

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>

УДК 630 : 004.93'14



Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветowych моделей YCbCr и L*a*b*

Дмитрий И. Рогачев ✉, rogachevdi@bmstu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>

Иван В. Козлов, kozloviv@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7143-0006>

Владислав Е. Клубничкин, vkclubnichkin@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, 141005, Российская Федерация

Облака точек широко используются при наземном сканировании леса с помощью LiDAR и стереокамеры. Облака точек часто страдают от шума – выбросов и артефактов, искажающих данные. Аппаратно точность и качество исходного облака точек при наземном сканировании участка леса может быть повышена с помощью использования сканеров с более высоким расширением, а также с помощью фотограмметрии или дополнительных датчиков. Для устранения шума могут использоваться программные способы: фильтрация точек, сглаживание, статистические методы и алгоритмы реконструкции. Новый подход к фильтрации шумов сканируемого участка леса основан на анализе значений цветowych компонент в пространствах YCbCr и L*a*b*. Исследовали свойства цветowych моделей YCbCr и L*a*b* и определили пороговые значения для классификации точек как шумовых или объектных в зависимости от их расстояния до центроидов. Применение комбинированного (YCbCr | L*a*b*) фильтра на облаке точек сократило количество точек до 38963 (17,41% от исходного количества). При проведении калибровки камеры и LiDAR на основании (YCbCr | L*a*b*) фильтра общее среднее значение ошибок перевода составило 0,0247 м, вращения 6,244 град, перепроецирования 8,385 пикселей. Способ (YCbCr | L*a*b*) фильтрации показывает высокую точность и надежность в удалении шумов и сохранении целостности объектов в облаке точек, что позволит в последующем использовать полученные данные на беспилотных машинах при выполнении лесозаготовительных операций.

Ключевые слова: *облако точек, LiDAR, наземное сканирование леса, фильтрация шумов, обработка облака точек, цифровая модель леса, Livox MID70, YCbCr, L*a*b**

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рогачев Д. И. Фильтрация шумов сканируемого LiDAR участка леса на основе цветowych моделей YCbCr и L*a*b* / Д. И. Рогачев, И. В. Козлов, В. Е. Клубничкин // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 125–139. – *Библиогр.: с. 135–139 (28 назв.)*. – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>.

Поступила 07.09.2023. Пересмотрена 28.11.2023. Принята 29.11.2023. Опубликовано онлайн 29.12.2023.

Article

Noise filtering of the forest site scanned by LiDAR based on YCbCr and L*a*b* color models

Dmitry I. Rogachev ✉, rogachevdi@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0002-7807-5294>

Ivan V. Kozlov, kozloviv@bmstu.ru  <https://orcid.org/0000-0001-7143-0006>

Vladislav E. Klubnichkin, vklubnichkin@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-1231-8185>

Mytishi branch Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, 141005, Russian Federation

Abstract

Point clouds are widely used in ground-based forest scanning using LiDAR and stereo cameras. Point clouds often suffer from noise outliers and artifacts that distort data. Hardware accuracy and quality of the initial point cloud during ground scanning of a forest area can be improved by using scanners with higher expansion, as well as using photogrammetry or additional sensors. To eliminate noise, software methods can be used: point filtering, smoothing, statistical methods and reconstruction algorithms. A new approach to filtering the noise of the scanned forest area is based on the analysis of the values of the color components in the YCbCr- and L*a*b- spaces. The properties of the YCbCr- and L*a*b-color models were investigated and threshold values for classifying points as noise or object depending on their distance to the centroids were determined. The use of a combined (YCbCr | L*a*b) filter on the point cloud reduced the number of points to 38 963 (17.41% of the original number). When calibrating the camera and LiDAR based on the (YCbCr | L*a*b) filter, the total average value of translation errors was 0.0247 m, rotation 6,244 degrees, reprojection 8,385 pixels. The noise-filtering method (YCbCr | L*a*b) shows high accuracy and reliability in removing noise and maintaining the integrity of objects in the point cloud, which will allow the data obtained on unmanned machines to be used later when performing logging operations.

Keywords: *point cloud, LiDAR, ground scanning of the forest, noise filtering, point cloud processing, digital model of the forest, Livox MID70, YCbCr, L*a*b**

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Rogachev D.I., Kozlov I.V., Klubnichkin V.E. (2023). Noise filtering of the forest site scanned by LiDAR based on YCbCr and L*a*b* color models. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1, pp. 125-139 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/8>.

Received 07.09.2023. *Revised* 28.11.2023. *Accepted* 29.11.2023. *Published online* 29.12.2023.

Введение

Одним из наиболее распространенных применений LiDAR в лесном хозяйстве является мониторинг состояния лесов. С помощью этой технологии можно отслеживать площадь лесного участка, его высоту над уровнем моря, форму и размеры деревьев, а также их возраст и состояние [1].

Облако точек представляет собой набор трехмерных координатных данных, полученных с помощью различных датчиков, таких как лазерное сканирование (LiDAR) и стереокамеры. Они являются важным источником информации в области компьютерного зрения, автономного вождения, аэрокосмической техники и других отраслях, где трехмерная информация играет

ключевую роль [2]. На рис. 1 представлен фрагмент облака точек, полученных при наземном сканировании во время проведения лесозаготовительных операций валочно-сучкорезно-раскряжевочной и погрузочно-транспортной машиной.

О возможности определения параметров растущего дерева представленными выше способами описывается в научных публикациях Kuželka K. [3], Raul de Paula Pires [4], Yupan Zhang [5], Mingrui Dai [6], Krassnitzer [7], Gollob [8], Liang [9], Покоева М.В [10], Демидов Д. Н. [11], Кабонен А. В. [12], Низаметдинов Н.Ф. [13]. В некоторых работах отображено определение диаметра поперечного сечения ствола дерева за счет аппроксимации точек. Стоит отметить, что облако точек, получаемое при наземном сканировании леса, может содержать большое количество шума, несущественных или дублирующихся точек, которые могут затруднять выполнение анализа объектов, искажая их.

Для исключения шума применяются методы, основанные на RANSAC [14, 15], суть методов заключается в выделении точек, относящихся к контуру описанному целевой функции, вследствие этого при большем количестве точек относящихся к шуму возможно повышение вероятности

результатов и в некоторых случаях неоправданно большому числу итераций [16].

В качестве шума при наземном сканировании леса выступают точки, относящиеся к листве (рис. 2), вследствие этого возникает потребность дополнительной фильтрации для выделения массива точек, относящихся к стволам дерева.



Рисунок 2. Подлесок

Источник: собственная композиция авторов

Figure 2. Undergrowth

Source: author's composition

Цель исследования – повышение качества снижения шума в облаке точек при LiDAR наземном сканировании леса путем удаления точек, относящихся к листве, с помощью $(YCbCr | L^*a^*b)$ фильтрации.

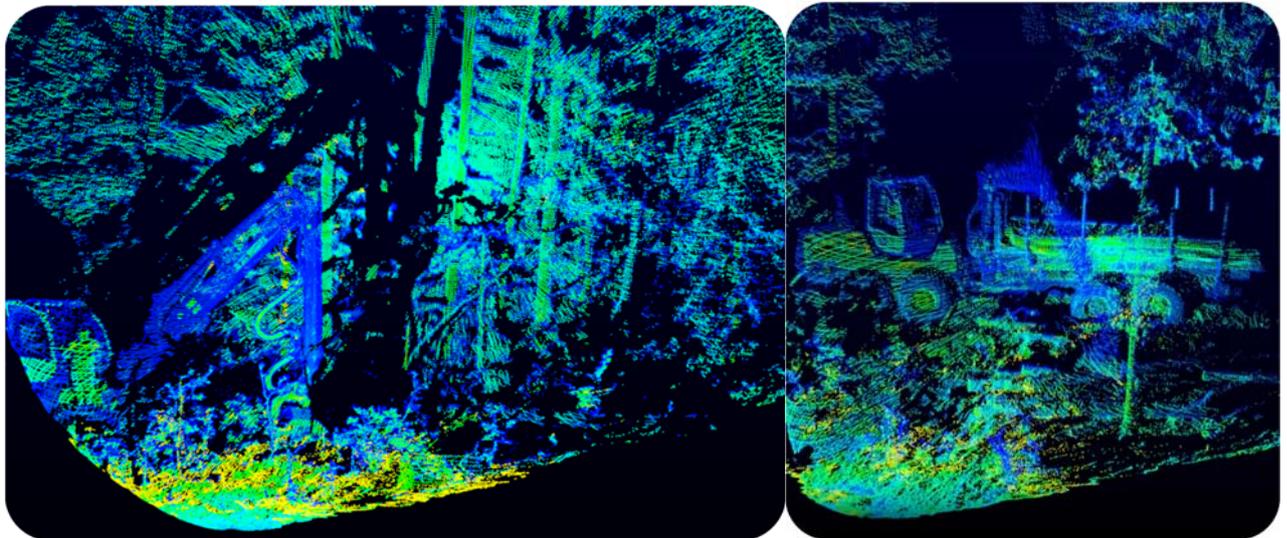


Рисунок 1. Облако точек при наземном сканировании во время проведения лесозаготовительных операций

Источник: собственная композиция авторов

Figure 1. Point cloud during ground scanning during logging operations

Source: author's composition

Материалы и методы

Предмет и объект исследований

Объектом исследования в рамках данной работы является RGB-изображение или LiDAR-облако точек участка леса.

Предмет исследований – процедура программной фильтрации изображения или облака точек на основе комбинированного использования цветowych моделей YCbCr и L^*a^*b .

Сбор данных

При сборе данных применяли лазерный сканер LIVOX MID-70 и экшн-камеру GoPro HD HERO3 Edition (рис. 3).



Рисунок 3. Процесс калибровки

Источник: собственная композиция авторов

Figure 3. Calibration process

Source: authors' own calculations

Последовательность работ при сборе данных:

- 1) Калибровка камеры для учета дисторсии;
- 2) Калибровка лазерного сканера и камеры;
- 3) Сбор данных.

Среди многочисленных типов методов объединения данных датчиков, комбинация LiDAR и камеры является одной из наиболее часто используемых пар датчиков для восприятия окружающей среды. LiDAR могут предоставлять данные облака трехмерных точек, которые включают точную информацию о глубине и интенсивности отражения, в то время как камеры фиксируют богатую семантическую информацию о

сцене. Комбинация камеры и LiDAR позволяет устранить недостатки каждого датчика [17, 18]. Основная проблема при объединении этих двух разнородных датчиков состоит в том, чтобы найти точные внутренние параметры камеры и преобразование твердого тела между системами координат датчика путем выполнения внешней калибровки [19].

С ростом использования компьютерного зрения в различных областях, таких как автоматическое вождение, робототехника, медицинская обработка изображений и визуальные эффекты, становится все более важным понимать и учитывать дисторсию. Дисторсия – это искажение или изменение формы объектов, возникающее при передаче или обработке сигналов или изображений. Она может возникать из-за различных факторов, таких как оптические аберрации, физические искажения, нелинейности и другие воздействия на сигнал или изображение [20].

Причины дисторсии:

– Оптическая дисторсия: объективы камер имеют определенные оптические аберрации, которые могут приводить к искажению изображений. Примеры оптической дисторсии включают радиальную дисторсию (искажение круговых форм) и тангенциальную дисторсию (искажение прямых линий).

– Геометрическая дисторсия: это искажение, которое возникает, когда источник или объект находятся вне плоскости изображения, что приводит к искажению и неправильному представлению геометрии объектов на изображении.

Виды дисторсии (рис. 4):

– Радиальная дисторсия. Это тип дисторсии, который приводит к искажению изображения в форме радиуса относительно оптического центра. Радиальная дисторсия может быть плюсовой (вогнутость) или минусовой (выпуклость) в зависимости от характера искажения.

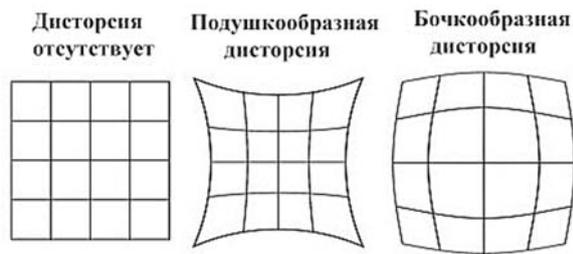


Рисунок 4. Дисторсия

Источник: режим доступа:

<http://sainfo.ru/optika/img/t30.gif>

Figure 4. Distortion

Source: URL: <http://sainfo.ru/optika/img/t30.gif>

– Тангенциальная дисторсия. Это тип дисторсии возникает из-за не параллельности оптической оси камеры и плоскости изображения. Она приводит к наклону линий на изображении.

– Плоскостная дисторсия. Это тип дисторсии, который возникает из-за не гомогенности объектива или неправильной конструкции оптической системы. Она может приводить к искажению формы или размера объектов на изображении.

– Фокусирующая дисторсия. Этот тип дисторсии проявляется в изменении фокусного расстояния объектива по мере движения зума. Она может приводить к изменению масштаба объектов на изображении.

В зависимости от сложности оптической системы и характеристик объектива, могут возникать и другие виды дисторсии. Коррекция дисторсии включает в себя оценку параметров дисторсии и применение математических моделей для обработки изображений и восстановления правильной формы, пропорций и линий.

Калибровка камеры осуществлялась на базе 8 фотографий мишени в виде шахматной доски с размером клетки 80 мм [21].

Средняя ошибка повторного проецирования (reprojection error) (рис. 5.а) для каждого изображения является метрикой, которая используется для оценки точности калибровки

камеры или точности реконструкции трехмерной сцены.

Суть средней ошибки повторного проецирования заключается в сравнении исходных координат точек на изображении с их проекциями на плоскость изображения после калибровки или реконструкции. Метрика измеряется в пикселях и представляет собой среднее расстояние между исходными и проекционными точками для всех точек на изображении.

Чем меньше средняя ошибка повторного проецирования, тем более точная калибровка или реконструкция. Она является показателем того, насколько точно камера может сопоставить трехмерные точки с их проекцией на изображение.

Для калибровки лазерного сканера и web-камеры использовалось 15 сцен (облака точек и фотоизображение).

Ошибка перевода (рис. 5.б) – разница между координатами центра плоскостей шахматной доски в облаках точек и координатами на соответствующих изображениях в метрах.

Ошибка поворота (рис. 5.в) – разница между нормальными углами, определенными плоскостями шахматной доски в облаках точек, и углами на соответствующих изображениях в радианах.

Ошибка пере-проецирования (рис. 5.г) – разница между спроецированными (преобразованными) координатами центра плоскостей шахматной доски из облаков точек и координатами на соответствующих изображениях в пикселях.

Результат калибровки представлен на рисунке 6.

При проведении калибровки камеры на базе 8 фотографий мишени общая средняя ошибка составила 0,24 пикселя. При проведении калибровки камеры и лазерного сканера LIDAR общее среднее значение ошибки: перевода составило 0,0247 м; вращения 6,244 град; пере-проецирования 8,385 пиксель.

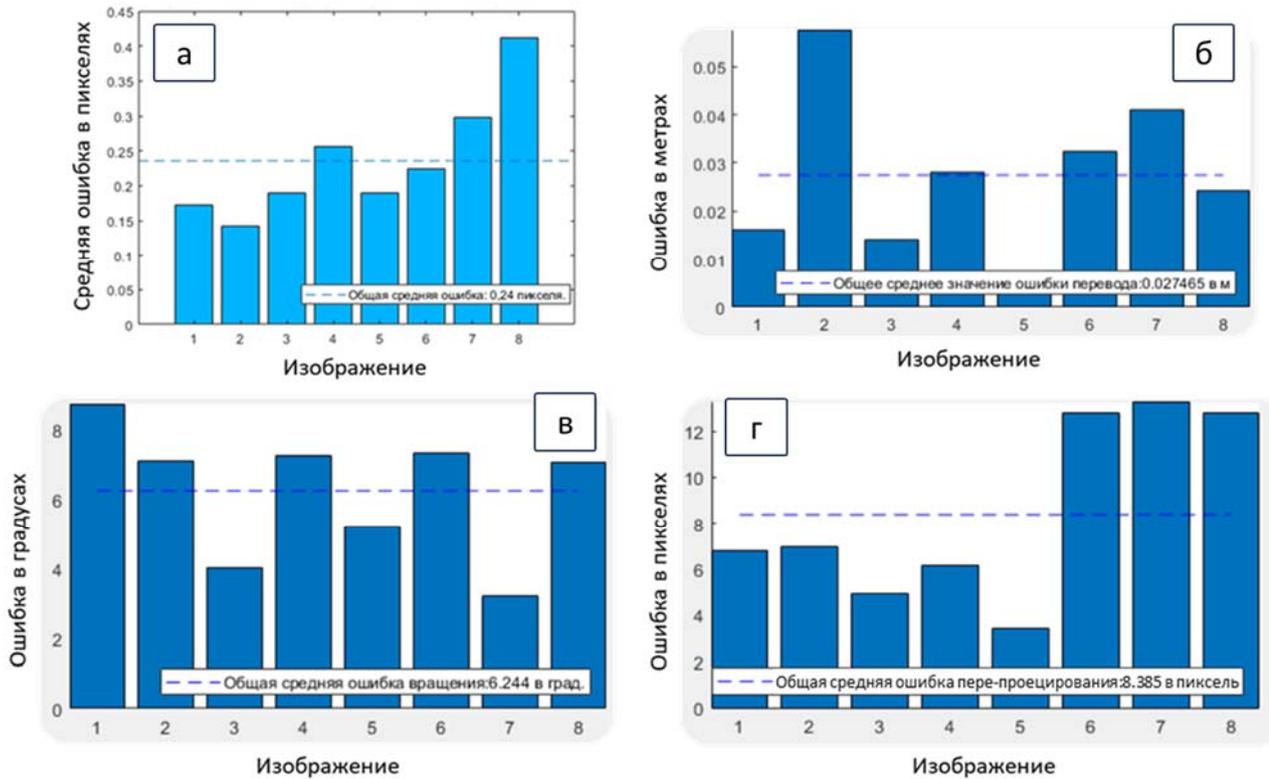


Рисунок 5. Метрики характеризующие точность калибровки оборудования а) Средняя ошибка пере-проецирования на изображение; б) Ошибка перевода; в) Ошибка поворота; г) Ошибка пере-проецирования
 Источник: собственные результаты авторов

Figure 5. Metrics characterizing the accuracy of calibration of equipment а) Average reprojection error on the image; б) Translation error; в) Rotation error; г) Reprojection error
 Source: authors' own results



Рисунок 6. Результат калибровки
 Источник: собственная композиция авторов

Figure 6. Calibration result
 Source: authors' own calculations

Анализ данных

Исходными данными для анализа является массив точек с значением цвета по цветовой модели RGB

$$points = \begin{pmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & R_1 & G_1 & B_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & R_n & G_n & B_n \end{pmatrix},$$

где $[X, Y, Z]$ – координаты в декартовой системе координат, $[R, G, B]$ – значения цветового канала RGB

RGB (Red, Green, Blue), CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (Lightness, a , b – далее $L^*a^*b^*$), YCbCr (Luma, Chrominance Blue, Chrominance Red) – это три различных цветовых моделей, используемые для представления цвета в компьютерной графике, обработке изображений и других областях. Вот некоторые основные различия между ними:

А) Цветовые представления:

– В модели RGB цвет представлен с помощью комбинации трех основных цветов: красного (Red), зеленого (Green) и синего (Blue) (рис. 7). Каждый цветовой канал представляет интенсивность

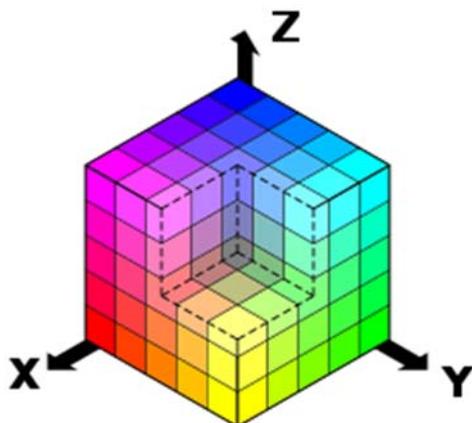


Рисунок 7. RGB-цветовая модель, представленная в виде куба

Источник: Режим доступа:

<https://novainfo.ru/res/re38y1mgzr.webp>Figure

7. RGB color model represented as a cube

Source: URL: <https://novainfo.ru/res/re38y1mgzr.webp>

соответствующего основного цвета и принимает значения от 0 до 255. Комбинация этих трех основных цветов в различных пропорциях создает весь цветовой спектр.

– В модели $L^*a^*b^*$ цвет представлен тремя компонентами: светлотой (Lightness), компонентой a и компонентой b (рис. 8). Светлота указывает на яркость цвета и изменяется от 0 до 100. Компоненты a и b представляют цветовые отклонения от нейтрального серого цвета: компонента a представляет диапазон от зеленого (-128) до красного (+127), а компонента b представляет диапазон от синего (-128) до желтого (+127) [22, 23].

– Модель YCbCr состоит из трех компонентов: яркости (Luma) и двух цветовых разностей – синей (Chrominance Blue) и красной (Chrominance Red) (рис. 9). Компонент яркости представляет освещенность пикселя и обычно отображается от 0 до 255. Компоненты цветовых разностей отражают цветовые отклонения от серого и имеют диапазон значений от -128 до +127.

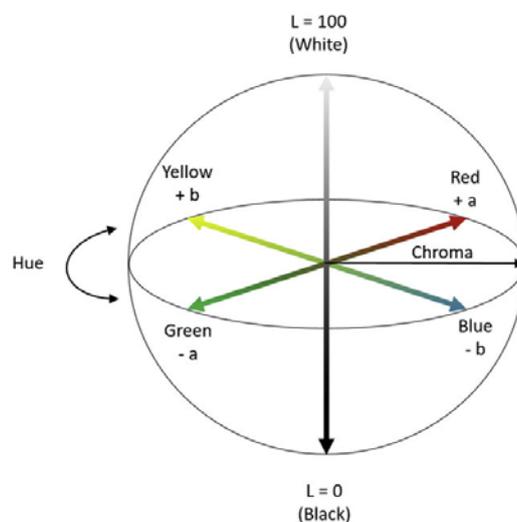


Рисунок 8. $L^*a^*b^*$ -цветовая модель

Источник: из статьи [22]

Figure 8. $L^*a^*b^*$ -color model

Source: from the article [22]

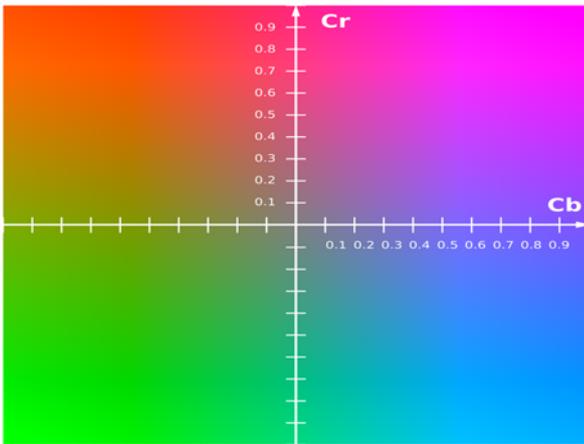


Рисунок 9. Плоскость CbCr при постоянной яркости $Y'=0.5$

Источник: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png/1024px-YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png

Figure 9. CbCr plane at constant brightness $Y'=0.5$

Source: URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/34/YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png/1024px-YCbCr-CbCr_Scaled_Y50.png

Б) Восприятие цвета:

– Модель RGB основана на аддитивной смеси трех основных цветов и нацелена на отображение цвета на устройствах с подсветкой, таких как мониторы, телевизоры, светодиоды. Восприятие цвета в модели RGB связано с эмиссией света и реагирует на изменение интенсивности основных цветов.

– Модель $L^*a^*b^*$ ориентирована на более естественное и полное представление восприятия цвета человеком. Она базируется на цветовом пространстве CIE XYZ, которое моделирует отображение цвета так, как его воспринимает человек. Модель $L^*a^*b^*$ позволяет объективно описывать цвета, включая яркость, насыщенность и оттенок, и является универсальной моделью для международной коммуникации цвета.

– Модель YCbCr представляет цвет, учитывая освещенность и цветовые разности. Она хорошо подходит для компрессии цвета, поскольку позволяет более эффективно кодировать яркость и цветовую информацию по отдельности. Модель YCbCr также широко используется в видео кодировании, а также в системах передачи изображений и видео.

В) Применение и преимущества:

– Модель RGB широко используется в обработке изображений, компьютерной графике и видео технологиях, особенно при работе с отображением цвета на устройствах с подсветкой. Она позволяет легко выполнить цветовые преобразования, наложение цветных фильтров и манипуляции с основными цветами.

– Модель $L^*a^*b^*$ находит применение в областях, связанных с цветовой коррекцией, сопоставлением цветов, распознаванием образов и других задачах, где требуется более точное и согласованное описание цвета. Модель $L^*a^*b^*$ обеспечивает большую гибкость и точность в работе с цветом, позволяет легко выполнить изменения яркости, насыщенности и оттенка, а также обеспечивает более согласованное и непрерывное восприятие цвета визуально.

– Модель YCbCr хорошо подходит для компрессии и передачи видеозображений, так как может отдельно кодировать яркость и цветовую информацию. Она позволяет более эффективное использование пропускной способности и снижение размера файлов для хранения видеоданных.

Для конвертации RGB в $L^*a^*b^*$, переведем RGB в CIE XYZ, а потом в $L^*a^*b^*$.

Матрица перевода:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,49 & 0,31 & 0,2 \\ 0,176 & 0,81 & 0,01 \\ 0 & 0,01 & 0,99 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}.$$

Для конвертации примем следующие значения, где X_n, Y_n, Z_n – координаты точки белого в значении CIE XYZ (буква n означает «нереализованность») [24]:

$$\begin{cases} L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \\ a^* = 500 \cdot \left(\left(\frac{X}{X_n}\right) - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right), \\ b^* = 200 \cdot \left(\left(\frac{X}{X_n}\right) - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right). \end{cases}$$

Конвертация RGB в YCbCr:

$$\begin{cases} Y' = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \\ C_B = 128 - 0,168 \cdot R - 0,331 \cdot G + 0,5 \cdot B, \\ C_R = 128 + 0,5 \cdot R - 0,418 \cdot G - 0,081 \cdot B. \end{cases}$$

Результаты

Для фильтрации точек воспользуемся двумя цветовыми моделями. Использование ограничений

по цветовой модели $L^*a^*b^*$ обуславливается возможностью адекватной фильтрации зеленого цвета. Ограничения по каналу a – влияют на зеленый цвет, а по каналу b – на оранжевый цвет.

Ограничения по $L^*a^*b^*$

$$\begin{cases} L \in [0; 100], \\ a \in [-5; 35], \\ b \in [-50; 40]. \end{cases}$$

В свою очередь, необходимость дополнительных ограничений по цветовой модели $YCbCr$ обуславливается задачей фильтрации листвы в осенний период, когда листья могут быть одного цвета с корой верхней части ствола сосны обыкновенной. Для отсеивания ярко оранжевого цвета используется ограничение по каналу C_b

Ограничения по $YCbCr$:

$$\begin{cases} Y \in [16; 235], \\ C_b \in [105; 240], \\ C_r \in [16; 240]. \end{cases}$$

На рисунке 10 представлена работа фильтра на изображениях. Красным цветом отображена работа фильтра по $L^*a^*b^*$, фиолетовый цвет по $YCbCr$ и синий цвет точки совпадающие по двум фильтрам. На рис. 11 представлена работа фильтра на облаке точек.

На рис. 11 (а) представлен результат сканирования участка леса с применением технологии SLAM [25,26]. Изначальное количество точек в облаке точек представленного на рис. 11 (а) составляет 223758 в результате работы фильтра (рис. 11 (б)) количество точек уменьшилось до 38963, что составляет 17,41% от исходного количества точек.

Обсуждение

В результате работы фильтра могут оставаться одиночные или групповые наборы точек, отдаленные от основного облака пикселей, которые оказывают малое влияние на зашумление объекта сканирования. Фильтрацию данных точек логично реализовать на основе значения среднего расстояния до соседних точек.

Данный фильтр рассматривается как одна из составляющих частей элементов машинного зрения беспилотной лесозаготовительной машины. Вследствие этого стоит отметить важные факторы для стабильной работы фильтра в перспективе:

- 1) качественная калибровка Lidar и камеры;
- 2) количество мегапикселей камеры;
- 3) глубина цвета;
- 4) в ночное время освещённость области вокруг лесозаготовительной машины.

Стоит отметить принципиальное различие в предлагаемом фильтре в сравнении с другими методами фильтрации шумов. Метод RANSAC (Random Sample Consensus) – это статистический метод, который используется для оценки параметров математических моделей из набора наблюдений, в контексте фильтра точек используется для выделения геометрических примитивов описанных математической функции пример в работе Singh A [15]. В контексте определения параметров окружности (радиус и центр) работа метода RANSAC включает в себя: 1) случайная выборка некоторого количества точек из массива точек; 2) определение параметров окружности; 3) расчет отклонений остальных точек от окружности, параметры которой определены на шаге 2; 4) повторяются первые три шага многократно, чтобы найти окружность с наибольшим количеством отклонений. Проанализировав работу фильтра, можно сказать, что основное отличие при использовании фильтра, основанного на цветовой модели, заключается в отсутствии привязки к геометрическим формам сканируемых объектов.

Фильтр предлагаемый в работе автора Ren Yujuan [27] основан на методе главных компонент (PCA). Метод главных компонент (PCA) часто используется для анализа и извлечения основных характеристик многомерных данных, таких как облака точек, путем выделения главных компонент, которые наилучшим образом описывают изменчивость данных. Это помогает сжать информацию и выделить ключевые аспекты данных, такие как форма и ориентация объектов. Поэтому фильтр точек LiDAR на основе PCA может помочь в выделении основных структур облака точек. Таким образом, можно сказать, что PCA фокусируется на пространственной структуре данных облака точек, в то время как фильтр точек на основе цвета сфокусирован на использовании информации о цвете для обработки и анализа.

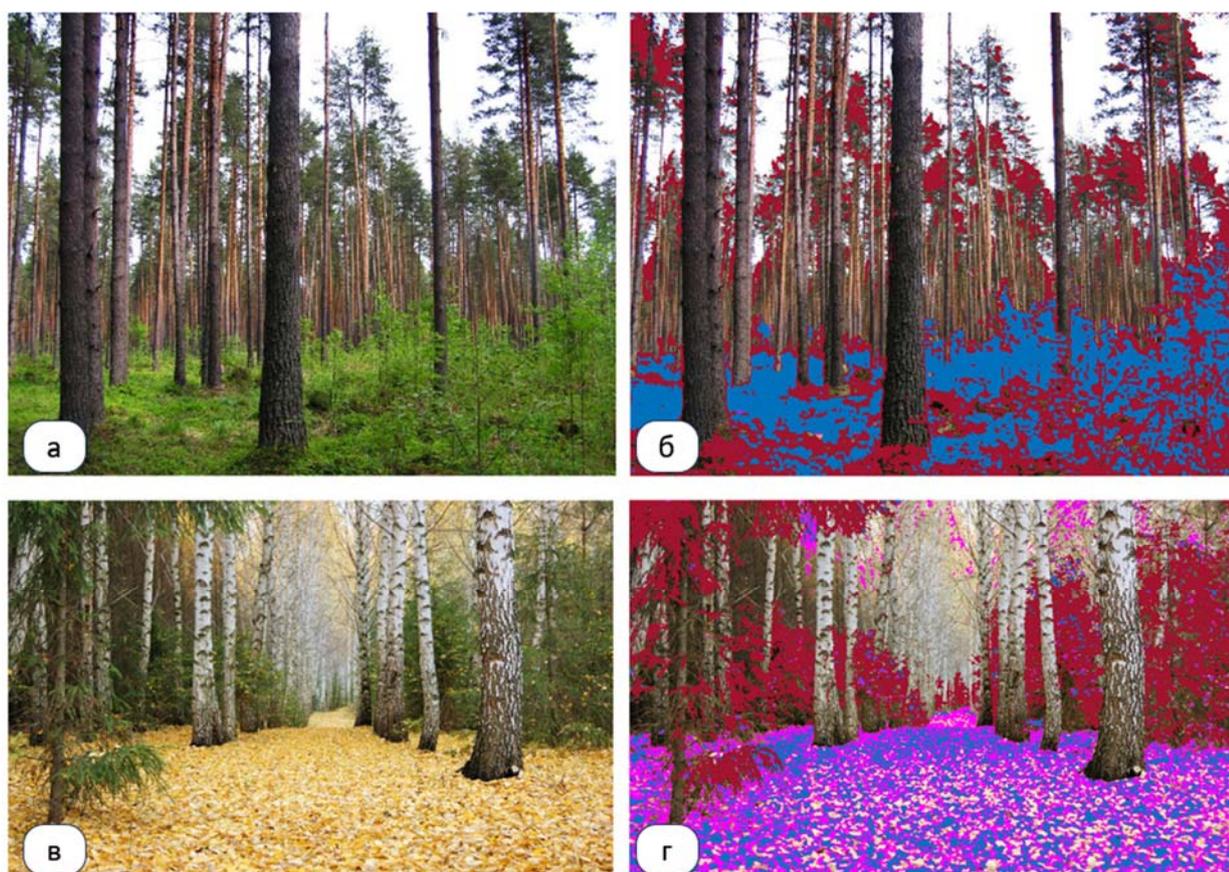


Рисунок 10. Работа фильтра на изображениях. а) изображение соснового древостоя; б) результат работы фильтра на изображении соснового древостоя; в) изображение аллеи; г) результат работы фильтра на изображении аллеи.

Источник: собственные результаты авторов

Figure 10. Filter operation on images. a) the image of a pine stand; b) the result of the filter on the image of a pine stand; c) the image of an alley; d) the result of the filter on the image of an alley.

Source: own results

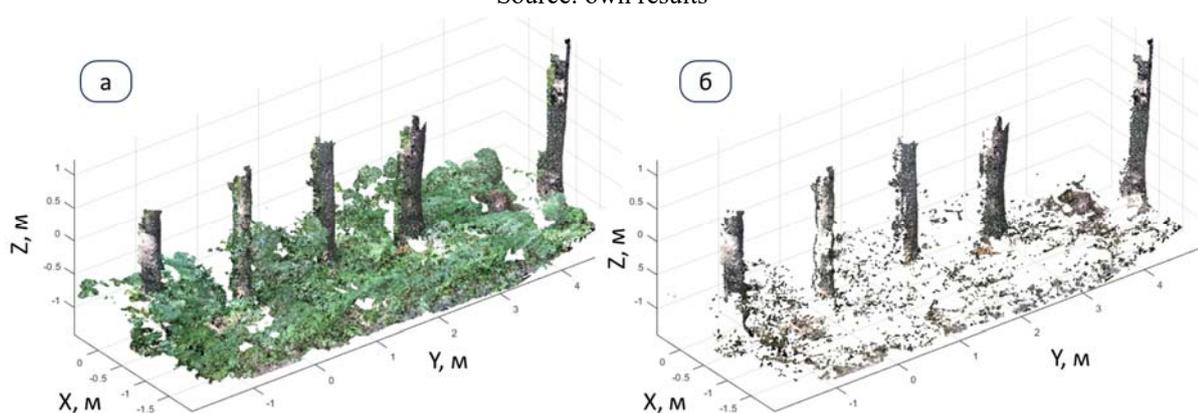


Рисунок 11. Работа фильтра на облаке точек: а) исходное облако точек; б) облако точек, полученное в результате обработки фильтром

Источник: собственные результаты авторов

Figure 11. Operation of the filter on the point cloud. a) the initial point cloud; b) the point cloud obtained as a result of filter processing

Source: own results

Фильтр, предлагаемый в работе автора Ren Yujuan [28], основан на методе k-средних (k-means). k-means – это алгоритм кластеризации, который разбивает набор данных на заранее определенное количество кластеров. Каждый кластер представляет собой группу точек, которые имеют схожие характеристики. Таким образом, работа фильтра точек, основанного на методе k-means, выглядит следующим образом: 1) инициализация центроидов, выбираются случайные точки в качестве начальных центроидов кластеров; 2) присваивание точек кластерам, каждая точка данных присваивается к ближайшему центроиду; 3) пересчет центроидов, после этого центроиды пересчитываются как среднее значение всех точек, отнесенных к соответствующему кластеру; 4) шаги 2 и 3 повторяются до тех пор, пока центроиды не стабилизируются или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций. Для правильной работы алгоритма требуется знание числа кластеров заранее. В реальном мире это часто является проблемой, так как количество кластеров может меняться или быть неизвестным. Так же возникает потребность в реализации математической функции дистанции с помощью которой будут определяться центроиды. В случае неправильно выбранной функции возможно ошибочное разбиение точек относящихся к одному объекту на разные кластеры. Также важным фактором является реализация оценки кластеров на принадлежность их к шуму.

Заключение

Для устранения шума при наземном сканировании леса могут использоваться различные методы обработки данных, такие как фильтрация

точек, сглаживание, статистические методы и алгоритмы реконструкции. Однако, важно учитывать, что полная очистка шума в неконтролируемых условиях, таких как лес, может быть сложной задачей. Точность и качество исходного облака точек при проведении работ под пологом леса может быть повышена с помощью использования сканеров с более высоким расширением, а также с использованием дополнительных информационных источников, таких как фотограмметрия или дополнительные датчики.

При проведении калибровки камеры на базе 8 фотографий мишени общая средняя ошибка составила 0,24 пикселя. При проведении калибровки камеры и лазерного сканера LIDAR общее среднее значение ошибки: перевода составило 0,0247 м; вращения 6,244 град; пере-проецирования 8,385 пиксель.

Разработанный фильтр позволяет в некоторых сценах сканированного участка леса снизить количество точек в пять раз. В рассмотренном случае с 223758 до 38963, что составило 17,41% от исходного количества точек.

В целом, фильтр облака точек, основанный на цветовых моделях YCbCr и L^*a^*b , позволит получить более чистую и точную информацию из облака точек и использовать ее для различных приложений, таких как 3D-сканирование, реконструкция сцены и дополненная реальность. Все это дает возможность в ближайшей перспективе применять полученные данные на беспилотных машинах, которые на сегодняшний день активно внедряются в отраслях промышленности, в том числе и лесозаготовительной.

Список литературы

1. Kabonen, Alexey & Ivanova, Natalya. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. *Nature Conservation Research*. 2023; 8: 64-83. DOI: <http://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
2. Yang B., Haala N., Dong Z. Progress and perspectives of point cloud intelligence // *Geo-spatial Information Science*. – 2023. – С. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>.
3. Kuželka K., Marušák R., Surový P. Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022; 115:103104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103104>

4. Pires, Raul & Olofsson, Kenneth & Persson, Henrik & Lindberg, Eva & Holmgren, Johan. (2022). Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022; 187: 211-224. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.004>.
5. Zhang, Yupan & Tan, Yiliu & Onda, Yuichi & Hashimoto, Asahi & Gomi, Takashi & Chiu, Chenwei & Inokoshi, Shodai. (2023). A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. *Forest Ecosystems*. 2023; 10: 100088. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088>.
6. Dai, Mingrui & Li, Guohua. (2023). Soft Segmentation of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud of Forests. *Applied Sciences*. 2023; 13: 6228. DOI: <http://doi.org/10.3390/app13106228>.
7. Krassnitzer, Ralf & Nothdurft, Arne & Ritter, Tim & Tockner, Andreas & Erber, Gernot & Kühmaier, Martin & Hönigsberger, Ferdinand & Varch, Thomas & Holzinger, Andreas & Stampfer, Karl & Gollob, Christoph. Measurement of Individual Tree Parameters with Carriage-Based Laser Scanning in Cable Yarding Operations. *Croatian journal of forest engineering*. 2023; 2: 44 DOI: <http://doi.org/44.10.5552/crojfe.2023.2252>.
8. Gollob, Christoph & Ritter, Tim & Wassermann, Clemens & Nothdurft, Arne. (2019). Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sensing*. 2019; 11: 1602. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs11131602>.
9. Liang X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018; 144: 137-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
10. Покоева М.В., Ярославцев А.М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2020; 24 (3): 33–38. DOI: <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-33-38>.
11. Демидов Д. Н. Исследование алгоритма оценки параметров предполетной ориентации средств управления беспилотного летательного аппарата при мониторинге молодых лесных насаждений / Д. Н. Демидов // *Лесотехнический журнал*. 2021; 11 (4): 100–111. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.
12. Кабонен А. В., Иванова Н. В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного lidar и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях // *Nature Conservation Research. Заповедная наука*. 2023; 8 (1): 64-83. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
13. Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин // *Известия вузов. Лесной журнал*. 2021; 4: 9–22. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-9-22>.
14. Gao Q., Kan J. Automatic forest DBH measurement based on structure from motion photogrammetry // *Remote Sensing*. 2022; 9: 2064. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092064>
15. Singh A. et al. An approach for tree volume estimation using RANSAC and RHT algorithms from TLS dataset // *Applied Geomatics*. 2022; 4:785-794. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00471-x>.
16. Salehi, Bahram & Jarahizadeh, Sina & Sarafraz, Amin. An Improved RANSAC Outlier Rejection Method for UAV-Derived Point Cloud. *Remote Sensing*. 2022; 14: 4917. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs14194917>.
17. Yan, Guohang & He, Feiyu & Shi, Chunlei & Cai, Xinyu & Li, Yikang. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration. 2023; 11446-11452. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13708>.
18. Muhovič Jon, Pers Janez. Joint Calibration of a Multimodal Sensor System for Autonomous Vehicles. *Sensors*. 2023; 23: 5676. DOI: <http://doi.org/10.3390/s23125676>.
19. Zhu Y., Li C., Zhang Y. Online camera-lidar calibration with sensor semantic information // *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020; 970-976. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196627>
20. Huang, Biao & Zou, Shiping. (2022). A New Camera Calibration Technique for Serious Distortion. *Processes*. 2023; 10, 488. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030488>.

21. Huang B. et al. A fast and flexible projector-camera calibration system //IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2020; 3: 1049-1063. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2994223>
22. Ly, Bao & Dyer, Ethan & Feig, Jessica & Chien, Anna & Bino, Sandra. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. The Journal of investigative dermatology. 2020; 140: 3-12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>.
23. Dong, Lili & Zhang, Weidong & Xu, Wenhai. (2022). Underwater image enhancement via integrated RGB and LAB color models. Signal Processing Image Communication. 2022; 104: 116684. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.image.2022.116684>.
24. Abdel-Hamid, Lamiaa. Glaucoma detection using statistical features: Comparative study in RGB, HSV and CIEL*a*b* color models. 2018; 110692V DOI: <http://doi.org/10.1117/12.2524215>.
25. Liu, Kangcheng & Cao, Muqing. (2023). DLC-SLAM: A Robust LiDAR-SLAM System With Learning-Based Denoising and Loop Closure. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 5: 2876-2884 DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3253715>.
26. Lv, Jiajun & Lang, Xiaolei & Xu, Jinhong & Wang, Mengmeng & Liu, Yong & Zuo, Xingxing. (2023). Continuous-Time Fixed-Lag Smoothing for LiDAR-Inertial-Camera SLAM. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 4: 2259-2270. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3241398>.
27. Ren, Yujuan & Li, Tianzi & Xu, Jikun & Hong, Wenwen & Zheng, Yanchao & Fu, Biao. (2021). Overall Filtering Algorithm for Multiscale Noise Removal From Point Cloud Data. IEEE Access. 2021; 9: 110723-110734. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097185>.
28. Boslim, N & Abdul Shukor, Shazmin & Isa, S & Wong, R. (2021). Performance analysis of different classifiers in segmenting point cloud data. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 2107: 012003. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012003>.

References

1. Kabonen, Alexey & Ivanova, Natalya. Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based LiDAR and multiseasonal aerial photography data. Nature Conservation Research. 2023; 8: 64-83. DOI: <http://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
2. Yang B., Haala N., Dong Z. Progress and perspectives of point cloud intelligence //Geo-spatial Information Science. – 2023. – C. 1-17. DOI: <http://doi.org/10.1080/10095020.2023.2175478>.
3. Kuželka K., Marušák R., Surový P. Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning //International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2022; 115:103104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103104>
4. Pires, Raul & Olofsson, Kenneth & Persson, Henrik & Lindberg, Eva & Holmgren, Johan. (2022). Individual tree detection and estimation of stem attributes with mobile laser scanning along boreal forest roads. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2022; 187: 211-224. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.03.004>.
5. Zhang, Yupan & Tan, Yiliu & Onda, Yuichi & Hashimoto, Asahi & Gomi, Takashi & Chiu, Chenwei & Inokoshi, Shodai. (2023). A tree detection method based on trunk point cloud section in dense plantation forest using drone LiDAR data. Forest Ecosystems. 2023; 10: 100088. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100088>.
6. Dai, Mingrui & Li, Guohua. (2023). Soft Segmentation of Terrestrial Laser Scanning Point Cloud of Forests. Applied Sciences. 2023; 13: 6228. DOI: <http://doi.org/10.3390/app13106228>.
7. Krassnitzer, Ralf & Nothdurft, Arne & Ritter, Tim & Tockner, Andreas & Erber, Gernot & Kühmaier, Martin & Hönigsberger, Ferdinand & Varch, Thomas & Holzinger, Andreas & Stampfer, Karl & Gollob, Christoph. Measurement of Individual Tree Parameters with Carriage-Based Laser Scanning in Cable Yarding Operations. Croatian journal of forest engineering. 2023; 2: 44 DOI: <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2252>.

8. Gollob, Christoph & Ritter, Tim & Wassermann, Clemens & Nothdurft, Arne. (2019). Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sensing*. 2019; 11: 1602. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs11131602>.
9. Liang X. et al. International benchmarking of terrestrial laser scanning approaches for forest inventories // *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*. 2018; 144: 137-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.06.021>
10. Pokoeva M.V., Yarovslavcev A.M. Ekologicheskie issledovaniya smeshannyh nasazhdenij metodami distancionnogo zondirovaniya // *Lesnoj vestnik / Forestry Bulletin*, 2020. T. 24. № 3. S. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-33-38
11. Demidov D. N. Issledovanie algoritma ocenki parametrov predpoletnoj orientacii sredstv upravleniya bespilotnogo letatel'nogo apparata pri monitoringe molodyh lesnyh nasazhdenij / D. N. Demidov // *Lesotekhnicheskij zhurnal*. – 2021. – T. 11. – № 4 (44). – S. 100–111. – Bibliogr.: s. 108–111 (25 nazv.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2021.4/9>.
12. Kabonen A. V., Ivanova N. V. Ocenka biometricheskikh harakteristik derev'ev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnnoj aerofotos'emki v iskusstvennyh nasazhdeniyah // *Nature Conservation Research. Zapovednaya nauka*. – 2023. – T. 8. – №. 1. – S. 64-83. DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>
13. Nizametdinov N.F., Moiseev P.A., Vorob'ev I.B. 2021. Lazernoe skanirovanie i aerofotos'emka s BPLA v issledovanii struktury lesotundrovyyh drevostoev Hibin // *Izvestiya vuzov. Lesnoj zhurnal*. №4. S. 9–22. DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-9-22>
14. Gao Q., Kan J. Automatic forest DBH measurement based on structure from motion photogrammetry // *Remote Sensing*. 2022; 9: 2064. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14092064>
15. Singh A. et al. An approach for tree volume estimation using RANSAC and RHT algorithms from TLS dataset // *Applied Geomatics*. 2022; 4:785-794. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00471-x>
16. Salehi, Bahram & Jarahizadeh, Sina & Sarafraz, Amin. An Improved RANSAC Outlier Rejection Method for UAV-Derived Point Cloud. *Remote Sensing*. 2022; 14: 4917. DOI: <http://doi.org/10.3390/rs14194917>.
17. Yan, Guohang & He, Feiyu & Shi, Chunlei & Cai, Xinyu & Li, Yikang. Joint Camera Intrinsic and LiDAR-Camera Extrinsic Calibration. 2023; 11446-11452. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2202.13708>
18. Muhovič Jon, Pers Janez. Joint Calibration of a Multimodal Sensor System for Autonomous Vehicles. *Sensors*. 2023; 23: 5676. DOI: <http://doi.org/10.3390/s23125676>.
19. Zhu Y., Li C., Zhang Y. Online camera-lidar calibration with sensor semantic information // *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2020; 970-976. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRA40945.2020.9196627>
20. Huang, Biao & Zou, Shiping. (2022). A New Camera Calibration Technique for Serious Distortion. *Processes*. 2023; 10, 488. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr10030488>.
21. Huang B. et al. A fast and flexible projector-camera calibration system // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2020; 3: 1049-1063. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2020.2994223>
22. Ly, Bao & Dyer, Ethan & Feig, Jessica & Chien, Anna & Bino, Sandra. (2020). Research Techniques Made Simple: Cutaneous Colorimetry: A Reliable Technique for Objective Skin Color Measurement. *The Journal of investigative dermatology*. 2020; 140: 3-12. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jid.2019.11.003>.
23. Dong, Lili & Zhang, Weidong & Xu, Wenhai. (2022). Underwater image enhancement via integrated RGB and LAB color models. *Signal Processing Image Communication*. 2022; 104: 116684. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.image.2022.116684>.
24. Abdel-Hamid, Lamiaa. Glaucoma detection using statistical features: Comparative study in RGB, HSV and CIEL*a*b* color models. 2018; 110692V DOI: <http://doi.org/10.1117/12.2524215>.
25. Liu, Kangcheng & Cao, Muqing. (2023). DLC-SLAM: A Robust LiDAR-SLAM System With Learning-Based Denoising and Loop Closure. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023; 5: 2876-2884 DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3253715>.

26. Lv, Jiajun & Lang, Xiaolei & Xu, Jinhong & Wang, Mengmeng & Liu, Yong & Zuo, Xingxing. (2023). Continuous-Time Fixed-Lag Smoothing for LiDAR-Inertial-Camera SLAM. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023; 4: 2259-2270. DOI: <http://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3241398>.

27. Ren, Yujuan & Li, Tianzi & Xu, Jikun & Hong, Wenwen & Zheng, Yanchao & Fu, Biao. (2021). Overall Filtering Algorithm for Multiscale Noise Removal From Point Cloud Data. IEEE Access. 2021; 9: 110723-110734. DOI: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097185>.

28. Boslim, N & Abdul Shukor, Shazmin & Isa, S & Wong, R. (2021). Performance analysis of different classifiers in segmenting point cloud data. Journal of Physics: Conference Series. 2021; 2107: 012003. DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/2107/1/012003>.

Сведения об авторах

✉ *Рогачев Дмитрий Игоревич* – ассистент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7807-5294>, e-mail: rogachevdi@bmstu.ru.

Козлов Иван Вячеславович – ассистент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7143-0006>, e-mail: kozloviv@bmstu.ru.

Клубничкин Владислав Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса, Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана», ул. 1-ая Институтская, д. 1, г. Мытищи, Российская Федерация, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1231-8185>, e-mail: vkclubnichkin@gmail.com.

Information about the authors

✉ *Dmitry I. Rogachev* – assistant of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7807-5294>. e-mail: rogachevdi@bmstu.ru

Ivan V. Kozlov – assistant of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7143-0006>, e-mail: kozloviv@bmstu.ru.

Vladislav E. Klubnichkin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 1st Institutskaya str., 1, Mytishchi, Russian Federation, 141005, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1231-8185>, e-mail: vkclubnichkin@gmail.com.

✉ Для контактов/Corresponding author