях сектора обзора (подробные экспериментальные данные по ограничениям сектора обзора представлены в [17, 18]).

Таблица 3

Статистический показатель	90°	45°
Среднее значение	90,278	45,316
Ошибка (осреднённая абсолютная погрешность)	0,142	0,035
Медиана	90,201	45,284
Среднеквадратическое отклонение	1,419	0,354
Дисперсия	2,014	0,125
Коэффициент асимметрии	0,302	0,080
Диапазон изменения	7,168	1,984
Минимальное значение	86,495	44,296
Максимальное значение	93,663	46,280
Количество измерений	100	100

С использованием активной мишени — лампы накаливания постоянного тока 12 В мощностью 50 Вт — проведены эксперименты по проверке точности измерения (только пассивной части оптического сканера) как функции угла падения. Экспериментальные данные, основанные на статистической обработке 200 повторных измерений фиксированных углов со значениями 45 и 90°, приведены в табл. 3.

Амплитуда оптического сигнала чувствительна как к скорости вращения, так и к пределу досягаемости, причём это соотношение является сильно нелинейным [27]. В приложении Poop программы MathLab для каждого интервала 2,5 м на протяжении предполагаемого предела досягаемости от 0 до 100 м была создана вычислительная модель затухания пространственной интенсивности излучённого света от 0 до 95 %. Регистрируемое световое излучение, преобразованное фотоприёмником (Silicon Detector 15.0MM2, оптический каталог Edmund) в электрический сигнал, может значительно различаться даже на малых расстояниях. По этой причине целесообразно было провести дополнительные экспериментальные исследования данных ограничений для других заявленных возможных практических применений. В задаче навигации от 5 до 10 м работа предложенной конфигурации была удовлетворительной [27, 28].

Для определения динамических ограничений системы пассивного оптического сканирования был проанализирован её выходной сигнал. В [28] показаны изменения амплитуды выходного сигнала данной системы в зависимости от изменения скорости мотора постоянного тока. При увеличении скорости амплитуда сигнала уменьшается из-за ёмкостного сопротивления фотодиода. Согласно рис. 11 из [28] изменения скорости сканирования с 2–3 до 25 оборот./с вызывают изменения как амплитуды импульсов (с 400 мВ до 1,1 В), так и их ширины (с 2,02 до 3,66 мс). Подобные изменения можно легко исправлять, используя методы обработки сигналов. Из вышеизложенного видно, что такие параметры скорости уже приемлемы для нормального выполнения задачи навигации.

Возможно также дополнительное увеличение пространственного разрешения описанной системы с использованием оригинального метода совпадения начала шкал, предложенного в [31]. Такой метод и устройство могут быть применены для динамической (навигация) и статической (мониторинг) задач [30]. Наконец, пространственное разрешение предлагаемой системы может быть существенно увеличено с применением специальной обработки сигнала («поиском энергетического центра сигнала»), представленной в [18].

**Заключение.** Таким образом, в данной работе показан эффективный инструмент для дальнедействующей, высокопроизводительной системы поверхностного позиционирования, использующей новую сканирующую систему СТЗ:

1. Предложенная СТЗ полностью решает двойную задачу навигации МР: она позволяет изучать пространство перед роботом и находить направление на исходное положение его траектории. СТЗ также позволяет двигаться в лабиринте по направлению к маяку, установленному в любом месте вблизи поверхности, по которой движется МР. СА даёт возможность наблюдать точки, расположенные выше или ниже линии горизонта в диапазоне  $\approx 45^\circ$  без наведения измерительного прибора на станцию наблюдения.

2. СТЗ не требует новых элементов и устройств и может быть построена на базе узлов, производимых в настоящее время. Для идентификации образцов, находящихся перед МР, не требуется применения сверхбыстрых нейронных компьютеров.

3. СТЗ реализует идею компьютерного зрения в виде модели аналого-цифрового преобразования пространства перед роботом. С помощью компьютера эта модель легко может быть превращена в изображение, удобное для восприятия оператором.

4. СТЗ не является враждебной к телевизионным методам информационного восприятия окружающей среды. Напротив, СТЗ и ТВ могут взаимно дополнять друг друга в тех случаях, когда помимо бортового компьютера для восприятия необходимо участие оператора.

5. СТЗ является не только элементом МР для исследования других планет, но может с успехом использоваться на раскопках, землеустроительных и транспортировочных работах, в производственных цехах, в сельском хозяйстве и в других применениях, о которых сейчас можно только догадываться.

Некоторые результаты описанного в данной работе исследования приведены в [32, 33]. Работа посвящается памяти д-ра В. Е. Тырсы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rillings J. H.** Automated highways // *Sci. Amer. Mag.* 1997. **277**, N 4. P. 80–85.
2. **Selected papers on CCD and CMOS imagers** // SPIE Milestone Series /Ed. M. G. Kang. Washington, USA: SPIE Press, 2003. Vol. MS177. 636 p.
3. **Tsugawa S.** Vision-based vehicles in Japan: Machine vision systems and driving control systems // *IEEE Trans. Industr. Electron.* 1994. **41**, N 4. P. 398–405.
4. **Chaumette F., Hutchinson S.** Visual servo control, Part I: Basic approaches // *IEEE Robot. Autom. Mag.* 2006. **13**, N 4. P. 82–90.
5. **Itti L., Baldi P.** A principled approach to detecting surprising events in video // *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. 2005. Vol. 1. P. 631–637.
6. **Rivas Lopez M., Sergiyenko O., Tyrsa V.** Machine vision: approaches and limitations // *Computer Vision* /Ed. Z. Xiong. Vienna, Austria: InTech, 2008. Chapt. 22. P. 395–428.
7. **Sayed A. H., Tarighat A., Khajehnouri N.** Network-based wireless location: challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information // *IEEE Signal Process. Mag.* 2005. **22**, N 4. P. 24–40.
8. **Hada Y., Takase K.** Multiple mobile robot navigation using the indoor global positioning system (iGPS) // *Proc. of the IEEE/RSJ Intern. Conf. on Intelligent Robots and Systems*. Maui, USA, 2001. Vol. 2. P. 1005–1010.
9. **Petrov M., Talapov A., Robertson T. et al.** Optical 3D digitizers: Bringing life to the virtual world // *IEEE Comput. Graph. and Appl.* 1998. **18**, N 3. P. 28–37.

10. **Kee C., Park B., Kim J. et al.** A guideline to establish DGPS reference station requirements // *Journ. of Navigation*. 2008. **61**, N 1. P. 99–114.
11. **Retscher G.** Test and integration of location sensors for a multi-sensor personal navigator // *Journ. of Navigation*. 2007. **60**, N 1. P. 107–117.
12. **Yu H., Aguado E., Brodin G. et al.** UWB positioning system design: Selection of modulation and multiple access schemes // *Journ. of Navigation*. 2008. **61**, N 1. P. 45–62.
13. **Mordohai P., Medioni G.** Tensor voting: A perceptual organization approach to computer vision and machine learning. USA: Morgan & Claypool Publishers, 2006. 136 p.
14. **Инженерный справочник по космической технике** /Под ред. А. В. Солодова. М.: Воениздат, 1977. 430 с.
15. **Newsweek**. 1998. **CXXII**, August 17. P. 5.
16. **Webster's new world dictionary of American English**. Third College Edition /Eds. V. Neufeldt, D. B. Guralnic. N. Y.: Webster's New World, 1988. 1574 p.
17. **Rivas M., Sergiyenko O., Aguirre M. et al.** Spatial data acquisition by laser scanning for robot or SHM task // *Proc. of the IEEE-IES Intern. Symp. on Industrial Electronics (ISIE-2008)*. 30 June–2 July, 2008. Cambridge: United Kingdom. P. 1458–1463.
18. **Rivas Lopez M., Sergiyenko O., Tyrsa V. et al.** Optoelectronic method for structural health monitoring // *Journ. Structural Health Monitoring*. 2010. **9**, N 2. P. 105–120.
19. **Montgomery D. C., Runger G. C.** Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería. México: McGraw-Hill, 1996. 910 p.
20. **Апенко М. И., Дубовик А. С.** Прикладная оптика. М.: Наука, 1971. 392 с.
21. **Wyatt C. L.** Electro-optical system design: for information processing. New York—London—Mexico: McGraw-Hill, 1991. 343 p.
22. **Handbook of optical and laser scanning** /Ed. G. F. Marshall. N. Y.: Marcel Dekker, 2004. 769 p.
23. **Forman P., Parry I.** Rapid data collection at major incident scenes using three dimensional laser scanning techniques // *IEEE 35th International Carnahan Conference on Security Technology*. October, 2001. London, UK. P. 60–67.
24. **Pierce D. S., Ng T. S., Morrison B. R.** A novel laser triangulation technique for high precision distance measurement // *Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. October, 1992. Houston, USA. Vol. 2. P. 1762–1769.
25. **Surmann H., Lingemann K., Nuchter A., Hertzberg J.** An autonomous mobile robot with a 3D laser range finder for 3D exploration and digitalization of indoor environments // *Robotics and Autonomous Systems*. 2003. **45**, N 3–4. P. 181–198.
26. **França J., Gazziro M. A., Ide A. N., Saito J. H.** A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view // *IEEE Proc. of the Intern. Conf. on Image Processing (ICIP 2005)*. 11–14 September, 2005. Genoa, Italy. Vol. 1. P. 425–428.
27. **Sergiyenko O. Yu., Hernandez W., Tyrsa V. V., Hernández-Balbuena D.** Precise optical scanning for multiuse // *Proc. of the 35th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics (IECON'09)*. 3–5 November, 2009. Porto, Portugal. P. 3393–3404.
28. **Sergiyenko O. Y., Tyrsa V. V., Devia L. F. et al.** Dynamic laser scanning method for mobile robot navigation // *Proc. of the ICCAS-SICE 2009, ICROS-SICE International Joint Conference*. 18–21 August, 2009. Fukuoka, Japan. P. 4884–4889.

- 
29. **Tyrsa V. Ye., Sergiyenko O. Yu., Tyrsa V. V. et al.** Mobile robot navigation by laser scanning means // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Cybernetics and Information Technologies, Systems and Applications (CITSA'2006). 20–23 July, 2006. Orlando, Florida, USA. Vol. 1. P. 340–345.
  30. **Sergiyenko O., Hernandez W., Tyrsa V. et al.** Remote sensor for spatial measurements by using optical scanning // Sensors. 2009. **9**, N 7. P. 5477–5492.
  31. **Hernández-Balbuena D., Sergiyenko O., Tyrsa V. et al.** Signal frequency measurement by rational approximations // Measurement. 2009. **42**, N 1. P. 136–144.
  32. **Tyrsa V., Sergiyenko O., Burtseva L. et al.** Mobile transport object control by technical vision means // Proc. of the Intern. Conf. CERMA'2006. 26–29 September, 2006. Cuernavaca, Mexico. Vol. 2. P. 74–82.
  33. **Sergiyenko O., Tyrsa V., Hernandez-Balbuena D. et al.** Precise optical scanning for practical multi-applications // Proc. of the 34th Annual Conf. of IEEE Industrial Electronics (IECON'08). 10–13 November, 2008. Florida, USA P. 1656–1661.

*Поступила в редакцию 27 января 2010 г.*

---