

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

С.В. Петухов



**ПЕТУХОВ
Сергей
Васильевич**

Кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования заводов стройматериалов, изделий и конструкций Московского института коммунального хозяйства и строительства. Специалист в области робототехники, систем технического зрения и навигации роботов. Основная научная деятельность связана с роботизацией производства строительных материалов и изделий. Автор более 50 работ, в том числе 2 изобретений и 10 докладов на международных конференциях по проблемам робототехники.

Введение

Настоящая статья является продолжением работ [1–3], в которых развиваются новые методы навигации по запомненным ориентирам, получаемым в результате оперативной обработки информации в масштабе реального времени непосредственно в процессе движения робота. Предполагается, что во время остановок робота используется стереотелевизионная система технического зрения (стерео-СТЗ) для определения ориентиров, которые запоминаются в бортовом

компьютере вместе с параметрами пройденной траектории и направлением стереосъемки. Это существенно повышает надежность навигации, так как заранее определенные ориентиры могут изменить свое положение или вовсе исчезнуть во время эксплуатации робота.

Навигация на траектории возвращения робота выполняется на основе сравнения запомненных и вновь полученных представлений ориентиров. Возвращение по запомненным ориентирам в настоящее время становится востребованным в ряде прикладных проблем, решаемых с применением транспортных роботов. Преимуществами стерео-СТЗ в качестве основного источника данных о пройденных ориентирах являются большая информативность, а также автономность и помехозащищенность по сравнению с другими источниками информации.

Проблема сохранения робота путем автоматического попятного движения возникла в частности в связи с работами по разборке завалов и (или) расчистке территории от радиоактивного мусора. В военной практике часто требование возвращения робота пройденной дорогой является просто необходимым, например, при уборке противопехотных мин, расчистке проходов в минном поле, гуманитарном разминировании, возвращении боевых роботов и роботов-разведчиков после выполнения задания или при потере с ними связи. В настоящее время задача автономного возвращения робота актуальна в связи с космическими исследованиями. Так, например, первый исследовательский мобильный робот-марсоход «Sojourner» (США) в 1997 г. по ошиб-

ке оператора-водителя наехал на камень. Чтобы вывести его из критической ситуации и сохранить для продолжения исследований, марсоход осторожно двигали задним ходом по командам с Земли с запаздыванием в 14 мин. Система автоматического возвращения позволяет освободить оператора от рутинной и утомительной операции следования точно пройденным маршрутом и расширяет функциональные возможности телеуправляемых роботов.

Стереο-СТЗ относятся к дальномерным системам, которые применяются для измерения координат объектов-препятствий, ориентиров и т. д. [4, 5]. Значительный интерес к роботам, активно взаимодействующим с реальным миром, вызван хорошо разработанным дальномерным СТЗ и методом организации модели внешней среды в виде определенной структуры описаний, которая позволяет осуществлять адекватное взаимодействие робота с окружающей средой [4, 5]. Примеры использования стереο-СТЗ для навигации и обеспечения беспрепятственного движения транспортных роботов представлены в работах [5, 6].

Автор статьи в качестве руководителя и непосредственного разработчика участвовал в создании новых принципов построения систем технического зрения для робототехнических устройств стереосистем, обеспечивающих автоматическое возвращение телеуправляемых роботов по естественным запомненным ориентирам

с использованием технологий искусственного интеллекта [9, 10]. В бортовых программах формирования и согласования точечных планов ориентиров использовались разработанные в [1–4] методы и алгоритмы.

Комплексная разработка всех стереο-СТЗ, в том числе человеко-машинной стереο-СТЗ, проведена коллективом специалистов ГосИФТП с участием д.т.н. И.В. Шаманова, к.т.н. В.М. Иванюгина, к.т.н. А.П. Парфенова, ведущего инженера А.С. Илюхина, с.н.с. В.Ф. Васильева.

1. Эксперименты с использованием стереопарных СТЗ

Проведены испытания стереопарных стереο-СТЗ для навигации как при автоматическом выборе и измерении ориентиров, так и при участии человека-оператора в их выборе. Стереο-СТЗ с вертикальным или наклонным стереобазисом в вертикальной плоскости позволяют обнаружить препятствия на дорогах или построить модель внешней среды в виде цифровой карты высот (ЦКВ), фрагменты которой используются в качестве ориентиров на пересеченной местности.

При навигации робота по ЦКВ с увеличением скорости его движения возникает необходимость увеличения дальности действия стереο-СТЗ с сохранением точности измерений при построении ЦКВ, для чего необходимо увеличить стереобазу. На рис. 1 приведена фотография роботизированного транспортного средства с установлен-



Рис. 1. Роботизированное транспортное средство, оснащенное стереο-СТЗ с вертикальным стереобазисом

ным на нем стереоблоком с наклонным базисом равным 1,2 м, разработанного в ГосИФТП.

В состав стерео-СТЗ кроме двух телевизионных камер входят персональный компьютер в качестве бортовой ЭВМ, плата ввода стереоизображений, программное обеспечение. Точки рельефа измеряются в автоматическом режиме и по ним строится ЦКВ для определения препятствий перед роботом.

Навигация по ЦКВ является достаточно трудоемкой процедурой и требует дополнительных затрат времени из-за большой размерности карт. Для исследования навигации робота по ЦКВ фрагментов рельефа произведена наклонная съемка в лабораторных условиях макета сложной поверхности из трех близких положений точек R , L , D при относительном угле съемки ψ (рис. 2), в результате получены три ЦКВ. Съемка производилась с использованием стерео-СТЗ с наклонным в вертикальной плоскости стереобазисом, равным 45 см и высотой съемки – 75 см.

Проведенные исследования по согласованию полученных высотных карт показали, что задача согласования существенно усложняется из-за наличия эффектов загороживания, а ее решение становится менее надежным. Время на согласование фрагментов ЦКВ даже при использовании ускоренного алгоритма поиска экстремума функционала составляет десятки секунд. Относительная ошибка определения местоположения по результатам согласования равна 5% от расстояния до снимаемого фрагмента местности.

Двухмерная модель внешней среды (МВС) получается в результате ограничения высоты по

порогу $h_{\text{пор}}$, соответствующий срез матрицы высот представляет собой контурную карту. Объем памяти в бортовом компьютере, необходимый для хранения контурной карты, меньше, чем у трехмерной ЦКВ, а время на согласование практически не изменяется. Относительная ошибка определения местоположения по результатам согласования равна (4–5)%. Информативность МВС возрастает при использовании тринокулярной стерео-СТЗ [10], что увеличивает наполняемость ЦКВ в среднем на 25%.

Полученный срез может не соответствовать истинной трехмерной поверхности из-за наличия ненаблюдаемых областей (эффект загороживания при косоугольной съемке). Поэтому целесообразно использовать только участки контурной карты, представленной лобными частями ЦКВ.

В экспериментах использовались стереоизображения от подвижной экспериментальной установки с перемещаемой телевизионной камерой по горизонтальному базису. Формирование точечных планов ориентиров произведено по координатам измеренных точек, которые получались с помощью специально разработанного для этих испытаний последовательного алгоритма согласования стереопар. Эксперименты преследовали две цели: проверку принципиальной возможности получения точечных планов ориентиров и их взаимного согласования с использованием разработанных алгоритмов и программ и моделирование управляемого возвращения робота по запомненным точечным планам ориентиров.

Предполагаемая рабочая среда робота (производственное помещение, машинный зал и т.п.)

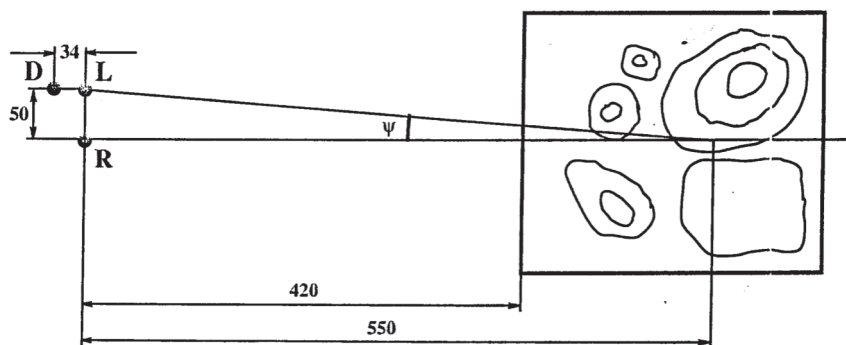


Рис. 2. Схема съемки макета пересеченной местности (размеры указаны в см)

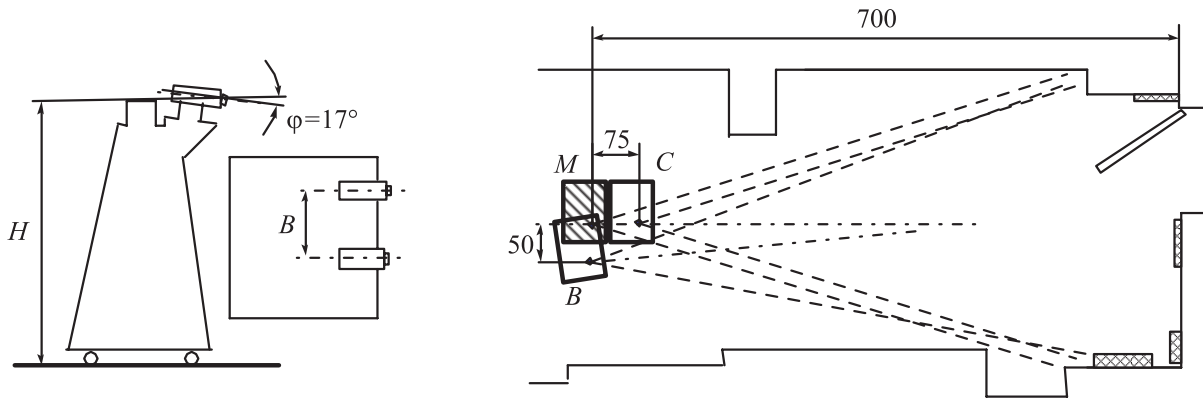


Рис. 3. Параметры подвижной установки стерео-СТЗ и схема съемки в помещении (размеры указаны в см.)

была воспроизведена в помещении ГосИФТП. Схема помещения и параметры подвижной установки для проведения съемок при высоте $H = 183$ см представлены на рис. 3. Границы ориентиров преимущественно вертикальные и поэтому для их измерений использовалась стереосистема с горизонтальным стереобазисом $B = 56$ см. Применялся метод потенциальных функций для формирования точечных планов ориентиров. По результатам анализа стереопарных изображений в точках вычислены координаты измеренных пространственных точек в проекции на плоскость пола, получены точечные планы ориентиров и проверены алгоритмы их согласования для оценки смещения робота относительно опорной траектории. Ошибка в определении местоположения не превышает 10 см.

Человеко-машинная стерео-СТЗ применялась в экспериментах для управления колесно-шагающим роботом "Разведчик" (рис. 4, а) – технологическим вариантом робота "Система", который был разработан в МНТК "Прогресс" [11]. На рис. 4, а показан стереоблок, который был установлен на устройстве наведения. Использовались данные, полученные в результате измерений с целью определения местоположения ориентиров и препятствий, указанных оператором-водителем на экране монитора (рис. 4, б).

Для получения координат измеренных точек в опорной системе координат $O_0X_0Y_0Z_0$, связанной с полом, потребовался их пересчет из камерной системы $O_KX_KY_KZ_K$:

$$\begin{vmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ H_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X_K \\ Y_K \\ Z_K \end{vmatrix},$$

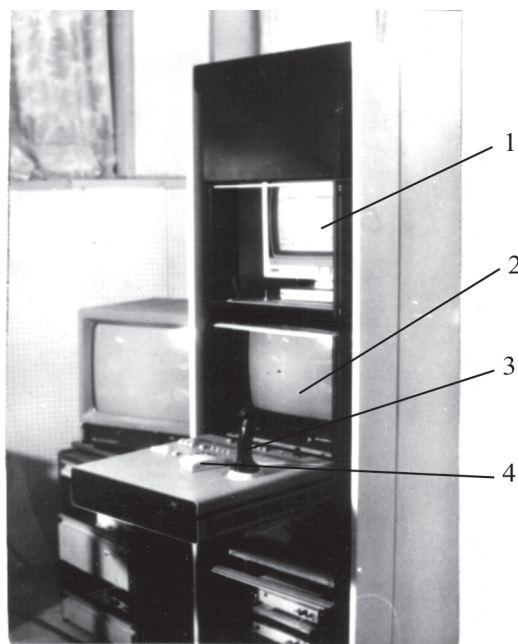
где φ – угол тангажа ("+" при наклоне вниз); H_0 – высота съемки с учетом поворота устройства наведения в вертикальной плоскости.

В режиме "подсказчика" номера и координаты измеряемых точек X, Y, Z отображаются на экране видеомонитора с наложением их на изображение наблюдаемого объекта (ориентира). Поиск ориентиров оператором осуществляется путем поворота стереоблока по тангажу и курсу с помощью рукоятки джойстика на пульте управления (рис. 4, б). На измерение одной точки требуется не более 0,001 с на персональном компьютере типа «Pentium». В ходе проведения натурных экспериментов по управлению роботом "Разведчик" проверялась эффективность использования разработанного комплекса человеко-машинной стерео-СТЗ при естественном и искусственном освещении как при перемещении робота, так и при его остановке в режиме поиска ориентиров с поворотом стереоблока.

Результаты испытаний человеко-машинной стерео-СТЗ с поворотным стереоблоком на роботе "Разведчик" показали эффективность использования человеко-машинной измерительной стерео-СТЗ на борту робота с целью повышения безопасности его перемещения. В задаче автоматического возвращения робота по запомненным ориентирам использование человеко-ма-



а



б

Рис. 4. Телеуправляемый колесно-шагающий робот с устройством наведения стереоблока (а) и рабочее место оператора-водителя (б): 1 – дисплей, 2 – монитор, 3 – джойстик, 4 – "мышь"

шинной измерительной стерео-СТЗ существенно повышает достоверность точечных планов ориентиров и надежность их согласования.

2. Эксперименты в помещении с использованием многостереопарной СТЗ

Эксперименты в производственном помещении по автоматическому возвращению робота выполнены с использованием макета робота с установленной на нем опытной многостереопарной стерео-СТЗ на основе четырех камер. Проведено исследование попятного движения робота по многозвенной полигональной траектории и его автоматического возвращения при использовании макета робота с установленной на нем опытной многостереопарной стерео-СТЗ (рис. 5).

В качестве бортовой ЭВМ на макете робота был установлен персональный компьютер. В бортовых программах формирования и согласования точечных планов ориентиров использовались методы и алгоритмы, описанные в работах [1, 15, 16].

Испытания навигационной системы проводились при различных вариантах расположения ориентиров и разных условиях освещенности. Основными задачами испытаний стерео-СТЗ для

автоматического возвращения робота по запомненным ориентирам являлись:

1) получение точечных планов в условиях, приближенных к функционированию СТЗ в промышленном помещении при ограниченной его освещенности;

2) согласование точечных планов ориентиров и определение управляющих параметров в каждой опорной точке траектории автоматического возвращения;



Рис. 5. Фотография макета мобильного робота с установленной на нем многостереопарной стерео-СТЗ

3) оценка отклонений от опорной траектории и возможных отклонений робота от точки старта при его автоматическом возвращении с использованием разработанного программного обеспечения.

Для решения перечисленных задач был разработан пакет прикладных программ S4, SETON и SETBACK для выполнения следующих функций:

S4 – обработка четырехстрочных параллаксаграмм и получение координат измеренных точек; вход – 4 стереоизображения, выход – трехмерные координаты измеренных точек;

SETON – построение точечных планов ориентиров на этапе движения по опорной траектории; вход – трехмерные координаты измеренных точек, выход – точечные планы P_k и машинная относительная карта (МОК);

SETBACK – построение точечных планов ориентиров на этапе движения по траектории возвращения, согласование планов, вычисление параметров управления; вход – трехмерные координаты измеренных точек, МОК, выход – параметры управления.

Программа S4 занимает объем памяти 150 кбт и время работы 0,20–0,25 с на 20 параллаксаграмм, программа SETON – 220 кбт и 0,03–0,04 с, а для программы SETBACK эти параметры – 250 кбт и 0,06–0,07 с соответственно.

Испытания проводились в помещении гаража. Пол площадью 18x18 м² имел асфальто-бетонное покрытие. Вдоль стен и внутри помещения имелись колонны с выступающими углами и ряд дополнительных объектов. Освещение внутри бокса смешанное: естественное (через окна и открытые ворота) и искусственное – свэрху.

Программа испытаний стерео-СТЗ на макете робота предусматривала моделирование телеуправляемого движения по опорной траектории и близкой к ней траектории автоматического возвращения робота. Полигональная траектория составлена из прямолинейных звеньев длиной 5–10 м с углами поворота между звеньями 30 °–120 °. Все операции по получению видеоданных, их обработке, вычислению уклонений и параметров управления проводились автоматиче-

чески. Перемещение платформы с стерео-СТЗ, счисление фактического пройденного пути и углов поворота производились в соответствии с вычисленными параметрами управления, необходимыми для возвращения к следующей опорной точке, которые считывались с экрана дисплея бортовой ЭВМ. Вариант траектории движения робота в помещении, реализованная траектория возвращения в начальную точку и точечные планы P и P' , полученные из близких точек S_4 и S'_4 , приведены в работе [3].

Анализ результатов автоматического измерения координат точек по стереоизображениям показал соответствие точности измерения теоретически ожидаемой. Точность измерения дальности составила 0,5–0,9 м на расстоянии 20–25 м и 0,3–0,5 м на расстоянии 10–15 м. По двум другим координатам точность измерения была в 3–5 раз выше. Полученные координаты точек использовались для автоматического построения точечных планов. Точность определения местоположения робота по результатам автоматического согласования планов составила 0,5–1,5 м, что позволяет после выработки параметров управления выводить робот к следующей точке съемки с расчетным отклонением от номинальной траектории по дальности не больше 2 м при длине звеньев 15 м. При расстояниях до объектов $Y = 15–25$ м ошибки измерения дальности составляют не более 7–10 %. Ошибки измерения по двум другим координатам в несколько раз меньше ошибок измерения дальности. Невысокая точность оценки местоположения робота объясняется плохим качеством и неидентичностью использованных камер по уровню и контрасту сигналов. При использовании современных измерительных камер с увеличенным разрешением до 1024 элементов на строке можно ожидать, что количество ошибок уменьшится вдвое.

Эксперименты с роботизированным бульдозером на площадке вблизи производственных помещений проводились с целью проверки систем технического зрения и системы управления (СТЗиУ) для решения задачи автоматического возвращения по запомненным ориентирам. Роботизированный радиоуправляемый бульдозер

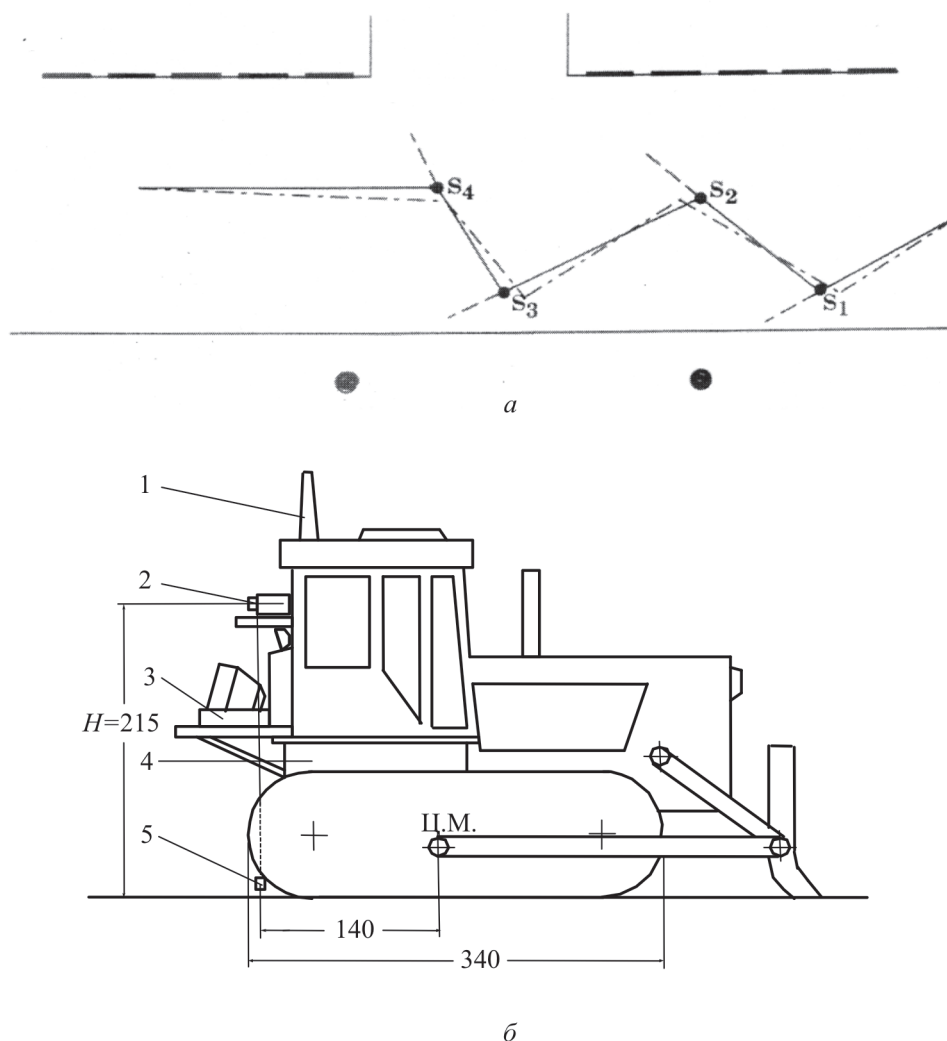


Рис. 6. Схема траектории движения робота (а) и роботизированный телеуправляемый трактор (б):

— опорная траектория; --- — направление съемки;
 - - - - траектория автоматического возвращения;

1 — антенна; 2 — стереоблок из четырех камер; 3 — бортовой компьютер (ПЭВМ);
 4 — отсек системы управления; 5 — отвес центра проекций камеры;
 Ц.М. — центр масс (точка поворота) трактора

Т-10.32.8 перемещался по заданной траектории по команде водителя. Съемки производились на площадке, выложенной бетонными плитами, в окружении построек и одиночных ориентиров (рис. 6).

Схема размещения объектов вблизи траектории движения робота показана на рис. 6, а. В состав СТЗиУ входит бортовая ЭВМ, стереоблок из четырех телевизионных камер (см. рис. 5), из которых две крайние использовались для получения стереопары, обзорная телекамера и две камеры для измерения скорости, пройденного пути и углов поворота по курсу. Многозвенная полигональная траектория имеет среднюю длину зве-

ньев 20 м. Получены изображения от многостереопарной стерео-СТЗ в точках остановки бульдозера $S_1 - S_4$ (рис. 6, а) как при движении вперед, так и при попятном движении. По точечным планам ориентиров построено и проведено имитационное моделирование траектории автоматического возвращения робота в начальную точку.

Полученные результаты моделирования позволили определить рациональные принципы построения и архитектуру многофункциональной СТЗиУ для ее реализации на роботизированном радиоуправляемом бульдозере Т-10.32.8, который оснащен системой управления нижнего уровня (по радиоканалу).

Помимо перечисленных подсистем, СТЗиУ должна включать гироскопический датчик курсового угла и датчик числа оборотов ведущего вала для измерения пройденного пути. Альтернативный вариант предусматривает замену указанных датчиков специализированными СТЗ. В процессе проведения натурных съемок были получены экспериментальные оценки работоспособности используемых телекамер "Йорис", изготовленных на отечественных серийных ПЗС-матрицах. Камеры снабжены быстродействующей диафрагмой, что обеспечивает их работу в широком диапазоне освещенности. Для оценки возможности осуществления навигации по одиночным ориентирам анализировалась сцена, полученная из точек S_3 и S_3' на траектории движения робота.

Заключение

Эксперименты в лабораторном помещении с хорошим освещением при использовании стереопарной стерео-СТЗ для получения видеоданных показали достаточную надежность алгоритмов формирования точечных планов, которые получают практически идеальными. Максимальная ошибка определения местоположения не превышает 10% от длины пройденного участка траектории и 50% от действительного отклонения относительно навигационной точки.

Эксперименты с роботом "Разведчик" показали эффективность включения в контур управления человеко-машинной измерительной стерео-СТЗ с поворотным стереоблоком. При этом возрастает безопасность перемещения робота. С помощью человеко-машинной стерео-СТЗ существенно повышается достоверность точечных планов ориентиров и надежность их согласования за счет уменьшения на них помех. Комплексные испытания системы автоматического возвращения с прототипом бортовой многостереопарной стерео-СТЗ в производственном помещении при слабом освещении подтвердили важность использования искусственной подсветки и необходимость установки стерео-СТЗ на поворотный стереоблок.

Проведенные испытания стерео-СТЗ в производственном помещении и на роботизированном радиоуправляемом бульдозере вблизи про-

изводственных помещений при естественном дневном освещении подтвердили принципиальную осуществимость автоматического возвращения телеуправляемого транспортного робота к месту старта по запомненным ориентирам. В целом исследования показали возможность создания на базе стерео-СТЗ комплексной системы технического зрения и управления.

Список литературы

1. Петухов С.В. Адаптивные стереотелевизионные системы технического зрения // Машиностроение и инженерное образование. 2008. № 3. С. 30–41.
2. Петухов С.В. Представление ориентиров на основе проекционного преобразования // Тр. ИСА РАН: Динамика неоднородных систем. 2007. Т. 31(2). С. 173–184.
3. Петухов С.В. Методы автономной навигации при попятном движении робота по запомненным ориентирам // Мехатроника. 2008. № 8. С. 30–34.
4. Петухов С.В., Иванюгин В.М., Илюхин А.С. Развитие бинокулярных и тринокулярных стереосистем технического зрения // Сб. науч. тр. "Искусственный интеллект в технических системах". – М.: ГосИФТП, 2004. С. 3–35.
5. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Кугушев Е.И. Использование локальных ориентиров для определения положения мобильного робота // Сб. науч. тр. «Проблемы машинного зрения в робототехнике» / Под ред. Д.Е. Охотимского. – М.: ИПМ РАН. 1981. С. 36–47.
6. Кирильченко А.А. Интерпретация локальных относительных описаний среды подвижным роботом. – М.: ИПМ РАН. 1983. – 28 с. (препринт).
7. DeSouza G.N., Kak A.S. Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey// IEEE Trans. on PAMI. 2002. Vol. 24. N 2. P. 237–267.
8. Петухов С.В., Иванюгин В.М., Васильев В.Ф., Шаманов И.В. Автоматическое восстановления рельефа по результатам обработки стереотелевизионных изображений // Сб. науч. тр. "Управление движением и тех-

- ническое зрение автономных транспортных роботов". – М.: ИФТП, 1989. С. 121–139.
9. Петухов С.В. (ответственный исполнитель) и др. Разработка методов анализа изображений в СТЗ и математической модели управления роботом // Отчет о НИР (промежуточный) "Разработка новых принципов построения систем технического зрения для робототехнических устройств" (шифр "Альфа"). Ч. 1: "Исследование и разработка стереосистемы, обеспечивающей возвращение робота", этап 2, № 6.63.90. – М.: ИФТП, 1990. – 103 с.
10. Петухов С.В. (ответственный исполнитель) и др. Создание системы машинного зрения на базе стереоблока, установленного на борту робототехнической системы, разработка программного обеспечения для обработки видеоинформации от подвижной телекамеры // Отчет о НИР "Создание средств машинного зрения для телеуправляемого подвижного робота" (шифр "Подсказчик"), этапы 4, 5, 6, № 32.63.93. – М.: ИФТП, 1993. – 56 с.
11. Вечканов В.В. и др. Многофункциональная мобильная робототехническая система для АЭС // Материалы науч.-техн. конф. 21–22 мая 1992, – Спб. С. 39–43.