

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 681.518.2:602.4

DOI: 10.18413/2518-1092-2019-4-2-0-1

Маслаков Ю.Н.¹
Бережной В.А.²
Иващук О.А.²
Яценко В.М.¹

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА,
ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ IN VITRO**

¹) ООО «ИНВИТРО ВИЖН», проспект Ватутина 4-26, г. Белгород, 308034, Россия

²) Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия

e-mail: maslakov.yn@gmail.com, vaber93@mail.ru, ivaschuk@bsu.edu.ru, vovwva@mail.ru

Аннотация

В статье рассматриваются подходы к решению проблемы точной и объективной регистрации и оценке роста и развития растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития, выращиваемых в условиях *in vitro* (в пробирке), что позволяет получить высококачественный безвирусный посадочный материал. Процесс фиксации параметров роста растений при натуральных измерениях нарушает микроклимат, сформированный для оптимального развития растения, вносит серьезные погрешности из-за влияния человеческого фактора, и кроме того связан с необходимостью обработки больших объемов разнородных данных. Все это определяет перспективность использования современных информационных технологий, методов и средств автоматизации и моделирования, построения на этой основе автоматизированной системы мониторинга, оценки и прогнозирования роста и развития растений в условиях *in vitro*. На сегодняшний день существуют различные аппаратно-программные комплексы, предлагаемые зарубежными компаниями для фотографирования растений и оценки их морфометрических показателей, однако, они не учитывают условий нахождения растений в пробирке за стеклом, что вносит искажения изображения из-за запотевания и дефектов стекла, нелинейности на границах пробирки, блики и отражения окружающих объектов. В данной работе предложен прототип автоматизированной системы, при помощи которой осуществляется фотосъемка растения, производится сбор объективной информации о морфометрических параметрах растений в процессе их роста и производится оценка состояния растений на основе создания их объемной реконструкции.

Ключевые слова: реконструкция изображения, калибровка изображения, сегментация изображения, облако точек, сегментация облака точек, извлечение признаков.

UDC 681.518.2:602.4

Maslakov Y.N.¹
Berezhnoy V.A.²
Ivaschuk O.A.²
Yacenco V.M.¹

**AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING, ESTIMATION
AND PREDICTING THE GROWTH AND DEVELOPMENT
OF PLANTS IN VITRO**

¹) LLC "INVITRO VISION", Vatutina Avenue 4-26, Belgorod, 308034, Russia

²) Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Belgorod State University", 85, Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia

e-mail: maslakov.yn@gmail.com, vaber93@mail.ru, ivaschuk@bsu.edu.ru, vovwva@mail.ru

Abstract

The paper discusses approaches to solving the problems of accurate and objective registration and estimation of the growth and development of plants (and its individual parts) depending on the composition of nutrient media and various stages of development grown *in vitro*, which allows to obtain high-quality virus-free planting material. Manual measurements of plant parameters could violate the microclimate *in vitro* formed for the optimal plants development, causing serious errors due to the influence of human factors, and in addition, requires to handle a lot of information. The problems above could be solved by building an automated system based on modern information technologies, methods and tools for modeling. Existing various hardware and software systems for photographing plants and evaluating their morphometric parameters do not take into account the *in vitro* conditions. Photos of plants *in vitro* could have a condensate layer and various glass defects and distortions. In this paper, proposed prototype of an automated system, the main aim of which is to collect plants photos and calculate plants morphometric parameters with taking into account *in vitro* conditions.

Keywords: image reconstruction, image calibration, image segmentation, point cloud, point cloud segmentation, feature extraction.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время выращивание меристемных растений и их микроклональное размножение является современным продвинутым подходом для получения продукта на европейском рынке и перспективной областью развития на территории РФ. Процесс выращивания таких растений производится в условиях *in vitro* (в пробирке). Для улучшения показателей и скорости роста растения помещают в специальную питательную среду, состоящую из набора аминокислот, солей, сахаров и фитогормонов [Smith, 2013; Reekie, Bazzaz, 2011]. Однако выявление того, какая питательная среда окажет наиболее благоприятное воздействие на рост растения, не всегда является простой задачей. Для оценки влияния питательной среды на растение необходимо фиксировать морфометрические параметры растения, а также его частей – стебля, листьев и корневой системы, фиксировать динамику развития растения, детектировать окрас и оттенок растения, регистрировать появление инфекций на ранней стадии развития. Процесс фиксации параметров роста растений при натуральных измерениях нарушает микроклимат, сформированный для оптимального развития растения, вносит серьезные погрешности из-за влияния человеческого фактора, и кроме того связан с необходимостью обработки больших объемов разнородных данных. Повысить правильность выбора и эффективность подбора параметров питательной среды потенциально может аппаратно-программный комплекс, который будет фиксировать основные параметры роста и развития растений и при помощи этих данных в начале оценивать корреляцию питательной среды с темпом развития растений, а затем выступать в роли системы принятия решений по конфигурации наиболее удачной среды.

Создание аппаратно-программного комплекса с выше описанным функционалом условно можно разбить на несколько этапов: построение прототипа установки, разработка автоматизированного процесса детектирования параметров растения, обучение системы, тестирование и улучшение принятых системой решений, коммерциализация полученного комплекса. В данной работе будут рассмотрены первые два этапа создания предложенной системы – конструирование прототипа установки и описание методов и алгоритмов фиксации параметров роста и развития растений в условиях *in vitro*.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основная цель данной работы – это повышение эффективности процесса управления выращиванием растений в условиях *in vitro* за счет разработки системы по сбору объективной информации о росте и развитии растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

Рассмотрим системы получения первичной информации с ее последующей обработкой.

Сегодня существуют различные установки для фиксации параметров развития растений, но они обладают рядом недостатков. Например, в работах [Gibbs, Pound, Wells, Murchie, French, Pridmore, 2014; Kumar, Connor, Mikiavcic, 2014; Pound, French, Murchie, Pridmore, 2014] рассматриваются системы фотографирования растений и построения объемной модели, однако на основании полученных моделей не производится никакого процесса фиксации параметров растений. В работе [Güneş, Augün, 2017] авторы сделали акцент на получении морфологических показателей, но производили их фиксацию только по двумерным изображениям фотографий растений.

В книге [Gai, 2016] описываются различные технические подходы по получению морфометрических параметров по двумерным изображениям, а также по объемным моделям, но список этих параметров ограничен.

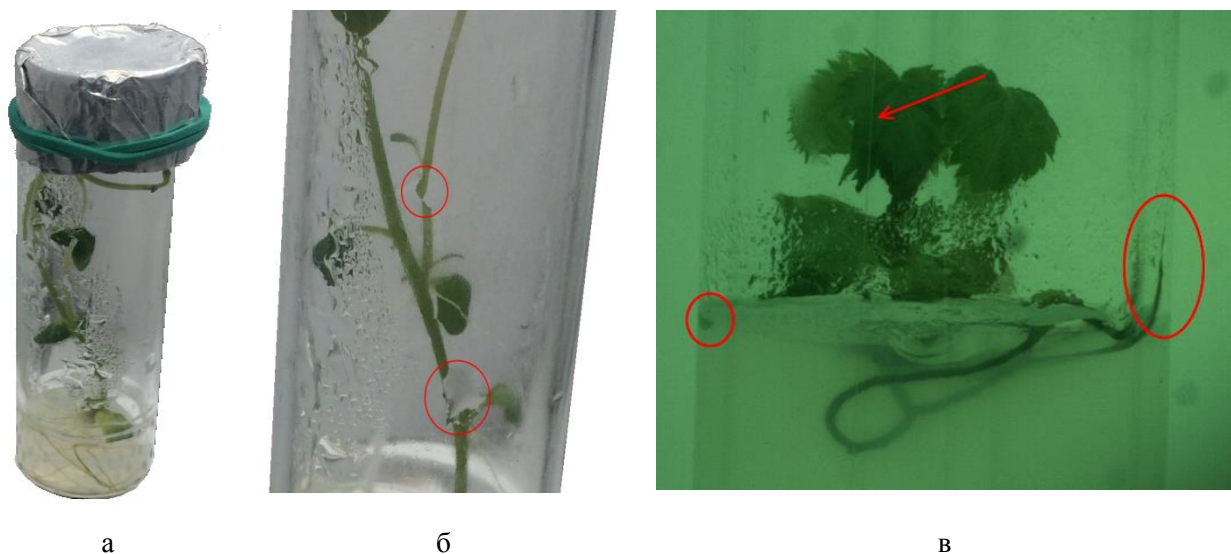


Рис. 1. Фотографии исследуемых образцов в системе *in vitro* и их особенности:

а) появление конденсат б) наличие артефактов и искажений в) вносимые стеклом нелинейности

Fig. 1. Plant's photos and its features: a) the appearance of condensate b) the presence of artifacts and distortions c) the nonlinearity of the image introduced by the glass

Главным отличием разрабатываемой авторами автоматизированной системы от вышеуказанных является обеспечение возможности обработки снимков растений в условиях *in vitro*, которые характеризуются следующими особенностями:

Для растений внутри пробирок создается особый микроклимат, в результате чего на их стенках может появляться конденсат (рис 1а).

Пробирка может иметь дефекты, потертости, царапины в структуре стекла и накладывать различные артефакты на фотографии (рис 1 б, в).

Пробирка вносит искажения при фотографировании сквозь стекло исследуемого образца, особенно сильно данный эффект проявляется на границах пробирки (рис 1в).

При освещении на стекле могут появляться блики и отражения окружающих объектов.

Невозможность использовать подход на основе лазерной сетки (Gai, 2016).

Были рассмотрены различные конструкции прототипа установки и принято решение: отказаться от сложных систем позиционирования камеры, например, как в [Gibbs, Pound, Wells, Murchie, French, Pridmore, 2014; Krainin, Henry, Ren, Fox, 2010]; использовать в конструкции

вращающуюся подставку, как в работе [Güneş, Aygün, 2017]; использовать направляющие для вертикального позиционирования камер.

ВЫДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ПРИЗНАКОВ И ВЕЛИЧИН

Для сбора объективной информации о росте и развитии растений необходимо выделить параметры, которые характеризуют анатомические и физиологические признаки и потенциально могут напрямую или косвенно демонстрировать результат изменения среды и условий выращивания на динамику роста растения.

Анализ литературы показал, что нельзя выделить четкую систему или классификацию анатомических и физиологических признаков, однако можно выявить наиболее часто используемые [Gehan, Fahlgren 2018], такие как длина побега, длина корней, количество листьев, количество корней, длина листовой пластины, ширина листовой пластины, толщина стебля, количество узлов, расстояние между узлами, общий объем растений, объем стебля, объем листьев, объем корневой системы и т.д.

По обозначенным признакам необходимо собрать информацию по каждому образцу. В перспективе после накопления необходимого объема базы возможна разработка экспертной системы, которая после обучения поможет сделать вывод о степени влияния конкретной питательной среды на рассматриваемое растение.

ВЛИЯНИЕ ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ФОТОСНИМКОВ

Непосредственное влияние на качество фотографий и дальнейшую объемную реконструкцию имеет источник освещения. Были проведены исследования следующих вариантов построения системы освещения: прямое и боковое точечное освещение; боковое рассеянное освещение; вертикальное точечное освещение; вертикальное рассеянное освещение; контражурный свет; прямое лазерное излучение; обратное лазерное излучение; УФ-излучение; освещение объекта на различном фоне.

Сделаны следующие выводы:

а) для минимизации бликов при освещении растений в пробирках требуется рассеянный, заполняющий свет. Необходим источник с регулируемым уровнем освещения (для получения качественных фотографий растений и снимков, и для последующего анализа требуется разный уровень освещения).

б) цвет освещения существенно влияет на результаты анализа изображений. Отражение и поглощение различных длин волн органами растения может предоставить дополнительную информацию о его состоянии, а также о наличии болезней. Наиболее качественными источниками искусственного излучения являются лампы накаливания, однако для создания высокого уровня освещенности необходимы лампы высокой мощности, которые выделяют большое количество тепла и обладают высокой температурой. Для целей проекта более предпочтительными являются светодиодные источники света с цветовой температурой 4000-4500 К с параметрами цветопередачи CRI>80.

в) для выявления различных патологий необходима съемка в УФ-диапазоне.

г) для исследований в ИК-диапазоне требуется наличие оптических сенсоров и оптических систем без ИК-фильтров.

д) цвет фона значительно влияет на качество изображений. Сравнив все плюсы и минусы темного и светлого фона, было принято производить фотографирование объекта на светлом фоне.

Таким образом, определены основные требования к системе мультиспектрального освещения:

- система освещения должна обеспечивать следующие режимы освещения: светотональный, заполняющий, контровой, ключевой;

- обеспечение бестеневого освещения образца, расположенного в пробирке, должно достигаться путем распределенного размещения источников света;
- источники освещения должны обеспечивать рассеянный, бестеновой свет;
- регулирование уровня освещения должно обеспечиваться бесступенчато в диапазоне от 50 до 8000 лк;
- должна обеспечиваться возможность освещения монохроматическим спектром со следующими длинами волн: 465 нм, 525 нм, 660 нм, а также белого света с цветовой температурой 4000K и $CRI \geq 80$.
- должна обеспечиваться возможность освещения любым сочетанием уровней излучения устанавливаемых источников излучения для формирования мультиспектра.

С целью проведения исследований и получения изображений в инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах спектров необходимо также обеспечить устройство излучателями инфракрасного и ультрафиолетового спектра. Для обеспечения необходимой чувствительности оптических сенсоров в диапазоне ИК-излучения требуется использовать сенсоры без установленного на них ИК-фильтра, что будет выполнено во вновь закупаемых образцах оптических сенсоров.

Для инфракрасного излучения наиболее приемлемым является диапазон, расположенный ближе к видимому излучению. Для ультрафиолетового диапазона допустимым для освещения растений является ближний УФ-диапазон с длинами волн 315-400 нм. Так как необходимо управление мощностью излучения в данном диапазоне, то наилучшим образом подходят светодиодные источники излучения УФ-диапазона (длина волны 385 нм, 365 нм).

Благодаря различию коэффициентов рассеяния, пропускания и отражения в различных участках диапазона излучения от ультрафиолетового до инфракрасного на изображениях, сделанных при различном их сочетании можно увидеть детали, которые в обычном свете не детектируются.

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА УСТАНОВКИ

Определим основные требования к структуре и функционалу разрабатываемого прототипа установки:

- 1) Наличие фиксирующего механизма для исследуемого образца на подставке.
- 2) Возможность вращения исследуемого образца на подставке.
- 3) Возможность производить фотосъемку растений с разных ракурсов.
- 4) Наличие различных видов освещения в различных спектрах.
- 5) Возможность осуществлять точную регулировку положения камер и исследуемого образца.

Исходя из требований к структуре и функционалу разрабатываемого прототипа установки был спроектирован и изготовлен испытательный стенд для измерения морфометрических признаков растений (рис. 2). На рисунке 3 отображена структурная схема стенда. Стенд обладает 2мя оптическими модулями (рис. 4), подключенными через коммутатор, поддерживающий 1 Gb Ethernet, 2мя шаговыми двигателями для вращения исследуемого образца и для изменения высоты камер, аппаратно-вычислительную платформу Arduino для управления шаговыми двигателями и системой освещения, а также различное осветительное оборудование.



Рис. 2. Прототип установки
Fig. 2. Stand prototype

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выделение значимых признаков растения было произведено на основе обработки двумерных изображений растений, полученных в ходе вращения пробирки с исследуемым образцом и их фотографированием, а также на основе объемной реконструкции растений по полученным фотоснимкам. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки, которые будут описаны в результатах и обсуждении.

Получение параметров растения в двумерном пространстве

Процесс расчета морфометрических параметров на основе фотоснимков состоит из следующих шагов: локализация пробирки, калибровка и обработка изображения внутри пробирки, локализация растения, выявление необходимых признаков и величин.

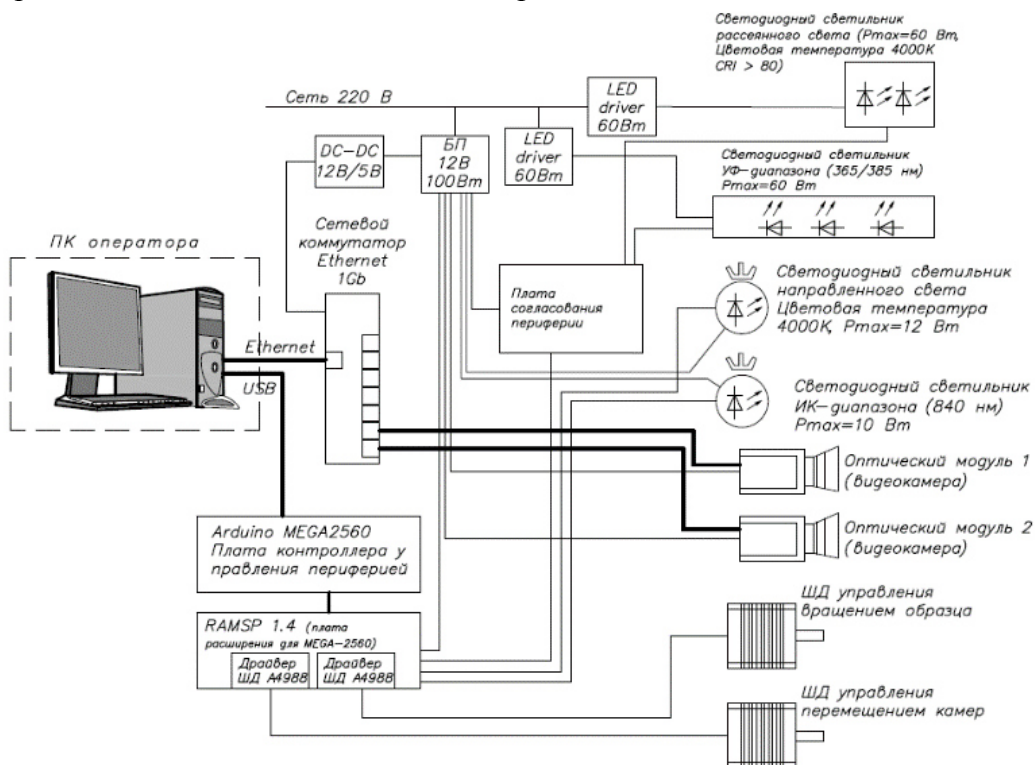


Рис. 3. Структурная схема станда
Fig. 3. Structural scheme of the stand

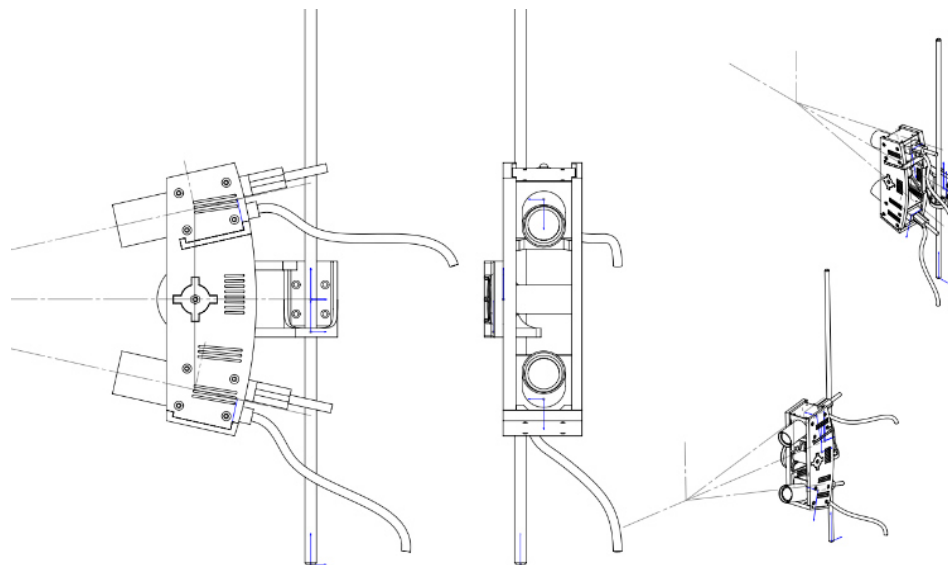


Рис. 4. Взаимное расположение оптических модулей
Fig. 4. Mutual arrangement of optical modules

Локализация объекта на однородном фоне при помощи средств компьютерного зрения является тривиальной задачей. По выделенному изображению с растением и пробиркой необходимо провести калибровку для минимизации радиальной дисторсии. Калибровку можно провести, поместив изображение с шахматным паттерном внутрь пробирки (рис. 5).

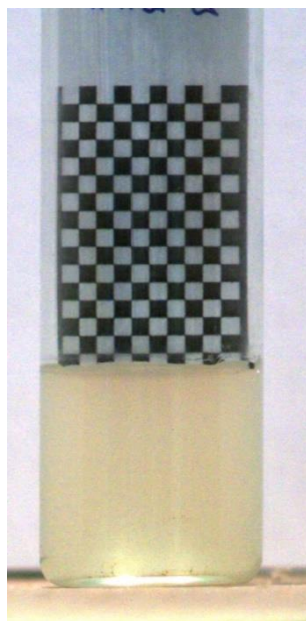


Рис. 5. Калибровка изображения камеры при помощи калибровочной доски
Fig. 5. Calibrate the camera image using the calibration board

Локализовать растение можно при помощи использования комбинации бинарных масок, полученных в разных цветовых палитрах (рис. 6).

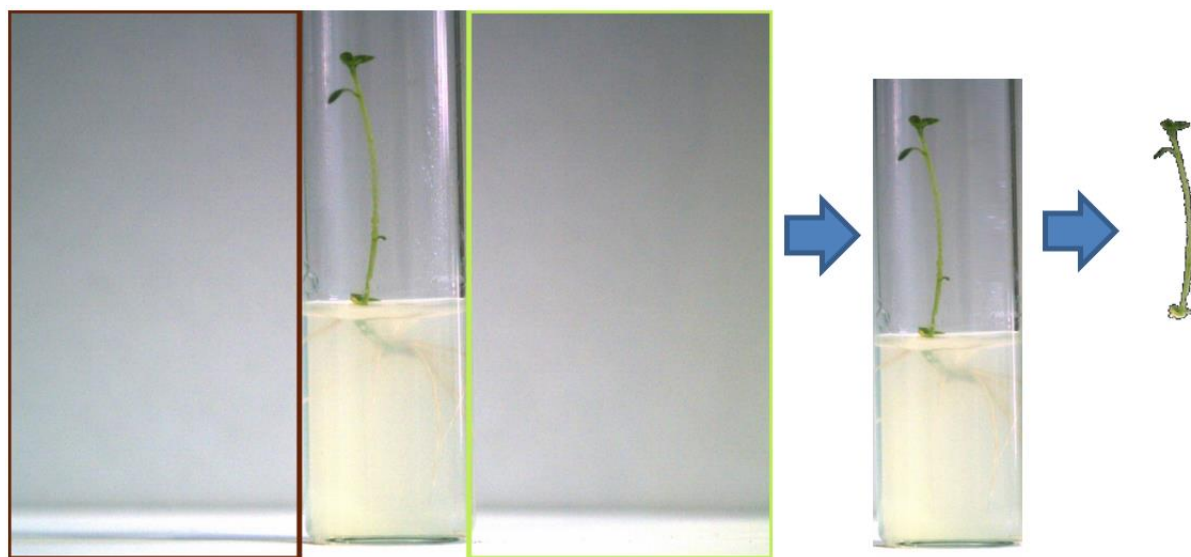


Рис. 6. Локализация растения в пробирке на изображении
Fig. 6. Localization of the plant *in vitro* on the image

Для сегментации частей растения выделим скелет растения, локализуем узловые точки и построим граф растения.

На основе работ [Zhang, Suen, 1984; Lee, Kashyap, Chu, 1994; Abu-Ain, Abdullah, Bataineh, Omar, 2013] были изучены различные подходы к построению скелета объекта и получен результат, показанный на рис. 7. По полученному скелету растения можно выделить узловые и краевые точки и построить граф растения (рис. 8).

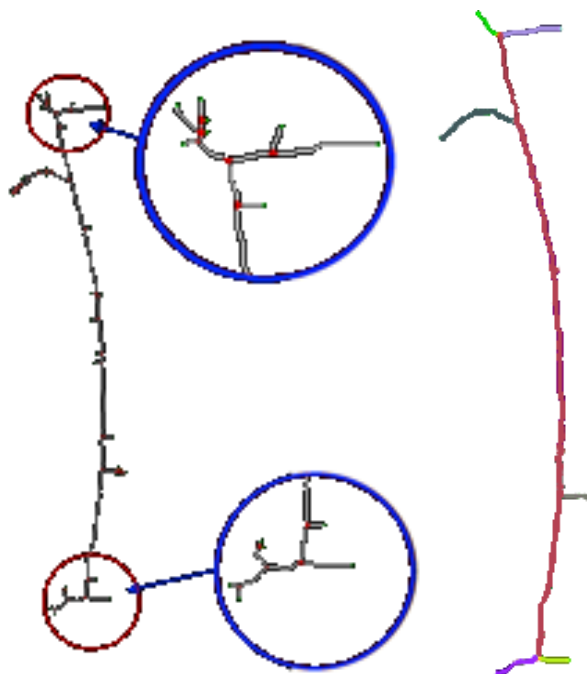


Рис. 7. Скелет выделенного растения и его сегментация на ствол и листья
Fig. 7. Skeleton of a selected plant and its segmentation into stem and leaves

В полученном графе были отфильтрованы ребра от узловых точек к листьям графа евклидово расстояние которых меньше порогового. Такие ребра могут быть ложно рассмотрены в виде листьев растения и нуждаются в исключении из графа.

На основании полученного графа можно оценить длину побега как евклидово расстояние от нижней до верхней узловой точки. Т.к. части растения могут иметь определенный изгиб рекомендуется вводить промежуточные вершины в ребрах графа.

Модель стебля растения можно представить в виде последовательно соединенных цилиндров. Рассчитав объем каждого такого цилиндра и просуммировав эти объемы, можно найти объем стебля растения. Количество листьев рассчитывается на основании количества ребер графа от узловых точек до листьев графа. В рассматриваемом примере следует исключить листья, образованные вершинами 1-2 и 2-3, т.к. они находятся на границе основания стебля и корневой системы.

Объем листьев рассчитать на основании полученных данных не представляется возможным, т.к. листовая пластина может иметь сложную форму и ее нельзя представить в виде модели цилиндра.

При достаточной прозрачности питательной среды, используя подходы, описанные выше, можно найти длину и объем корневой системы.

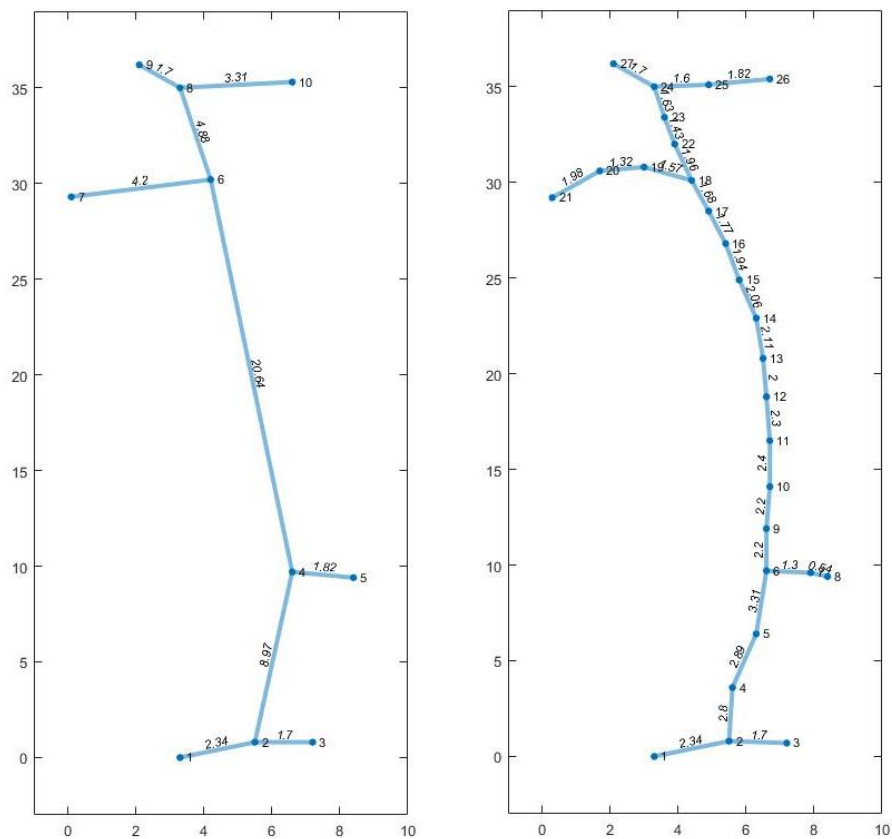


Рис. 8. Граф растения: а) показаны только основные вершины б) с введением промежуточных вершин
Fig. 8. Plant's graph: a) only the main vertices b) with the intermediate vertices

Следует отметить, что результаты измерений могут варьироваться в зависимости от угла вращения растения. Так, при определенном угле вращения листья могут быть скрыты стеблем или другими листьями. В виду этого необходимо делать серию вычислений морфометрических параметров при различном угле вращения растения, сопоставлять полученные параметры и из полученных данных находить максимальные значения длин и объемов, что однозначно является существенным минусом расчета морфометрических параметров растения на двумерном изображении.

Также важно отметить, что фиксация морфометрических признаков может использоваться при относительно простой структуре растения, в которой стебель четко выделен, а листья растения не перекрывают друг друга и стебель растения.

Для получения более точного набора морфометрических данных растения необходимо использование методов трехмерной реконструкции и выделения необходимых параметров из полученного облака точек.

Получение параметров растения на основе объемной реконструкции

В связи с тем, что по серии двумерных фотоснимков растений невозможно выделить все заявленные морфометрические параметры рассмотрим расчет параметров на основе объемной реконструкции растений.

Для выбора метода создания объемной реконструкции объекта были рассмотрены существующие подходы и выделены наиболее приемлемые для использования в прототипе установки:

PMVS – Patch based Multi-View Stereo. Данный алгоритм использует набор изображений с известными матрицами проекций, которые рассчитываются на основе известной матрицы внутренних параметров камеры, а также значений смещения и вращения камеры относительно проецируемой плоскости. Алгоритм генерирует набор прямоугольных элементов, покрывающих видимую поверхность изображений. Процесс спроектирован по принципу сопоставляй, расширяйся, фильтруй. Работа алгоритма начинается с поиска особых точек на наборе сопоставляемых изображений, затем циклически алгоритм начинает строить сетку прямоугольных элементов, берущих свое начало в области найденных особых точек. На каждом шаге происходит автоматическая фильтрация ложных сопоставлений и прямоугольных элементов до тех пор, пока не будет достигнута заранее заданная точность [Furukawa, Ponce, 2010; Torok, 2012; Furukawa, Hernández, 2015].

VH – Volumetric Visual Hull. Данный алгоритм создает объемную реконструкцию на основе пересечения силуэтов объекта с различных ракурсов, также часто называется методом пересечения объемов. Для функционирования алгоритма необходимо заранее знать матрицы проекций каждого изображения. В начале формируются битовые карты (силуэты) объекта на всех снимках: если пиксель изображения принадлежит объекту, то соответствующий бит в битовой карте принимается равным единице, иначе нулю. По пересечению силуэтов с разных снимков можно восстановить геометрическую модель объекта [Laurentini, 1994; Matusik, Buehler, Raskar, Gortler, McMillan, 2000; Slabaugh, Schafer, Malzbender, Culbertson, 2001; Vogiatzis, Esteban, Torr, Cipolla, 2007].

SL – Gray-coded Structured Light. Алгоритм использует решетчатую сетку на основе паттернов, генерируемых при помощи кода Грея. Данная сетка накладывается на источник освещения и помогает воссоздать карту глубины. Далее на основе карт глубин можно реконструировать объект исследования [Gupta, 2007; Young, Beeson, Davis, Rusinkiewicz, Ramamoorthi, 2007; Kawasaki, Furukawa, Sagawa, Yagi, 2008].

В процессе разработки было выявлено, что приемлемый результат реконструкции позволяет получить PMVS метод. Для его работы необходима серия фотоснимков с разных ракурсов и известные матрицы проекций для каждого из фотоснимков.

Учитывая, что необходимо вычислить матрицы проекций вращающейся вокруг своей вертикальной оси пробирки можно воспользоваться калибровочными паттернами. Обзор литературы показал, что есть подходы, при которых калибровочное изображение необязательно должно полностью отображаться на снимке, а достаточно лишь части отображаемого паттерна. Например, в [Zhang, 2000] используется шаблон калибровки на основе дескрипторов, а в [Vogiatzis, Hernández, 2010] с использованием набора кругов с заранее известным расположением.

Однако такой подход вносит определенные погрешности матрицы вращений и смещений, на основании которых рассчитывается матрица проекций.

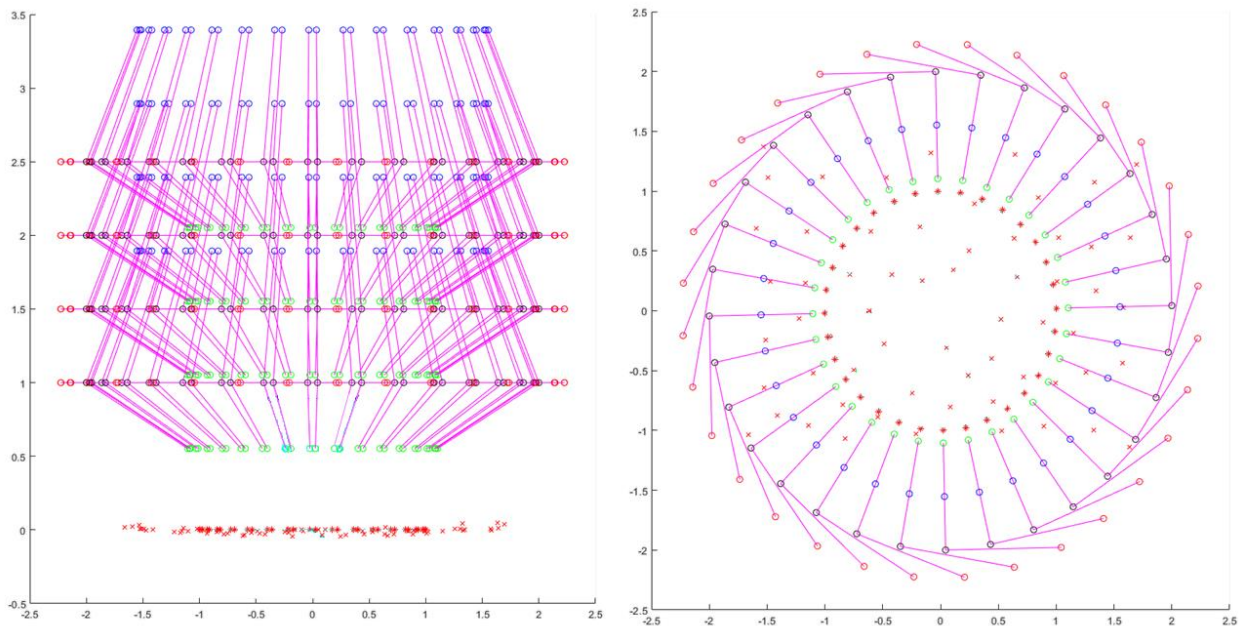


Рис. 9. Математическая модель расположения камер относительно растения на высотах h_1, h_2, h_3 : а) вид сбоку б) вид сверху. Обозначения: красные кресты – точки принадлежащие плоскости, на которую смотрят камеры. Черные точки – расположение камер. Зеленые, красные, синие точки – принадлежащие осям камер X, Y, Z соответственно. Розовые линии со направлены с линиями координатных осей камер

Fig. 9. The mathematical model of the location of the cameras around the plant at heights h_1, h_2, h_3 : a) side view b) top view. Legend: red crosses are points belonging to the plane on which the cameras are looking. Black dots – camera's positions. Green, red and blue points – belonging to the X, Y, Z axes of the cameras corresponding. Pink lines with directional lines with the axes of the cameras

Для ликвидации вышеуказанных погрешностей и используя тот факт, что заранее известно на какие углы поворачивается вращающаяся подставка, можно принять за начало системы координат пробирку с растением и рассчитать математическую модель изменения матриц смещений, вращений и проекций камер относительно пробирки (рис. 9).

Далее по полученным данным можно воспользоваться PMVS метод и построить облако точек, которое является объемной моделью растения (рис. 10а). Следует отметить, что при использовании PMVS метода решается проблема наличия царапин на стекле, а также наличия визуальных артефактов, т.к. одна и та же точка в пространстве рассматривается с разных ракурсов и область с искажением автоматически исключается из реконструкции.

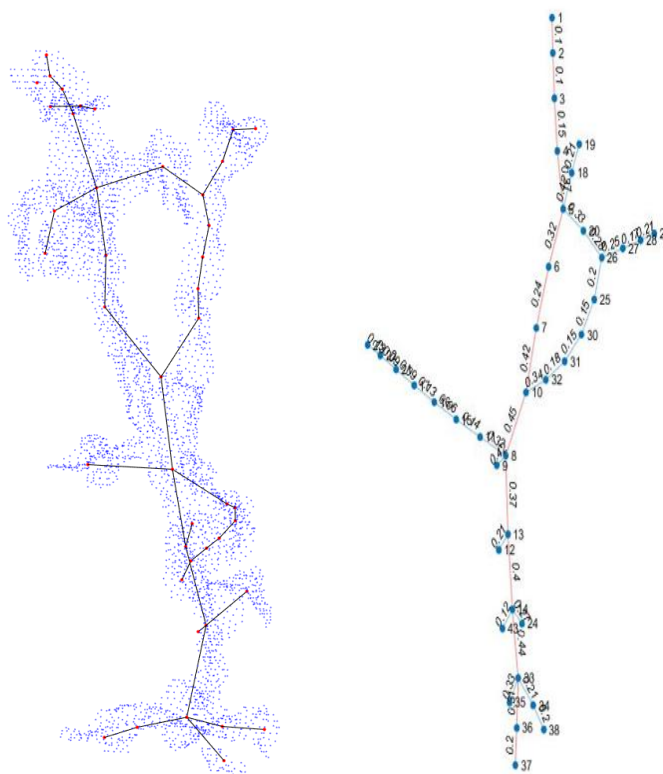


Рис. 10. а) Объемная модель растения в виде облако точек б) взвешенный граф модели растения
Fig. 10. a) Point cloud representing 3D plant model b) weighted graph of volumetric model

На основании работы [Tagliasacchi, Zhang, Cohen-Or, 2009] в облаке точек можно найти локальные центроиды для каждой области скопления точек, представить полученные данные в виде связанного взвешенного графа и построить скелет растения (рис 10б). Используя подход для сегментации частей растения, описанный при использовании модели в двумерном пространстве и расширив его на трехмерную модель, можно выделить ствол, листья и корневую систему растения (рис. 11 а,б). На основании полученного графа можно определить длину стебля, его изгиб, количество листьев, их длину и ширину. Посчитать объем каждого листа, ствола и корневой системы можно применяя подход, описанный в [Chang, Wu, Tsai, Chiu, 2017], который заключается в создании серии поуровневых срезов объекта, вычислении их площади, а затем интегрировании полученных результатов для вычисления объема объекта.

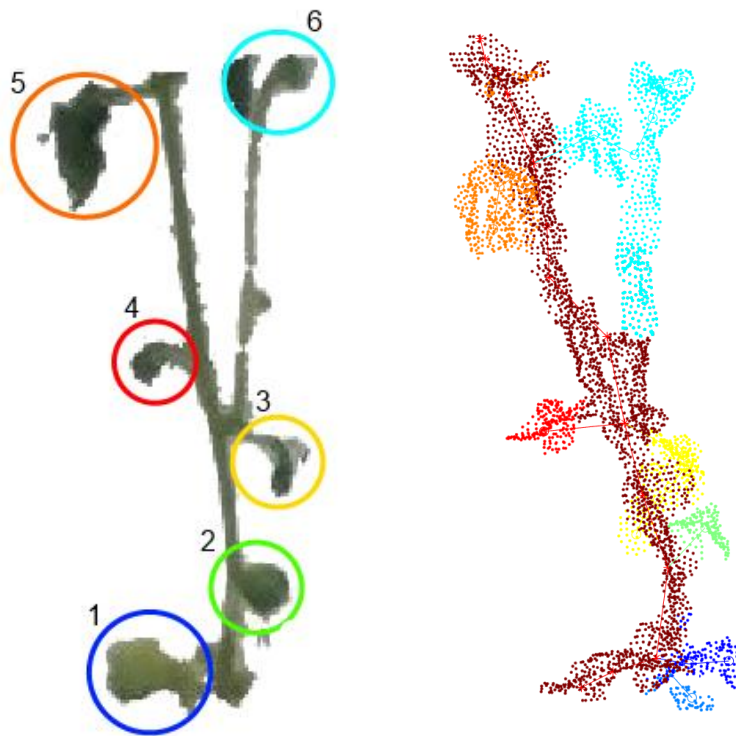


Рис. 11. а) Указание номеров листьев растения б) сегментация облака точек растения на его части (цвета сегментов листьев совпадают с выделенными листьями на рис. 11а)

Fig. 11. a) Numeration of the plant leaves b) cloud point segmentation on its parts (colours of leaf segment is the same as on fig. 11a)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основании рассмотренных алгоритмов были протестированы описанные методы для получения морфометрических параметров по серии двумерных изображений и по объемной реконструкции растения.

Полученные морфометрические параметры по серии фотографий для растения, показанного на рис. 6, приведены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1

Пример полученных морфометрических параметров растения на основании серии фотоснимков

Table 1

An example of the obtained morphometric parameters of the plant using a series of photographs

Длина стебля, мм	Кривизна стебля, град	Объем стебля, мм ³	Количество листьев, шт
34.68	14.92°	120.11	4

Таблица 2

Вершины и расстояния между ними на базе графа на рис. 8а

Table 2

Vertices and distances between them based on the graph at the fig. 8a

Вершина a_i	1	2	2	4	4	6	6	8	8
Вершина b_i	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние между a_i и b_i	2.34	1.7	8.97	1.82	20.64	4.2	4.88	1.7	3.31

Преимущества метода получения морфометрических показателей по серии фотографий показал свою алгоритмическую и вычислительную простоту по сравнению с методом выделения показателей на основе объемной реконструкции. Однако данный метод может применяться только при структурной простоте рассматриваемого растения, т.к. части растения могут перекрывать друг друга, например, один лист может закрывать другой. Также минусом данного метода является то, что с разных ракурсов значение морфометрических показателей будет отличаться и следует выбирать те значения, в которых значение параметров максимально. Самый главный недостаток – это невозможность рассчитать все необходимые показатели растений, например, объем листьев, длина листовая пластины, ширина листовая пластины, толщина стебля. Исходя из данных недостатков метода, был разработан более сложный, но более точный метод получения морфометрических параметров на основе объемной реконструкции.

Полученные морфометрические параметры на основании объемной реконструкции для растения, показанного на рис. 11, приведены в табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Пример полученных морфометрических параметров растения для растения, показанного на рис. 11

Table 3

An example of the obtained morphometric parameters of the plant for a plant shown in fig. 11

Длина стебля, мм	Кривизна стебля, град.	Объем стебля, мм ³	Количество листьев, шт.
36.6	22.14°	172.26	6

Таблица 3

Пример полученных морфометрических параметров листьев для растения, показанного на рис. 11

Table 4

An example of obtained morphometric parameters of leaves for a plant shown in fig. 11

Лист №	Длина листовая пластины, мм	Ширина листовая пластины, мм	Объем листа, мм ³
1	5.11	4.76	30.31
2	2.72	2.61	9.33
3	6.84	2.74	20.56
4	4.02	4.43	13.44
5	7.78	6.72	63.07
6	6.33	5.08	45.50

Предложенный метод показал, что при его использовании можно рассчитать все необходимые морфометрические показатели роста и развития растения, а также является более точным и надежным по сравнению с 1м методом, т.к. учитывает структуру растения в трехмерном, а не двумерном пространстве.

Время выполнения с использованием компьютера с процессором Intel Core i5 7th Gen первого метода примерно 2 секунды; время выполнения второго метода примерно 660 секунд, из которых – 360 сек на создание объемной реконструкции, 300 сек на получение морфометрических показателей.





Ссылки на источники с дополнительным видеоматериалом приведены в таблице 5.

Таблица 5

Наименования и URL-адреса видеоматериалов с визуализацией полученных данных

Table 5

Names and URLs of video materials with visualization of the received data

Наименование видеоматериала	Адрес URL	QR-код
Первичные данные	https://youtu.be/xOuGSixZQcA	
Выделение объекта растения на последовательности изображений	https://youtu.be/EdiWcOZ3oJA	
Каркас (скелет) растения	https://youtu.be/nKrpK0joK9A	
Кластеризация частей растения	https://youtu.be/9WosGRbl4J8	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В текущей работе были рассмотрены подходы к решению проблемы точной и объективной регистрации и оценке роста и развития растений (отдельных его частей) на разных по составу питательных средах и различных стадиях развития, выращиваемых в условиях *in vitro* (в пробирке).

Для процесса объективной фиксации, параметров роста растения был собран прототип установки, разработаны два метода по выделению и расчету необходимых параметров растения. Приведен сравнительный анализ каждого метода, описаны его преимущества и недостатки.

Следующими шагами для развития данной исследовательской работы будет накопление записей в базе данных о параметрах разных растений, разработка системы поддержки принятия решений по управлению выращиванием растений в условиях *in vitro*, интеграция разработанного комплекса на реальные предприятия.

Список литературы

1. Smith, R.H. (2013), Plant tissue culture: techniques and experiments, Academic Press, Texas, TX.
2. Reekie, E. and Bazzaz, F.A. (2011), Reproductive allocation in plants. Academic Press, San Diego, SA.
3. Gibbs, J., Pound, M.P., Wells, D.M., Murchie, E.H., French, A.P., and Pridmore, T.P. (2014), Three-dimensional reconstruction of plant shoots from multiple images using an active vision system, *Plant Physiology*, 166 (4), 1688–1698.
4. Kumar, P., Connor, J. and Mikiavcic, S. (2014), High-throughput 3D reconstruction of plant shoots for phenotyping, *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, 211-216.
5. Pound, M.P., French, A.P., Murchie, E. H., and Pridmore, T.P. (2014), Automated recovery of 3D models of plant shoots from multiple colour images, *Plant Physiology*, 114.
6. Güneş E.O. and Aygün S. (2017), Growth monitoring of plants using active contour technique, *6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax, USA, 1-5.
7. Gai, J. (2016), “Plants detection, localization and discrimination using 3D machine vision for robotic intra-row weed control”, Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
8. Krainin, M., Henry, P., Ren X., and Fox, D. (2010), Manipulator and object tracking for in hand model acquisition., *IEEE International Conference on Robots and Automation In Proceedings*, Funchal, Portugal.
9. Gehan, M., Fahlgren, N. (2018), “Summary of Output Measurements” [Online], available at: https://plantcv.readthedocs.io/en/latest/output_measurements/ (Accessed 23.06.2019)
10. Zhang, T.Y. and Suen, C.Y. (1984), A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM*, 27(3).
11. Lee, T.C., Kashyap, R. L. and Chu C.N. (1994), Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 56(6), 462-478.
12. Abu-Ain, W., Abdullah, S.N., Bataineh, B., Abu-Ain, T. and Omar, K. (2013), Skeletonization algorithm for binary images, *Procedia Technology*, 11, 704-709.
13. Furukawa, Y. and Hernández, C. (2015), Multi-view stereo: A tutorial. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, now Publishers Inc., Hanover, MA.
14. Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010), Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, Minnesota, 32(8), 1362-1376.
15. Torok, M.M. (2012), “Autonomous sample collection using image-based 3d reconstructions”, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
16. Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler, S. J. and McMillan, L. (2000), Image-based visual hulls, *27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, 369-374.
17. Laurentini, A. (1994), The visual hull concept for silhouette-based image understanding, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16(2), 150-162.
18. Slabaugh, G., Schafer, R., Malzbender, T. and Culbertson, B. (2001), A survey of methods for volumetric scene reconstruction from photographs, *In Volume Graphics 2001*, Springer, Vienna.
19. Vogiatzis, G., Esteban, C.H., Torr, P.H. and Cipolla, R. (2007), Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12), 2241-2246.
20. Gupta, P. (2007), “Gray code composite pattern structured light illumination”, Ph.D. Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
21. Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R. (2007), Coded structured Light, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007*, Minneapolis, MN, 1-8
22. Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y., (2008), Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008*, Anchorage, Alaska, 1-8.
23. Li, B., Heng, L., Koser, K. and Pollefeys, M. (2013), A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1301-1307.
24. Vogiatzis, G. and Hernández, C. (2010), “Automatic camera pose estimation from dot pattern” [Online], available at: <http://george-vogiatzis.org/calib/> (Accessed 23.06.2019)

25. Tagliasacchi, A., Zhang, H. and Cohen-Or, D. (2009), Curve skeleton extraction from incomplete point cloud, *In ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3), 71.

References

1. Smith, R.H. (2013), *Plant tissue culture: techniques and experiments*, Academic Press, Texas, TX.
2. Reekie, E. and Bazzaz, F.A. (2011), *Reproductive allocation in plants*. Academic Press, San Diego, SA.
3. Gibbs, J., Pound, M.P., Wells, D.M., Murchie, E.H., French, A.P., and Pridmore, T.P. (2014), Three-dimensional reconstruction of plant shoots from multiple images using an active vision system, *Plant Physiology*, 166 (4), 1688–1698.
4. Kumar, P., Connor, J. and Mikiavcic, S. (2014), High-throughput 3D reconstruction of plant shoots for phenotyping, *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*, Singapore, 211-216.
5. Pound, M.P., French, A.P., Murchie, E. H., and Pridmore, T.P. (2014), Automated recovery of 3D models of plant shoots from multiple colour images, *Plant Physiology*, 114.
6. Güneş E.O. and Aygün S. (2017), Growth monitoring of plants using active contour technique, *6th International Conference on Agro-Geoinformatics*, Fairfax, USA, 1-5.
7. Gai, J. (2016), “Plants detection, localization and discrimination using 3D machine vision for robotic intra-row weed control”, Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
8. Krainin, M., Henry, P., Ren X., and Fox, D. (2010), Manipulator and object tracking for in hand model acquisition., *IEEE International Conference on Robots and Automation In Proceedings*, Funchal, Portugal.
9. Gehan, M., Fahlgren, N. (2018), “Summary of Output Measurements” [Online], available at: https://plantcv.readthedocs.io/en/latest/output_measurements/ (Accessed 23.06.2019)
10. Zhang, T.Y. and Suen, C.Y. (1984), A fast parallel algorithm for thinning digital patterns, *Communications of the ACM*, 27(3).
11. Lee, T.C., Kashyap, R. L. and Chu C.N. (1994), Building skeleton models via 3-D medial surface/axis thinning algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 56(6), 462-478.
12. Abu-Ain, W., Abdullah, S.N., Bataineh, B., Abu-Ain, T. and Omar, K. (2013), Skeletonization algorithm for binary images, *Procedia Technology*, 11, 704-709.
13. Furukawa, Y. and Hernández, C. (2015), Multi-view stereo: A tutorial. Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision, now Publishers Inc., Hanover, MA.
14. Furukawa, Y. and Ponce, J. (2010), Accurate, dense, and robust multiview stereopsis, *2007 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, Minnesota, 32(8), 1362-1376.
15. Torok, M.M. (2012), “Autonomous sample collection using image-based 3d reconstructions”, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
16. Matusik, W., Buehler, C., Raskar, R., Gortler, S. J. and McMillan, L. (2000), Image-based visual hulls, *27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, New York, NY, 369-374.
17. Laurentini, A. (1994), The visual hull concept for silhouette-based image understanding, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 16(2), 150-162.
18. Slabaugh, G., Schafer, R., Malzbender, T. and Culbertson, B. (2001), A survey of methods for volumetric scene reconstruction from photographs, *In Volume Graphics 2001*, Springer, Vienna.
19. Vogiatzis, G., Esteban, C.H., Torr, P.H. and Cipolla, R. (2007), Multiview stereo via volumetric graph-cuts and occlusion robust photo-consistency, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 29(12), 2241-2246.
20. Gupta, P. (2007), “Gray code composite pattern structured light illumination”, Ph.D. Thesis, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
21. Young, M., Beeson, E., Davis, J., Rusinkiewicz, S. and Ramamoorthi, R. (2007), Coded structured Light, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007*, Minneapolis, MN, 1-8
22. Kawasaki, H., Furukawa, R., Sagawa, R. and Yagi, Y., (2008), Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008*, Anchorage, Alaska, 1-8.
23. Li, B., Heng, L., Koser, K. and Pollefeys, M. (2013), A multiple-camera system calibration toolbox using a feature descriptor-based calibration pattern, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Tokyo, Japan, 1301-1307.

24. Vogiatzis, G. and Hernández, C. (2010), “Automatic camera pose estimation from dot pattern” [Online], available at: <http://george-vogiatzis.org/calib/> (Accessed 23.06.2019)

25. Tagliasacchi, A., Zhang, H. and Cohen-Or, D. (2009), Curve skeleton extraction from incomplete point cloud, *In ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 28(3), 71.

Маслаков Юрий Николаевич, директор, ООО «ИНВИТРО ВИЖН»

Бережной Владислав Александрович, аспирант кафедры информационных и робототехнических систем Института инженерных и цифровых технологий

Иващук Ольга Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и робототехнических систем Института инженерных и цифровых технологий

Яценко Владимир Михайлович, инженер, ООО «ИНВИТРО ВИЖН»

Maslakov Yuriy Nikolayevich, LLC "INVITRO VISION"

Berezhnoy Vladislav Alexandrovich, postgraduate student of Department of Information and Robotics Systems at Institute of Engineering and Digital Technologies

Ivashchuk Olga Alexandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information and Robotics Systems at Institute of Engineering and Digital Technologies

Yatsenko Vladimir Mikhaylovich, Engineer, LLC "INVITRO VISION"