РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ И ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А. Н. Аверкин, М. В. Лишили, В. А. Дорохин, Л. Н. Теряев

*Кафедра системного анализа и управления, m.lishilin@gmail.com;
ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна», г. Дубна, Московская обл., Россия*

Ключевые слова: беспилотное управление; виртуальная и дополненная реальность; система управления; управление сельскохозяйственной техникой.

Аннотация: Разработаны модели и алгоритмы для создания программно-аппаратного комплекса автоматического беспилотного управления сельскохозяйственной техникой. Дано описание трехмерной модели испытательной территории в формате виртуальной реальности, набора базовых алгоритмов управления движением, имитационной модели программно-аппаратного комплекса.

Введение

Значение сельскохозяйственной отрасли для благополучного существования и развития государства трудно преувеличить. Обеспечение продовольственной безопасности, здоровья и продолжительности жизни во многом зависит от уровня развития сельского хозяйства, который в свою очередь существенно определяется применением новых технологий. Именно на появление и активное применение новых технологий в агропромышленном комплексе ориентирована Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017 – 2025 годы [1]. Внедрение в сельскохозяйственную отрасль современных технологий может способствовать решению таких проблем отрасли, как сокращение числа работающих, отток молодежи, падение престижа профессии [2].

Технологии виртуальной и дополненной реальности (VR/AR), активно развивающиеся и успешно применяемые в медицине, образовании, игровой индустрии и других отраслях [3] еще не нашли своей прочной ниши в сельском хозяйстве [4], за исключением подготовки кадров [5]. Однако их применение, особенно в сочетании с такими востребованными в сельском хозяйстве технологиями, как искусственный интеллект [6], робототехника [7] и компьютерное зрение [8] могут быть крайне интересны для отрасли. Именно сочетание перечисленных технологий легло в основу выполненного в ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна» проекта автоматизации сельскохозяйственных работ с помощью беспилотного трактора и отображения информации о полях и самом процессе работы с помощью технологий виртуальной и дополненной реальности.

В настоящее время в мире спрос на роботизацию во всех отраслях колоссальный. Но только при условии, что машина обладает квалификацией профессионального работника. Это означает, что она анализирует условия среды и кор-

ректирует свое поведение на поле сообразно ситуации [9]. В данном проекте автоматизированная работа машины и удаленного оператора с отображением информации с элементами VR/AR позволяет в постоянном и оперативном режиме возделывать сельскохозяйственные угодья исходя из поставленных приоритетов, например, минимизировать эрозию почвы при вспашке или обеспечить лучшие условия для полива. Это позволит увеличить производительность, качество и продолжительность работ, уменьшить риски форс-мажорных ситуаций, связанных с человеческим и другими факторами, а также более интенсивно вводить в оборот неиспользуемые или слабо используемые земли.

В автоматическом режиме техника движется по заранее рассчитанному с помощью интеллектуального алгоритма маршруту, ориентируясь на показания высокоточного GPS/GLONASS-приемника, компаса, акселерометра и других датчиков. В режиме удаленного управления оператор с использованием технологий VR/AR назначает цели и корректирует выполнение сложных маневров. В том числе он имеет интерфейс для организации параллельной работы нескольких машин, ориентирующихся по одной базовой станции.

В рамках выполнения проекта решены следующие задачи.

1. Создана трехмерная модель испытательного участка в формате виртуальной реальности с привязкой к реальным географическим координатам на основе данных дистанционного зондирования (ДЗЗ), кадастровых данных с построением маршрутов и выявлением препятствий.

2. Разработан набор базовых алгоритмов управления движением.

3. Создана имитационная модель программно-аппаратного комплекса (ПАК) с отображением информации о движении сельскохозяйственной техники и возможностью прямого управления с элементами VR/AR.

4. Разработан пакет моделей, алгоритмов и сопровождающей документации для беспилотного управления сельскохозяйственной техникой с элементами удаленного мониторинга оператора на основе технологий VR/AR.

Разработка трехмерной модели испытательной территории в формате виртуальной реальности

Разработка трехмерной модели испытательной территории, адаптированной под использование в формате виртуальной реальности с географическим позиционированием на основе данных с построением маршрутов и выявлением препятствий, включает в себя следующие этапы выполнения работ:

- разработка трехмерной модели испытательной территории и адаптация полученной модели для использования в виртуальной реальности;
- совмещение трехмерной модели испытательной территории с данными аэросъемки, нанесение геопозиционных меток на полученную модель;
- привязка трехмерной модели испытательной территории к кадастровым данным;
- разработка алгоритма построения маршрутов на трехмерной модели испытательной территории;
- детектирование препятствий и внештатных ситуаций на поле;
- эмуляция работы системы детектирования и алгоритма построения маршрутов на базе полученной трехмерной модели испытательного полигона.

На первом этапе выполнена разработка трехмерной модели испытательной территории с использованием открытого программного обеспечения для создания трехмерной компьютерной графики Blender. Далее модель территории собиралась с использованием межплатформенной среды разработки Unity 3D. Результат выполнения трехмерной модели испытательной территории представлен на рис. 1.

**Рис. 1. Трехмерная модель испытательной территории.
Вид сверху с отображением траектории движения трактора**

Построение модели при помощи дрона реализовано путем привязки к каждой фотографии точных геоданных с использованием данных GPS/GLONASS.

На первом этапе на основе фотографии с привязанными геоданными получено неплотное облако точек, на основе которого генерировалось плотное облако точек и затем формировались 3D-модели (рис. 2). В дальнейшем полученная 3D-модель дорабатывалась путем ретопологии (снижения количества полигонов и оптимизации).

Привязка трехмерной модели испытательной территории к ДДЗ осуществлена с использованием данных спутниковых снимков, размещенных на сервисе Google Maps. Привязка выполнялась с использованием точных координат объектов, полученных в процессе аэросъемки.

С использованием координат GPS/GLONASS и данных публичной кадастровой карты Московской области полученная трехмерная модель привязана к данным публичной кадастровой карты (рис. 3).

Рис. 2. Плотное облако точек

Рис. 3. Привязка модели испытательной территории к кадастровой карте

Построение маршрута на трехмерной модели испытательной траектории выполнялось путем выделения нескольких опорных точек на карте. После нанесения опорных точек автоматически строился маршрут трактора.

Используя 3D-модель или снимок со спутника оператор может вручную выделять на карте препятствия, которые необходимо обойти при движении по полю. В этом случае построение маршрута будет выполнено с учетом нанесенных препятствий.

Набор базовых алгоритмов управления движением

Алгоритмы управления моделью трактора построены на основе нечеткого интеллектуального управления.

Предложена нечеткая семиотическая система управления трактором на базе нечеткого одношагового контроллера, использующая наименьшее число продукционных правил [10]. Для программирования модели разрешено использовать только условия. Использование любых сравнений запрещено.

Трактор имеет следующие сенсоры:

1. Сенсор прямого препятствия D_{front} .
2. Парные сенсоры боковых препятствий D_{L90} , D_{R90} , расположенные под углом 90° от D_{front} .
3. Парные сенсоры боковых препятствий D_{L30} , D_{R30} , расположенные под углом 30° от D_{front} .
4. Парные сенсоры цели D_L , D_R расположенные под углом 30° от D_{front} .
5. Показатель скорости D_{Sp} .
6. Сумматор скорости $D_{Sp.Sum}$.
7. Сумматор циклов измененной модели $D_{Ch.Mod}$.
8. Сумматор сенсоров.

Сенсоры внешнего мира трактора моделируют действия лазерного дальномера лидара, который выпускает несколько лазерных лучей в разных направлениях для оценки расстояний от трактора до препятствий или виртуальных линий разметки (элементов дополненной реальности).

Задача трактора – движение по заданной траектории с обходом препятствий и движение к целевой позиции на поле цели в рамках заданных ограничений. Для простоты далее будем использовать прямоугольный тип препятствия, хотя полученная система управления может работать в лабиринте с произвольным видом препятствий.

Для начала введем понятие точки поля. Назовем точкой поля самый минимальный по размеру элемент метрического пространства, который может находиться в одном из трех состояний: «Пусто», «Препятствие», «Цель». Далее введем понятие кластера – замкнутой области точек, находящихся в одном из трех вышеперечисленных состояний. Определим понятие лабиринта. Под полем будем подразумевать замкнутое метрическое подпространство, в которое входят произвольное количество кластеров типа «Пусто» и «Препятствие» и один кластер типа «Цель». Все предельные точки лабиринта находятся в состоянии «Препятствие».

Трактор (робот) в данной задаче является автономным транспортным средством. На борту находится двигатель, который вращает задние колеса трактора. Двигатель может находиться в одном из трех состояний: «Ускорение», «Торможение» и «Отключен» или в численном выражении $+1$, -1 и 0 . Трактор может поворачиваться вокруг своей оси при помощи руля,двигающего передние колеса робота. Руль также может находиться в одном из трех состояний: «Направо», «Налево», «Нет поворота». В отличие от логического типа состояния двигателя, руль имеет количественные показания – угол поворота.

Трактор на борту имеет сенсоры для считывания информации с внешнего мира или своего состояния. Сенсоры – датчики можно разделить на три вида: датчик, непосредственно считывающий информацию с внешнего мира; показатель, считывающий информацию с внутренней системы трактора; сумматор, возвращающий свое максимальное значение, который при некотором условии обнуляется и начинает возвращать в систему сумму некоторого показателя, до наступления другого условия, когда сумматор будет опять возвращать максимальное значение.

Для управления трактором предложены модели: объезда трактором препятствий, выхода из тупиков, приближения трактора к цели.

Модель объезда трактором препятствий предназначена только для объезда роботом препятствий. Логика работы трактора состоит в том, чтобы он перед препятствием уменьшал скорость и поворачивал от него. На рисунке 4 представлена типичная ситуация, с которой может столкнуться трактор при движении на пространстве с препятствиями.

На рисунке 5, $a - \varphi$, представлены функции принадлежности внешних сенсоров. Кратко правила для данной модели можно охарактеризовать так: нечеткий регулятор имеет дело с одной лингвистической переменной – «расстояние», которая сенсоры D_{L30} , D_{R30} (LefEye и RigEye) имеют уже другие функции. Датчик прямого препятствия D_{front} (MidEye) влияет на выходное значение лингвистической переменной «ускорение»: если робот фиксирует перед собой препятствие, он делает

Рис. 4. Типичная ситуация подхода трактора к препятствию

**Рис. 5. Функции принадлежности переменной «Расстояние»
для D_{front} (а), D_{R90} и D_{L90} (б), D_{R30} и D_{L30} (в)**

торможение, в противном случае – ускоряет свой ход. Ускорение может принимать три значения (три состояния двигателя) «нулевое» (Zero), «ускорение» (Speed Up) и «торможение» (Braking) (рис. 6, а).

Для правильного функционирования модели робот имеет датчик измерения скорости D_{Sp} (Speed) (рис. 6, б). Лингвистическая переменная «Скорость» имеет следующие значения: «нулевая» (Zero), «маленькая» (Small), «средняя» (Middle), «быстрая» (Fast), «сумасшедшая» (Crazyfast).

**Рис. 6. Функции принадлежности переменных
«Ускорение» (а), «Скорость» для D_{Sp} (б), «Поворот» (в)**

Сенсоры бокового зрения меняют выходное значение лингвистической переменной «Поворот» (рис 6, в), который может иметь следующие значения: «нет поворота» (Noturn), «направо» (Rightturn) и «налево» (Leftturn). Для вычисления вектора поворота робота проверяются парные боковые сенсоры, и он пово-

рачивает в ту сторону, где дальность до препятствия больше. Если робот фиксирует препятствия, то сенсоры расстояний дают значение «бесконечно далеко».

Данная модель (назовем ее модель объезда препятствий) позволяет роботу эффективно объезжать препятствия. Однако проведенные эксперименты показали, что в некоторых областях лабиринта робот «застревает». Это значит, что робот перед препятствием имеет нечеткую нулевую скорость и нечеткий нулевой вектор поворота.

Для описания модели выхода робота из тупиков введены некоторые определения:

1. *Областью четкой неопределенности называется область лабиринта, находясь в которой на парные сенсоры робота подается тождественно равный сигнал.*

2. *Областью нечеткой неопределенности называется область лабиринта, находясь в которой парные сенсоры робота возвращают одно и то же значение лингвистической переменной «расстояние».*

3. *Компенсационным эффектом называется ситуация, когда на разнопарные сенсоры и сенсор прямого видения приходит информация о препятствиях, а на остальных двух сенсорах препятствия не фиксируются (Infinity).*

Рассмотрим правила, в списке которых не существуют следующие:

IF D1 IS Value1 AND D2 IS Value1 THEN Rotate IS Value2, где $D1$ и $D2$ – разносторонние боковые сенсоры; $Value1$ – некоторое значение переменной «Расстояние», кроме Infinity; $Value2$ – некоторое значение переменной «Поворот». Данное правило не введено специально, потому что, имея одинаковые данные с сенсоров, невозможно найти вектор поворота.

Вследствие этого определения, робот, попадая в область нечеткой неопределенности, не может определить, куда ему двигаться, потому что в правилах не определено, как двигаться в подобных случаях. На рисунке 7 видно, что на боковые сенсоры D_{R90} и D_{L90} приходит информация, что препятствие не определено (Infinity), а на другие сенсоры D_{R30} и D_{L30} – препятствие далеко (Far). Робот, в соответствии с правилами, приблизится к препятствию, но обойти не сможет, поскольку на сенсоры поступает однородная информация.

Рассмотрим компенсационный эффект. Пусть робот попал в ситуацию, показанную на рис. 8. Как видно, два сенсора и сенсор прямого видения фиксируют препятствие, а два других нет. Нечеткий регулятор (используя соответствующие правила) пытается сместить вектор движения трактора (на рисунке обозначено стрелками) в разные стороны. В результате вектор поворота равен нулю.

Использование опыта в данной модели невозможно, поскольку у робота отсутствуют память и механизмы вывода знаний из данных (datamining). Кроме того, даже если возможность накопления знаний была бы реализована, все равно, если бы трактор впервые попал в область нечеткой неопределенности или в область

Рис. 7. Нечеткая неопределенность

компенсационного эффекта, то он не смог бы выйти, поскольку опыта у него нет. Далее, рассмотрим частный случай стохастического метода – правило типа:

IF D1 IS Value1 AND D2 IS Value1 THEN Rotate IS Value2, где D1 и D2 – парные боковые сенсоры; Value1 – некоторое значение переменной «Расстояние», кроме Infinity; Value2 – некоторое значение переменной «Поворот», например Left Turn или Right Turn. Но метод позволяет трактору выйти только из половины всех возможных тупиков. В данном случае остается

использовать только метод повышения точности сенсора. Однако одношаговый контроллер не может сам повысить точность сенсоров. Для этого введены новая модель, предназначенная исключительно для выхода трактора из тупика и метауровень, переключающий модели в нужный момент.

Для того чтобы определить момент переключения между моделями необходимо выработать критерий попадания робота в тупик. У трактора есть внутренний сумматор – «Сумма скорости», $D_{Sp.Sum}$ (Speed Sum), который действует следующим образом. Он все время возвращает в систему максимальное свое значение, в то время как внутри себя реально суммирует скорость, но, по прошествии определенного количества циклов, возвращает реальное значение суммы скорости робота. Теперь критерий попадания трактора в тупик будет следующим: если значение датчика суммы скорости упало до какого-то предельного значения $Sp.Sum > 0$, то трактор попал в тупик, то есть $D_{Sp.Sum} < Sp.Sum$. В этот момент мета-уровень меняет модель объезда препятствий на модель выхода из тупиков следующим образом: проводим не полное монотонное преобразование с сенсором D_{L30} при коэффициенте неоднородности равном 1. То есть этот сенсор остается неизменным, а остальные сенсоры бокового зрения уменьшают свою «видимость», сжимая функции принадлежности переменной «Расстояние» (увеличивая тем самым чувствительность сенсора), до минимального значения некоторого $\tau_{min} \neq 0$ (рис. 9). Стрелка на рисунке показывает направление поворота робота. Результатом изменения модели является то, что теперь с датчиков снимается неоднородная информация (все сенсоры, кроме одного показывают значение «Бесконечно далеко» (Infinity), а один датчик возвращает истинное значение до препятствия) и робот (в соответствии с правилами) может найти выход из тупика, при этом τ_{min} обязательно должно быть не нулевой величиной. В противном случае робот, выполняя поворот в узких тупиках, будет ударяться о стенку.

Итак, изменение модели сводится к тому, что метауровень изменяет «видимость» (то есть дальность определения сенсора цели) сенсора, при этом в правила вывода предыдущей модели принципиальные изменения не вносятся.

После того как датчик суммы скорости вышел за пределы $Sp.Sum$ (то есть $D_{Sp.Sum} > Sp.Sum$), для метауровня это является сигналом к переключению на исходную модель объезда препятствий.

Рассмотрим случай: пусть трактор попал в тупик. Он изменил модель и начал поворот. Если не существует препятствия, которое находится в той стороне, куда робот поворачивает, то робот обязательно выйдет из данного тупика, поскольку на поворот влияет только один сенсор.

Рис. 8. Компенсационный эффект

Рис. 9. Выезд из тупика

Рис 10. Направление поворота
(показано стрелкой)

Теперь пусть там будет стоять препятствие. Трактор опять застрянет, поскольку один из уменьшенных сенсоров коснется препятствия и возникнет эффект компенсации. На рисунке 10 показан эффект компенсации во время измененной модели выхода из тупика.

Из примера видно, что данная модель дает решение не во всех случаях. Для того чтобы система всегда выходила из тупиков, необходимо активировать в системе еще один датчик – «счетчик циклов измененной модели», $D_{Ch.Mod}$ (CyclesChModel). Он действует следующим образом: пока действует модель объезда препятствий, датчик возвращает в систему свое максимальное значение. Как только начинает действовать модель выхода из тупика, счетчик обнуляется и воз-

вращает значение, которое увеличивается каждый цикл действия нечеткого регулятора. Если достигнут критерий выхода из тупика $D_{Sp.Sum} > Sp.Sum$, то метасистема возвращается к модели объезда препятствий, а датчик опять начинает возвращать свое максимальное значение. В противном случае, если датчик циклов достиг некоторого α , а датчик суммы скорости не переходит значения $Sp.Sum$, то можно сказать, что система опять попала в тупик и необходимо изменить вектор поворота системы. Данный критерий можно записать так: $D_{Ch.Mod} > \alpha \& D_{Sp.Sum} > Sp.Sum$.

Для того чтобы гарантировать выход из тупиков необходимо изменить алгоритм выхода следующим образом:

1. Пронумеруем произвольным образом сенсоры датчики.
2. Обнуляем сумматор сенсоров.
3. Увеличиваем на единицу сумматор сенсоров.
4. Проводим неполное монотонное преобразование с сенсором, номер которого находится в сумматоре сенсоров.
5. Если, за время действия сумматора циклов измененной модели, был достигнут критерий выхода из тупика, то меняем модель на модель объезда препятствий.

6. Если сумматор циклов вышел за пределы лимита, переходим на шаг 3.

Данное изменение гарантирует выход из тупика в статических лабиринтах и с положительной вероятностью – выход из тупика в динамических.

Датчик «счетчик циклов» имеет аналог в реальных моделях, используемых живыми существами. Как правило, системы с такими датчиками используют оппозиционные лингвистические шкалы, где на разных концах стоят пары антонимов. В данном случае «Не очень долго» и «Долго».

В рассматриваемой системе априори задается прогнозируемое время, когда необходимо изменить вектор поворота. Это значение и есть α .

После дополнения в систему модели выхода из тупика и метасистемы робот стал уверенно выходить из всех областей нечеткой неопределенности, тупиков, а эффект компенсации больше не мешал движению робота, что подтвердили многочисленные эксперименты.

Для решения глобальной задачи поиска цели, необходимо задействовать сенсоры, регистрирующие цель – D_L , D_R . Они расположены под углом 30° от датчика прямого препятствия D_{front} и имеют одни и те же функции принадлежности, что и D_{L90} , D_{R90} , однако регистрируют только цель. Если хотя бы один из «золотых» датчиков «почувствовал» цель, то трактор немного поворачивается в сторону, чтобы цель могли регистрировать оба датчика, а не один, что должно гарантировать следующее – робот дойдет до «золота» под нужным уг-

лом (рис. 11). Это достигается дополнением лингвистической переменной «Поворот» значениями «Немного вправо» и «Немного влево» и соответствующими правилами вывода (рис. 12). Как только два «золотых» датчика начинают регистрировать цель, датчик D_{front} автоматически, также попадая на цель, согласно правилам, начинает тормозить робота, обеспечивая плавный подход к цели.

Данная модель хорошо работает в пустых полях, то есть, когда рядом с целью нет никаких препятствий. Эксперименты показали, что стоит только добавить небольшую стенку так, чтобы хотя бы один из датчиков касался ее, то робот отходит от цели, поскольку этот датчик повернет трактор от препятствия, так как любое значение «Немного вправо» или «Немного влево» меньше чем просто «Вправо» или просто «Влево».

Для того чтобы показания боковых счетчиков не влияли на достижения трактором цели, в метасистему вносится некоторый параметр η , который в системе изменяет показания боковых датчиков следующим образом:

$$D_i = \begin{cases} D_i, & \text{если } D_i \leq \eta \\ 0, & \text{если } D_i > \eta \end{cases}, \text{ где } D_i - i\text{-й боковой датчик.}$$

Таким образом, данное изменение позволяет трактору успешно находить цель в лабиринте. При этом метасистема может переключать модели следующим образом (рис. 13). Принципиальная конечная схема действий трактора показана на рис. 14. Стрелками на схеме обозначена возможность перехода от одной системе к другой.

Как уже говорилось, сенсоры внешнего мира трактора моделируют действия лазерного дальномера лидара, который выпускает несколько лазерных лучей в разных направлениях для оценки расстояний от трактора до препятствий или виртуальных линий разметки (элементов дополненной реальности).

Рис. 11. Добавленные значения переменной «Поворот»

Рис. 12. Трактор «коснулся» одним датчиком цели

Рис. 13. Схема переключения модели

Рис. 14. Принципиальная схема работы

Задача трактора – движение по заданной траектории с обходом препятствий и движение к целевой позиции на поле цели в рамках заданных ограничений. Для простоты далее будем использовать прямоугольный тип препятствия, хотя полученная система управления может работать в лабиринте с произвольным видом препятствий.

Движение трактора по полю с виртуальной разметкой осуществляется с помощью базы знаний из набора продукционных правил, которые написаны с помощью системы WARR или любой аналогичной оболочки. Можно использовать, например, Fuzzy Toolbox MATLAB. Возможно также автоматическое получение правил при помощи нейро-нечеткой нейросети ANFIS Fuzzy Toolbox MATLAB при наличии обучающей выборки, то есть временного ряда параметров на входе и управляющих воздействий на выходе. Левые и правые границы движения трактора, а также препятствия задаются с помощью графического редактора, причем разметка может изменяться в процессе работы модели трактора.

Движение трактора может осуществляться вдоль произвольной траектории, ограниченной препятствиями и виртуальной разметкой.

Создание имитационной модели ПАК

Имитационная модель ПАК с отображением информации о движении сельскохозяйственной техники и возможностью прямого управления с элементами VR/AR включает в себя 3D-модель трактора, модель элементов управления трактором, интерфейс для отображения информации о движении сельскохозяйственной техники, а также программную реализацию взаимодействия оператора с элементами управления.

При проектировании важно разбивать все анимируемые узлы (колеса, подвеска, гидравлика) и все интерактивные узлы (руль, АКПП, селектор газа, тумблер ИИ) на отдельные группы, чтобы иметь возможность настраивать с ними дальнейшее взаимодействие в физических редакторах. На рисунке 15 представлена модель трактора.

После создания модели, выполнены импорт 3D-модели трактора в графический редактор Unity и перенос модели на заранее подготовленную и настроенную под VR-сцену.

Аналогичным образом выполнено построение 3D-модели кабины трактора, где размещены все необходимые для перехвата управления оператором элементы. На рисунке 16 представлена модель кабины трактора в момент взаимодействия оператора с коробкой передач.

Рис. 15. 3D-модель трактора

Рис. 16. Взаимодействие с коробкой передач

Программная реализация передвижения трактора по испытательному полигону, взаимодействия с элементами управления и отображения информации о движении выполнена на языке C#.

В результате получен набор моделей и алгоритмов для беспилотного управления сельскохозяйственной техникой на основе данных полевых испытаний с элементами удаленного мониторинга оператора на основе технологий VR/AR.

Заключение

В рамках работ над проектом «Разработка и создание программно-аппаратного комплекса для автоматического беспилотного управления сельскохозяйственной техникой при возделывании земельных участков Московской области с реализацией облачных сервисов построения маршрутов на трехмерной модели поверхности и удаленным мониторингом оператора на основе технологий VR/AR» решены следующие задачи:

- создание трехмерной модели испытательной территории в формате виртуальной реальности с использованием данных аэросъемки, дистанционного зондирования, кадастровых данных с построением маршрутов и выявлением препятствий. В процессе создания модели решены задачи разработки трехмерной модели испытательной территории и адаптации полученной модели для использования в виртуальной реальности, совмещения трехмерной модели испытательной территории с данными аэросъемки, нанесение геопозиционных меток на полученную модель, привязки трехмерной модели испытательной территории к кадастровым данным, разработки алгоритма построения маршрутов на трехмерной модели испытательной территории, детектирования препятствий и внештатных ситуаций на поле, эмуляции работы системы детектирования и алгоритма построения маршрутов на базе полученной трехмерной модели испытательного полигона;

- создание набора базовых алгоритмов управления движением. В процессе создания набора базовых алгоритмов был разработан набор нечетких правил для управления единицей сельскохозяйственной техники на испытательном полигоне, рассмотрены вопросы влияния различных логик на изменение функции управления роботом, устойчивости функции управления в динамически изменяемых условиях;

- создание имитационной модели ПАК с отображением информации о движении сельскохозяйственной техники и возможностью прямого управления с элементами VR/AR. Созданная имитационная модель включает в себя модель элементов управления трактором, интерфейс для отображения информации о движении сельскохозяйственной техники, а также программную реализацию взаимодействия оператора с элементами управления.

Созданный прототип программно-аппаратного комплекса позволяет осуществлять удаленное автоматическое управление несколькими единицами сельскохозяйственной техники, а также переходить в режим ручного управления с использованием технологий виртуальной и дополненной реальности в случае возникновения внештатной ситуации.

Данный проект может позволить решить проблемы уменьшения издержек за счет постоянной работы трактора, картирования и моделирования сельскохозяйственных полей с их дальнейшим учетом для планирования и вовлечения в более эффективный хозяйственный оборот.

Полученное решение может представлять большой интерес для предприятий сельскохозяйственной отрасли и внести существенный вклад в развитие сельскохозяйственных технологий.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства Московской области «Разработка и создание программно-аппаратного комплекса (ПАК) для автоматического беспилотного управления сельскохозяйственной техникой при возделывании земельных участков Московской области с реализацией облачных сервисов построения маршрутов на трехмерной модели поверхности и удаленным мониторингом оператора на основе технологий VR/AR»

Список литературы

1. Федеральная научно-техническая программа развития сельского хозяйства на 2017 – 2025 годы. – Текст : электронный / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – URL : <https://mcx.gov.ru/activity/state-support/programs/technical-program/> (дата обращения: 30.11.2020).
2. Азяева, Е. А. Актуальные кадровые проблемы сельскохозяйственных предприятий / Е. А. Азяева // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2017. – Т. 3, № 13. – С. 699 – 701.
3. Славин, О. А. Обзор технологий виртуальной и дополненной реальности / О. А. Славин, Е. С. Гринь // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2019. – Т. 69, № 3. – С. 42 – 54. doi: 10.14357/20790279190304
4. Бутусов, А. Возможности виртуальной реальности для сельского хозяйства / А. Бутусов // iot.ru : новости Интернета вещей. – 2017. – URL : <https://iot.ru/selskoe-khozyaystvo/vozmozhnosti-virtualnoy-realnosti-dlya-selskogo-khozyaystva> (дата обращения: 30.11.2020).
5. Паршуков, Д. В. Применение технологий дополненной и виртуальной реальности в подготовке кадров сельского хозяйства / Д. В. Паршуков // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 16 – 18 апреля 2019 г., Красноярск. – Красноярск, 2019. – С. 141 – 143.
6. Применение технологий искусственного интеллекта в сельском хозяйстве / Е. А. Скворцов, В. И. Набоков, К. В. Некрасов [и др.] // Аграрный вестник Урала. – 2019. – № 8 (187). – С. 91 – 98. doi: 10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141
7. Набоков, В. И. Целесообразность использования робототехники в сельском хозяйстве. – Текст : электронный / В. И. Набоков, К. В. Некрасов, Е. А. Скворцов // Московский экономический журнал. – 2018. – № 4. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/tselesoobraznost-ispolzovaniya-robototekhniki-v-selskom-hozyaystve> (дата обращения: 30.11.2020).
8. Калинин, Н. В. О технологиях машинного зрения в сельском хозяйстве / Н. В. Калинин // Научный электронный журнал Меридиан. – 2020. – № 3 (37). – С. 60 – 62. – URL : <http://meridian-journal.ru/site/article?id=2745&pdf=1> (дата обращения: 30.11.2020).
9. Мартыненко, А. Компания Yanmag выпустила робот-трактор для японских полей. – Текст : электронный / А. Мартыненко // Техкульт. – 2018. – URL : <https://www.techcult.ru/robots/5564-robot-traktor-dlya-yaponskih-polej> (дата обращения: 30.11.2020).
10. Головина, Е. Ю. Подход к созданию нечетких динамических систем поддержки принятия решений. – Текст : электронный / Е. Ю. Головина // Программные продукты и системы. – 2002. – № 3. – URL : <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=683> (дата обращения: 30.11.2020).

The Development of Models and Algorithms for Unmanned Control of Agricultural Machinery Using Virtual and Augmented Reality Technologies

A. N. Averkin, M. V. Lishilin, V. A. Dorokhin, L. N. Teryaev

*Department of System Analysis and Management, m.lishilin@gmail.com;
"University "Dubna", Dubna, Moscow region, Russia*

Keywords: unmanned control; virtual and augmented reality; control system; management of agricultural machinery.

Abstract: The article is devoted to the development of models and algorithms for creating a software and hardware complex for automatic unmanned control of agricultural machinery. A three-dimensional model of the test area in the virtual reality format, a set of basic motion control algorithms, and a simulation model of a software and hardware complex are described.

References

1. <https://mcx.gov.ru/activity/state-support/programs/technical-program/> (accessed 30 November 2020).
2. Azyayeva Ye.A. [Actual personnel problems of agricultural enterprises], *Aktual'nyye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics], 2017, vol. 3, no. 13, pp. 699-701. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Slavin O.A., Grin' Ye.S. [Review of virtual and augmented reality technologies], *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences], 2019, vol. 69, no. 3, pp. 42-54, doi: 10.14357/20790279190304 (In Russ., abstract in Eng.)
4. <https://iot.ru/selskoe-khozyaystvo/vozmozhnosti-virtualnoy-realnosti-dlya-selskogo-khozyaystva> (accessed 30 November 2020).
5. Parshukov D.V. *Nauka i obrazovaniye: opyt, problemy, perspektivy razvitiya* [Science and education: experience, problems, development prospects], Proceedings of the International Scientific Practical Conference, 16 – 18 April, 2019, Krasnoyarsk, 2019, pp. 141-143. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Skvortsov Ye.A., Nabokov V.I., Nekrasov K.V., Skvortsova Ye.G., Krotov M.I. [Application of artificial intelligence technologies in agriculture], *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2019, no. 8 (187), pp. 91-98, doi: 10.32417/article_5d908ed78f7fc7.89378141 (In Russ., abstract in Eng.)
7. <https://cyberleninka.ru/article/n/tselesoobraznost-ispolzovaniya-robototekhniki-v-selskom-khozyaystve> (accessed 30 November 2020).
8. <http://meridian-journal.ru/site/article?id=2745&pdf=1> (accessed 30 November 2020).
9. <https://www.techcult.ru/robots/5564-robot-traktor-dlya-yaponskih-polej> (accessed 30 November 2020).
10. <http://www.swsys.ru/index.php?page=article&id=683> (accessed 30 November 2020).

Entwicklung von Modellen und Algorithmen für unbemannte Steuerung der Landtechnik mit virtueller Technologie und augmentierter Realität

Zusammenfassung: Der Artikel ist der Entwicklung von Modellen und Algorithmen zur Erstellung eines Software- und Hardwarekomplexes zur automatischen unbemannten Steuerung landwirtschaftlicher Maschinen gewidmet. Es ist ein dreidimensionales Modell des Testbereichs im Virtual-Reality-Format, einer Reihe grundlegender Bewegungssteuerungsalgorithmen und eines Simulationsmodells des Software- und Hardwarekomplexes beschrieben.

Mise au point des modèles et des algorithmes pour la commande sans pilote du matériel agricole utilisant des technologies de la réalité virtuelle et supplémentaire

Résumé: L'article est consacré à l'élaboration des modèles et des algorithmes pour la construction d'un complexe de logiciels et de matériel de la commande automatique sans pilote des machines agricoles. Est décrit un modèle en trois dimensions du territoire d'essai dans un format de la réalité virtuelle, d'un ensemble d'algorithmes de la commande du mouvement, d'un modèle de simulation d'un complexe logiciel-matériel.

Авторы: *Аверкин Алексей Николаевич* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры системного анализа и управления; *Лишилин Михаил Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления; *Дорохин Виктор Александрович* – аспирант кафедры системного анализа и управления; *Теряев Лев Николаевич* – магистрант, ГБОУ ВО МО «Университет «Дубна», г. Дубна, Московская обл., Россия.

Рецензент: *Мокрозуб Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.