

Рубрика

- Геодезия

УДК

(составляется с использованием справочника, доступного по [ссылке](#))

528.06

UDC

(составляется с использованием справочника, доступного по [ссылке](#))

528.4

ГРНТИ

(нужен для загрузки статьи в eLibrary; составляется с использованием справочника, доступного по [ссылке](#))

36.23.27

ОЕСД

(нужен для загрузки статьи в eLibrary; составляется с использованием справочника, доступного по [ссылке](#))

02.01.IM

Специальность ВАК

25.00.32 «Геодезия»

Заглавие

Оценка точности определения расстояний по расходимости лазерного луча в системах геодезического мониторинга

ФИО авторов с пометкой аффилиаций

(звездочка ставится возле автора, которому принадлежит электронная почта)

А.В. Мареев^{*1}, В.Р. Янгальшев¹, А.В. Макеев, Л.А. Каргина¹

Аффилиации

(учреждение, город, страна в указанном ниже формате)

1 Сибирский государственный университет геосистем и технологий, Новосибирск, Россия

Электронная почта

* a.v.mareev@sgugit.ru

Ключевые слова

компьютерное зрение, геодезический мониторинг, створные системы наблюдений, мониторинг лазерного пятна, открытый код, расходимость лазерного пучка;

Аннотация

Представлена оценка применимости алгоритмов и программ технического зрения в системах наблюдений геодезического постоянно действующего мониторинга. Рассмотрена методика определения линейных смещений по эффекту расходимости лазерного луча при формировании измерительного узла автоматизированной системы наблюдений. Измерительный узел включает полупроводниковый лазер, микроконтроллерный модуль ESP32 CAM с цифровой видеокамерой OV2640 и матовый экран.

Экспериментально подтверждена возможность оценки изменений расстояния между источником лазерного излучения и экраном с ошибкой 2 мм в диапазоне от 30 до 50 м. Обработка видеоизображений осуществляется с использованием открытого программного обеспечения, реализующего алгоритмы обнаружения и анализа положения лазерного пятна на матрице камеры. Представлены экспериментальные данные, полученные в контролируемых условиях, предназначенные для верификации и усовершенствования алгоритмов технического зрения.

Разработанное решение обеспечивает непрерывный режим регистрации смещений и может применяться в составе систем мониторинга деформаций инженерных сооружений. Использование малобюджетных компонентов и открытого программного обеспечения делает систему доступной для широкого внедрения. Результаты исследования направлены на повышение точности и автономности систем геодезического мониторинга. Предложенная архитектура измерительного узла позволяет исключить применение импульсного дальномера при определении полного вектора смещений, что снижает стоимость и энергопотребление системы. Методика может быть востребована в условиях удалённых территорий, где затруднён регулярный доступ к объектам наблюдения.

Статья

(статья структурируется по правилу [IMRAD](#) с добавлением раздела «Выводы»)

Разместите здесь вашу статью, структурировав в следующем порядке в указанном ниже формате:

1 Введение

Потребность в системах постоянно действующего геодезического мониторинга возрастает по мере роста геотехнических и геодинамических рисков эксплуатации зданий и сооружений. Эти риски увеличиваются вследствие накопления физического износа в эксплуатируемых жилых и промышленных зданиях. Дополнительным фактором риска для сооружений является таяние многолетнемерзлых грунтов в регионах Крайнего Севера [1].

Одним из основных препятствий для развития автоматизированных систем наблюдения геодезического мониторинга является высокая стоимость технических средств измерений. В настоящее время профессиональным сообществом предпринимаются значительные усилия по повышению доступности автоматических измерителей. Для геодезического мониторинга предлагаются малобюджетное ГНСС-оборудование [2], фотограмметрические системы мониторинга на постоянно закреплённых фотокамерах [3], а также системы наблюдений на опорном лазерном луче с использованием алгоритмов технического зрения [4, 5]. Несмотря на предпринимаемые меры, основным способом геодезического мониторинга стабильности остаётся геометрическое высокоточное нивелирование, выполняемое вручную. Основным недостатком метода является низкая оперативность получения измерительной информации, а также высокая стоимость работ на объектах, удалённых от развитых агломераций, включая территории Крайнего Севера.

Наиболее востребованным автоматизированным измерителем для систем геодезического мониторинга является роботизированный тахеометр. Он обеспечивает баланс между точностью и оперативностью измерений, а также информативностью за счёт возможности отслеживания множества контрольных точек в поле зрения. Однако системы на основе роботизированного тахеометра отличаются высокой стоимостью и ограничены по диапазону рабочих температур.

Альтернативой роботизированному тахеометру может служить система наблюдения на опорном лазерном луче в колокации с высокоточным цифровым инклинометром. Примером такого устройства является прибор Trimble LaserTilt90¹, в котором объединены импульсный дальномер и

¹ <https://geospatial.trimble.com/en/products/hardware/wireless-geotechnical-sensors>

цифровой MEMS-инклинометр. Прибор позволяет определять изменения горизонтального проложения с ошибкой до 4 мм на расстоянии 50 м в лабораторных условиях. Основной недостаток систем наблюдений с использованием подобных приборов заключается в невозможности определения полного вектора смещений контрольной точки, в отличие от решений на основе роботизированного тахеометра или ГНСС-приёмника.

Оценка полного вектора смещения на отдельном опорном луче возможна с помощью системы наблюдения на основе компьютерного зрения. Измерительный узел такой системы включает два устройства: первое устанавливается на опорной точке, второе – на реперной (контролируемой) точке. Устройство на опорной точке содержит источник коллимированного лазерного излучения и цифровой высокоточный инклинометр. Устройство на реперной точке состоит из матового экрана и модуля с цифровой видеокамерой, закреплённой над экраном. Камера калибруется и устанавливается на расстоянии не более 10 см от экрана [6]. Такая система обеспечивает отслеживание перемещения лазерного пятна с точностью в несколько миллиметров на базах до 100 м. Для определения полного вектора смещения систему необходимо дополнить средством измерения расстояний. Наиболее простым решением является интеграция импульсного дальномера, позволяющего измерять расстояния с ошибкой порядка 1 мм.

Однако такое совмещение приборов на практике труднодостижимо, поскольку для осуществления высокоточного трекинга лазерного луча по экрану необходимы технические средства, усиливающие контрастность лазерного пятна, с одной стороны, и снижающие влияние внешних условий, в особенности внешнего освещения, – с другой. Для этого применяются экраны с низким коэффициентом отражения, а также светофильтры, устанавливаемые на входные окна перед экраном и на камеру. Это препятствует работе импульсного дальномера и ограничивает его рабочую дальность.

Дополнить систему наблюдений компьютерного зрения для систем мониторинга на опорном лазерном луче можно с помощью программ определения расстояний по расходимости лазерного луча [7, 8]. Гипотеза исследования состоит в том, что путём отслеживания формы и перемещения лазерного пятна можно также отслеживать изменения расстояний с достаточной точностью для определения полного вектора смещений точки контроля с использованием только технических средств компьютерного зрения без применения импульсного дальномера.

2 Материалы и методы

2.1 Методика исследования

Методика исследования основана на оценке точности прототипа измерительного модуля для систем мониторинга на опорном лазерном луче – устройства, предназначенного для определения изменений расстояния с использованием средств технического зрения. Устройство включает полупроводниковый источник лазерного излучения с коллиматором, устанавливаемый на опорной точке, и экран с модулем цифровой видеокамеры, размещаемый на реперной точке (Рис. 1). Камера фиксируется на расстоянии не более 10 см от экрана и оснащается дополнительными элементами для повышения качества отслеживания положения лазерного пятна, включая светофильтры. Для контроля результатов измерений изменений расстояния применяется микрометрический подвижной столик с чувствительностью к смещениям в горизонтальной плоскости 0,01 мм.

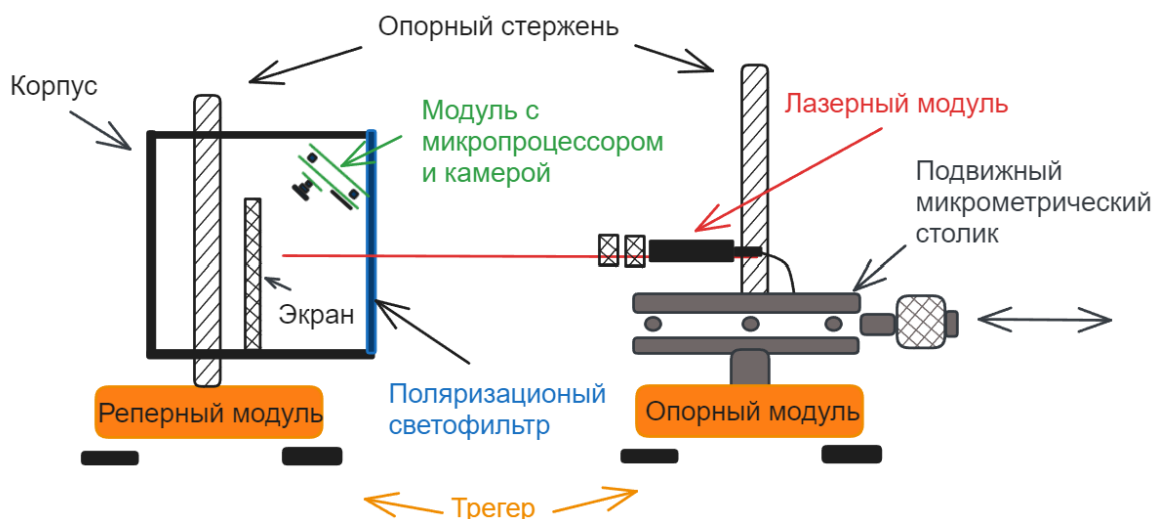


Рис. 1. Условная схема расположения основных элементов экспериментальной установки
Fig. 1. Schematic diagram of the arrangement of the main elements of the experimental setup

Исходными данными исследования являются видеозаписи смещений лазерного пучка, регистрируемые на реперном модуле. Оценка точности выполняется по временным рядам значений смещений, определённых по изменению формы и положения лазерного пятна с помощью алгоритмов технического зрения, а также по временным рядам эталонных смещений, задаваемых с использованием подвижного микрометрического механизма.

Основными показателями точности являются средняя ошибка (MAE) и среднеквадратическая ошибка (СКО) оценки смещений:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^k |\Delta L_i - \hat{\Delta L}_i|}{k}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\Delta L_i - \hat{\Delta L}_i)^2},$$

где $\hat{\Delta L}_i$ – оценка смещения, полученная с помощью алгоритмов технического зрения;

k – количество моментов наблюдений во временном ряду;

ΔL_i – эталонное смещение на момент наблюдения i

Оценка величины $\hat{\Delta L}_i$ выполняется по регрессионной модели:

$$\alpha \bar{X}_i + \beta \bar{Y}_i + \gamma \Delta L_i^S = \hat{\Delta L}_i. \quad (2)$$

где $\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^m x_j}{m}$, $\bar{Y}_i = \frac{\sum_{j=1}^m y_j}{m}$ – координаты центра масс контура лазерного пятна на экране, где m –

количество точек контура, а x_j, y_j – координаты контура лазерного пятна, калиброванные за влияние дисторсии камеры;

ΔL_i^S – составляющая изменения смещения, связанная с изменением площади проекции лазерного пучка на экран;

α, β, γ – калибровочные коэффициенты, определяемые методом множественной линейной

регрессии.

Величина ΔL_i^S оценивается по изменению площади сколлимированного лазерного пучка на экране. Расстояние между источником излучения и экраном L , диаметр пучка D и угол расходимости θ связаны соотношением [9]:

$$L = \frac{(D - D_c)}{2\theta}, \quad (3)$$

где D_c – диаметр области когерентности лазерного пучка.

Разложение в ряд Тейлора (3) с заменой диаметра пучка на его площадь позволяет получить формулу для расчёта изменения расстояния ΔL_i^S по изменению площади лазерного пятна на экране $\Delta S_i = S_i - S_0$:

$$\Delta L_i^S = \frac{\Delta S_i}{2\theta_0} \sqrt{\frac{\pi}{S_0}}, \quad (4)$$

$$\theta_0 = \frac{\sqrt{\frac{S_0}{\pi}} - D_c}{L_0},$$

где S_0 – начальное значение площади пятна;

L_0 – начальное расстояние между источником и экраном. Для приблизительных расчетов можно использовать в качестве значения D_c величину диаметра выходного отверстия коллиматора.

В идеальном измерительном узле форма лазерного пучка должна соответствовать кривой второго порядка. Однако на практике контур пучка искажается вследствие дефектов оптической системы. Использование уравнения кривой второго порядка в качестве опорной модели приведет к неустойчивости решения при наличии выбросов.

Коэффициенты модели (2) α, β стремятся к нулю при строго перпендикулярном направлении лазерного луча к плоскости экрана. Достижение такого положения на практике затруднено. Обнуление коэффициентов потенциально позволяет исключить калибровку системы при её инициализации, что упрощает технологию слежения. Однако реализация данного условия требует высокоточной механической подстройки положения экрана, что увеличивает стоимость измерительного устройства.

Площадь лазерного пятна вычислялась двумя способами. Первый способ основан на формуле Гаусса для расчёта площади многоугольника:

$$S_i^G = \frac{1}{2} \left| \sum_{j=1}^{m-1} x_j y_{j+1} + x_m y_1 - \sum_{j=1}^{m-1} x_{j+1} y_j - x_1 y_{m-1} \right|. \quad (5)$$

Второй способ предполагает численное интегрирование под кривой, полученной методом сплайн-интерполяции. В качестве аппроксимирующей функции использовался полином фиксированной степени n :

$$S_i^S = \sum_{s=1}^l F(P_n(x((s-1)\frac{360}{l}))) - F(P_n(x(s\frac{360}{l}))), \quad (6)$$

где l – количество фрагментов сплайна;

$x_i : ((s-1)\frac{360}{k} : s\frac{360}{k})$ – угловые границы фрагмента сплайна, определяемые направлением

вектора текущей точки $r_j(x_j, y_j)$ к оси OX ;

s – индекс текущего фрагмента сплайна;

$P_n(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + \dots + c_nx^n$ – полином степени n .

Количество фрагментов сплайна k и степень полинома n оценивалась эмпирически.

Коэффициенты полинома вычислялись методом множественной линейной регрессии для каждого момента наблюдения i :

$$[c_0, c_1, c_2, \dots, c_n]_i = (\mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i)^{-1} \mathbf{A}_i^T y_i, \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^n \\ 1 & x_j & x_j^2 & \dots & x_j^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_m & x_m^2 & \dots & x_m^n \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$y_i = [y_0, y_1, \dots, y_m]_i. \quad (9)$$

Координаты контура лазерного пучка определялись с использованием стандартных функций библиотеки OpenCV. Алгоритм выделения контуров представлен на UML-диаграмме (Рис. 2).



Рис. 2. Uml-диаграмма алгоритма определения координат контура лазерного пучка на экране реперного модуля

Fig. 2. UML diagram of the algorithm for determining the coordinates of the laser beam contour on the reference module's screen

Порядок проведения расчетов экспериментального исследования представлен в диаграмме действий на рис. 3. Исходные данные, включая видеозаписи, а также файлы распознавания движений доступны по следующей ссылке². Все расчетные процедуры реализованы в виде Jupyter Notebook-файлов и размещены по указанной ссылке³.

² <https://osf.io/xcwud/files/osfstorage>

³ <https://gist.github.com/ArtemMareev/1b2d9cc2b3631638e1cc19867b5cce72>

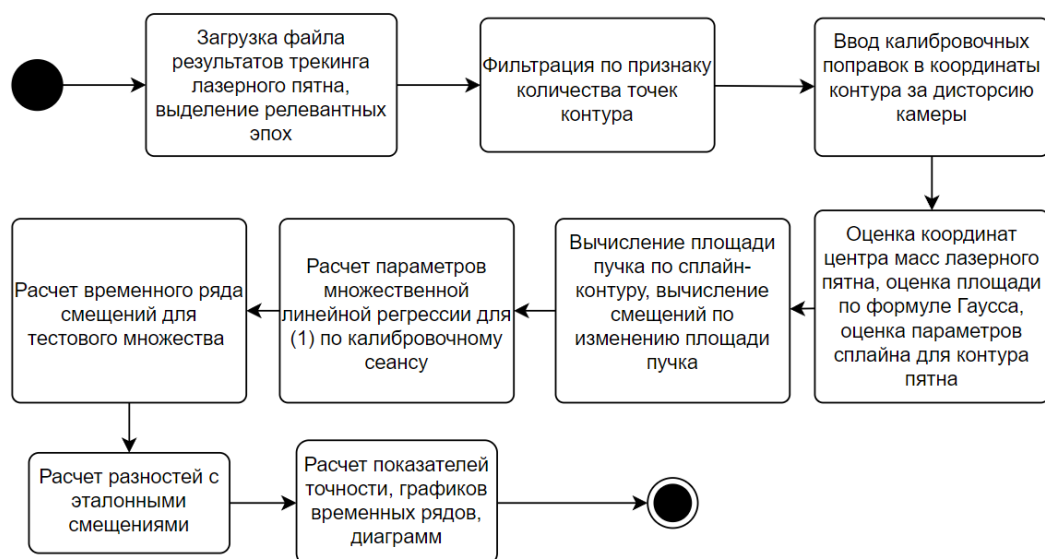


Рис. 3. UML-диаграмма действий при обработке результатов эксперимента

Fig. 3. UML activity diagram for processing experimental results

2.2 Экспериментальная установка

Экспериментальная установка включает следующие элементы (Рис. 4):

- элевационные штативы RGK SH-170, один из которых предназначен для закрепления полупроводникового лазера, второй – для установки модуля с экраном и камерой;
- полупроводниковый лазерный модуль (длина волны 650 нм, мощность 50 мВт, габариты 16×68 мм) с возможностью фокусировки;
- подвижной микрометрический столик с ценой деления 0,01 мм и диапазоном устанавливаемых смещений от 0 до 20 мм;
- матовый пластиковый экран, закреплённый на втором штативе;
- цифровую видеокамеру, установленную на расстоянии 7 см от экрана, выполненную в виде модуля ESP32 CAM с камерой OV2640, разрешением 1600×1200 точек (2 Мп);
- поляризационный светофильтр, размещённый на входном окне реперного модуля;
- цифровой тахеометр EFT M1 (угловая точность – 2", ошибка дальномера – 3 мм в безотражательном режиме);
- лазерный импульсный дальномер Bosch PLR-50 C с паспортной ошибкой 2 мм и предельной дальностью 50 м, используемый в качестве референтного малобюджетного дальномера.

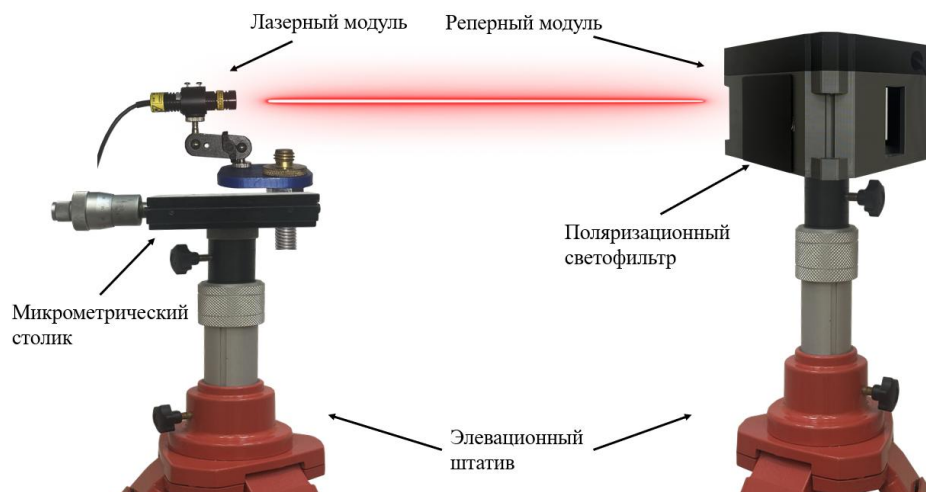


Рис. 4. Фотография экспериментальной установки

Fig. 4. Photograph of the experimental setup

2.3 Эксперимент

Эксперимент включал три серии измерений, в каждой из которых проводились два сеанса – калибровочный и тестовый. В каждой серии устанавливалось фиксированное расстояние между опорной и реперной точками: 15, 30 и 50 м. В каждом сеансе выполнялось 20 эталонных смещений в горизонтальной плоскости по направлению к экрану с шагом 1 мм с использованием микрометрического столика.

Перед началом каждого сеанса измерялось начальное расстояние между экраном и лазерным модулем с помощью цифрового тахеометра. Каждое эталонное смещение фиксировалось вручную в цифровом журнале с применением программы «ВИМ-менеджер» [10]. Частота записи видеоданных модулем ESP32 CAM составляла 1 Гц. На одно смещение приходилось около 20 с наблюдений. Общее количество моментов наблюдений в каждой сессии составляло порядка 400.

3 Результаты и обсуждение

В результате эксперимента установлено, что точность определения изменений расстояния с помощью технического зрения при использовании измерительного узла, включающего полупроводниковый лазер и модуль ESP32 CAM с цифровой камерой, составляет 2 мм в диапазоне от 30 до 50 м (см. Таблицы 1–2, Рисунок 5). Для сравнения: лазерный импульсный дальномер Bosch PLR-50 C обеспечивает ошибку измерения расстояния 2 мм на дистанции до 50 м, однако только при использовании специальных светоотражающих мишеней.

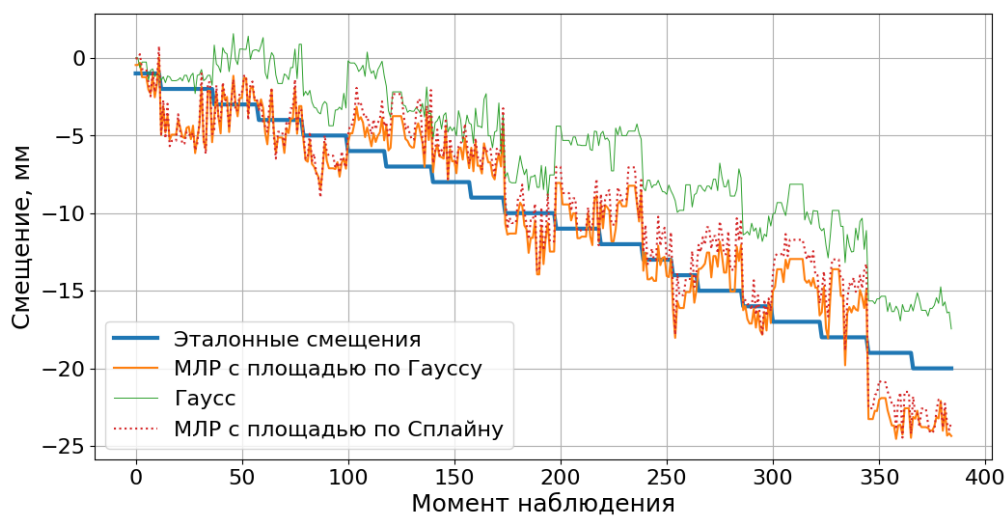
Таблица 1. Результаты оценки точности определения изменения дальности при помощи алгоритмов компьютерного зрения на опорном лазерном луче, тестовые сеансы

Расстояние между модулями, м	50		30		15	
Способ определения расстояний	Средняя ошибка, мм	СКО, мм	Средняя ошибка, мм	СКО, мм	Средняя ошибка, мм	СКО, мм
МЛР (Гаусс)	0,1	2,3	2,1	2,1	3,9	3,1
МЛР (Сплайн)	0,8	2,6	1,7	2,1	3,8	3,1
Площадь по Гауссу	4,3	2,1	16,2	8,3	9,2	5,8

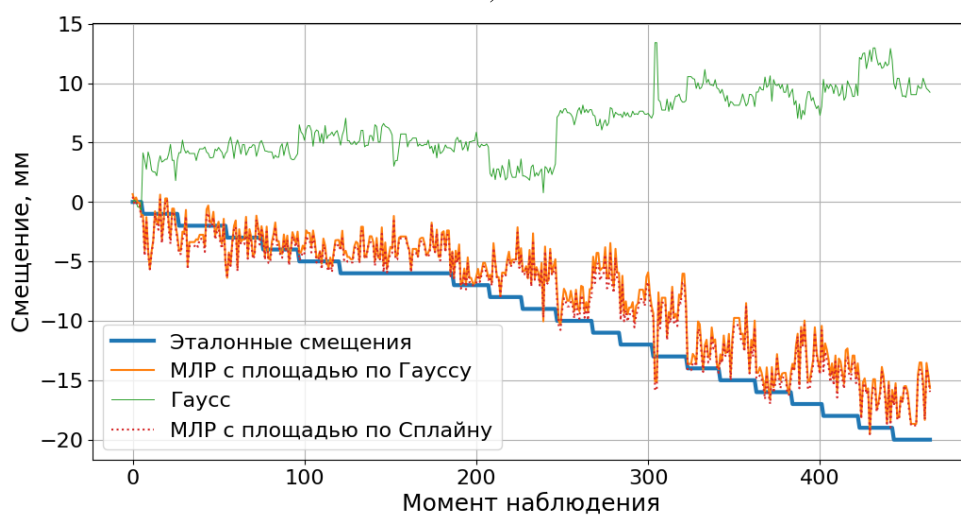
Таблица 2. Результаты оценки точности калибровки системы слежения за изменением расстояния при помощи алгоритмов компьютерного зрения на опорном лазерном луче

Расстояние между модулями, м	50		30		15	
Способ определения расстояний	Средняя ошибка, мм	СКО, мм	Средняя ошибка, мм	СКО, мм	Средняя ошибка, мм	СКО, мм
МЛР (Гаусс)	0,0	2,3	0,0	1,9	0,0	2,4
МЛР (Сплайн)	0,0	2,4	0,0	1,8	0,0	2,4

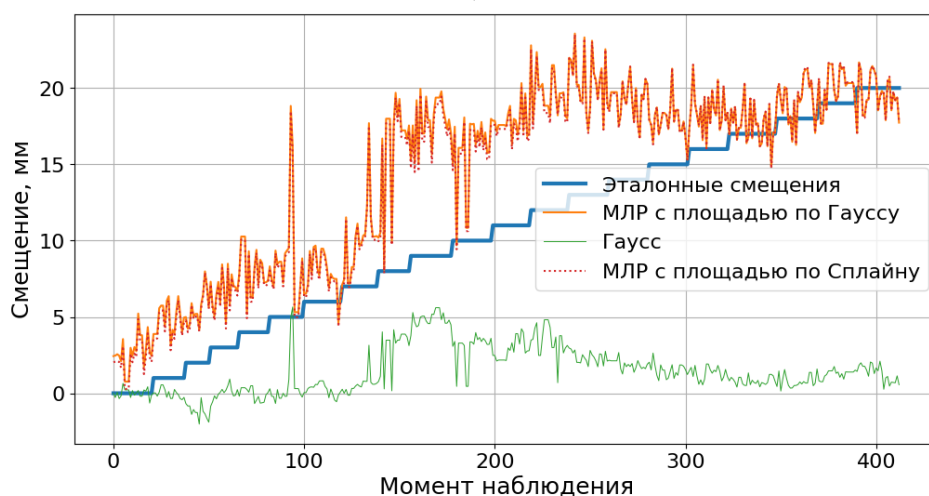
Площадь по Гауссу	1,9	3,0	15,0	9,3	11,0	4,5
-------------------	-----	-----	------	-----	------	-----



а)



б)



в)

Рис. 5. Графики временных рядов отслеживания изменения расстояния с помощью алгоритмов компьютерного зрения на опорном лазерном луче, при расстоянии между модулями: а) 50 м; б) 30 м; в) 15 м

Fig. 5. Time series plots of distance change tracking using computer vision algorithms on a reference laser beam at module separation distances: *a)* 50 m; *b)* 30 m; *c)* 15 m

На дистанциях до 15–20 м применение данного метода нецелесообразно вследствие снижения точности оценки смещений до 5 мм (Рисунок 6). Указанный результат обусловлен длиной участка когерентности излучения используемого лазерного модуля, которая составляет порядка 20 м. В пределах этой зоны расходимость лазерного пучка недостаточна для достоверного детектирования изменения площади пятна на экране с применением используемой системы регистрации. Для диапазона до 20 м в качестве источника излучения рекомендуется использовать импульсный дальномер.

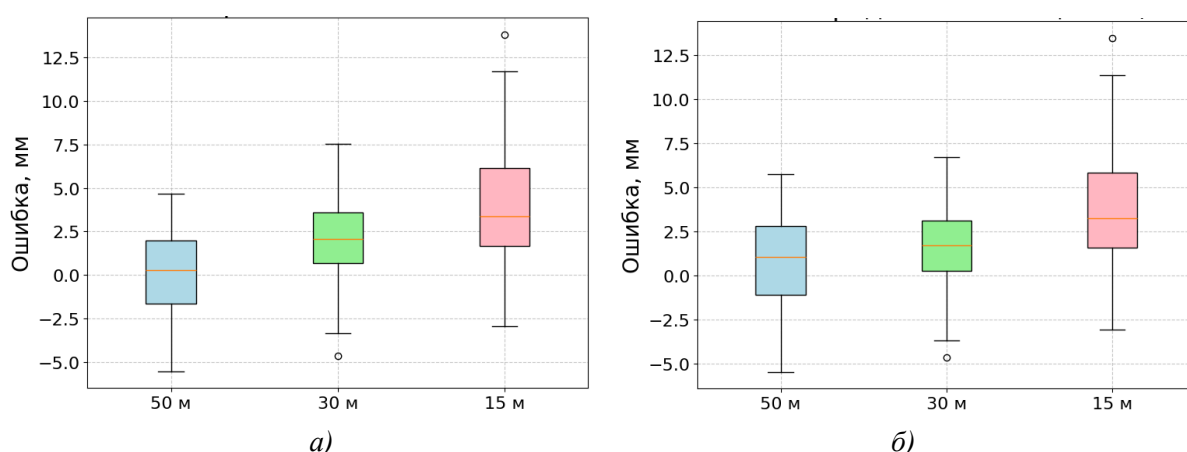


Рис. 6. Блочная диаграмма ошибок определения изменения расстояний при помощи технологии компьютерного зрения на опорном лазерном луче: *a)* калибровочный сеанс; *б)* тестовый сеанс

Fig. 6. Block diagram of distance change estimation errors using computer vision technology on a reference laser beam: *a)* calibration session; *b)* test session

Использование промышленного импульсного дальномера в качестве источника излучения в измерительном узле возможно только на дистанциях до 15 м. На больших расстояниях дальномер не формирует устойчивого сигнала, либо требуется внесение конструктивных изменений в узел для обеспечения его работоспособности.

Исследования показали, что наилучшая точность оценки расстояния по площади лазерного пятна достигается при использовании сплайн-интерполяции с числом сегментов 2 и степенью полинома 3. Применение робастных алгоритмов оценки параметров полиномов из библиотеки *scikit-learn* не привело к повышению точности по сравнению с линейной регрессией.

Анализ временных рядов разностей между эталонными и оценёнными смещениями выявил наличие остаточных систематических составляющих ошибки. Это указывает на недостаточную полноту учёта влияющих факторов. Потенциально точность можно повысить за счёт применения сглаживающих функций, устойчивых к выбросам, и оптимизации модели интерполяции.

Дальнейшее увеличение предельной дистанции определения расстояния по расходимости лазерного пучка возможно при модификации реперного модуля. Дистанция 50 м является практически предельной для используемого оборудования: на этом расстоянии лазерное пятно остаётся в пределах экрана и обеспечивается достаточный запас по смещению пятна в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

5 Выводы

Экспериментально установлено, что точность определения расстояния по изменению формы и положения лазерного пятна с использованием технического зрения составляет ± 2 мм в диапазоне до 50 м. Полученное значение сопоставимо с ошибкой прибора Trimble LaserTilt90, составляющей ± 4 мм на той же дистанции. Предложенный метод позволяет в перспективе реализовать определение полного вектора смещений контрольной точки с помощью измерительной системы на основе опорного лазерного луча и технического зрения. Такое решение может быть применено в системах геодезического мониторинга, где требуется контроль ограниченного числа точек.

Целесообразность внедрения подобных систем возрастает для зданий и сооружений, подверженных риску нарушения структурной целостности, а также для объектов, расположенных в удалённых районах, где регулярный доступ геодезистов затруднён. Для практического внедрения измерительных устройств на основе опорного лазерного луча и технического зрения требуются дополнительные исследования устойчивости к внешним воздействиям. Процедура калибровки по расстояниям может быть автоматизирована и выполняться с заданной периодичностью. В межкалибровочный период коэффициенты модели принимаются постоянными. Автоматизация калибровки возможна с применением алгоритмов технического зрения и подвижного экрана, формирующего эталонное смещение.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (FEFS-2023-0003).

Библиография

- 1 Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / V. P. Melnikov, V. I. Osipov, A. V. Brouchkov [и др.] // Natural Hazards. – 2022. – Т. 112. – № 1. – С. 231–251. – DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
- 2 An Innovative Low-Power, Low-Cost, Multi-Constellation Geodetic-Grade Global Navigation Satellite System Reference Station for the Densification of Permanent Networks: The GREAT Project / D. Curone, G. Savarese, M. Antonini [и др.] // Sensors. – 2023. – Т. 23. – № 13. – С. 6032. – DOI: 10.3390/s23136032.
- 3 Fixed photogrammetric systems for natural hazard monitoring with high spatio-temporal resolution / X. Blanch, M. Guinau, A. Eltner [и др.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2023. – Т. 23. – № 10. – С. 3285–3303. – DOI: 10.5194/nhess-23-3285-2023.
- 4 A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments / Y. Zhuang, W. Chen, T. Jin [и др.] // Sensors. – 2022. – Т. 22. – № 10. – С. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.
- 5 Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications / C. Ferraris, G. Amprimo, G. Pettiti // Signals. – 2023. – Т. 4. – № 3. – С. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.

- 6 A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections / M. Vicente, D. Gonzalez, J. Minguez [и др.] // Sensors. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 970. – DOI: 10.3390/s18040970.
- 7 Robust Range Finder Through a Laser Pointer and a Webcam / C. E. Portugal-Zambrano, J. P. Mena-Chalco // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2011. – Т. 281. – С. 143–157. – DOI: 10.1016/j.entcs.2011.11.031.
- 8 Сорокин, М. И. Лазерный Дальномер И 2d Сканирование Помещения / М. И. Сорокин // Аллея Науки. – 2017. – Т. 2. – № 9. – С. 877–888.
- 9 Губарев, Ф. А. Измерение параметров лазерного излучения / Ф. А. Губарев. – Томск 2017. – 7 с.
- 10 Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров / В. Р. Янгальшев, М. А. Попков, В. Ю. Наумов – Тюменский индустриальный университет, Тюмень, 2024. – С. 182–186. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79721496&pff=1>

Авторы (заполняется для каждого автора отдельно)

Фамилия Имя Отчество (полностью)

Мареев Артем Владимирович

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* a.v.mareev@sgugit.ru

Место работы (официальное наименование учреждения полностью, город, страна)

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ),
Новосибирск, Россия

Кафедра, факультет, институт (со строчной буквы)

кафедра космической и физической геодезии

Ученая степень, ученое звание (в указанном ниже формате)

канд. техн. наук, -

[ORCID](#)

0000-0002-1216-5350

[ELIBRARY \(Science Index\) Author ID](#)

881524

[SPIN-код](#)

2679-1933

[Scopus ID](#)

-

[Researcher ID](#)

AAE-1194-2019

Фамилия Имя Отчество (полностью)

Янгальшев Валентин Рамильевич

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* ---

Место работы (официальное наименование учреждения полностью, город, страна)

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ),
Новосибирск, Россия

Кафедра, факультет, институт (со строчной буквы)

кафедра космической и физической геодезии

Ученая степень, ученое звание (в указанном ниже формате)

-, -

[ORCID](#)

-

ELIBRARY (Science Index) Author ID

-

SPIN-код

-

Scopus ID

-

Researcher ID

-

Фамилия Имя Отчество (полностью)

Макеев Александр Викторович

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* _

Место работы (официальное наименование учреждения полностью, город, страна)

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ),
Новосибирск, Россия

Кафедра, факультет, институт (со строчной буквы)

кафедра специальных устройств, инноватики и метрологии

Ученая степень, ученое звание (в указанном ниже формате)

-, -

ORCID

-

ELIBRARY (Science Index) Author ID

-

SPIN-код

-

Scopus ID

-

Researcher ID

-

Фамилия Имя Отчество (полностью)

Каргина Лидия

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* _

Место работы (официальное наименование учреждения полностью, город, страна)

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (СГУГиТ),
Новосибирск, Россия

Кафедра, факультет, институт (со строчной буквы)

кафедра космической и физической геодезии

Ученая степень, ученое звание (в указанном ниже формате)

-, -

ORCID

ELIBRARY (Science Index) Author ID

SPIN-код

Scopus ID

-

Researcher ID

-

Данные на английском языке

Заглавие

Distance Estimation Based on Laser Beam Divergence in Geodetic Monitoring Systems

ФИО авторов с пометкой аффилиаций

(звездочка ставится возле автора, которому принадлежит эл. почта)

Artem V. Mareev^{*1}, Valentine R. Yangalishev, Alexandr V. Makeev, Lidia Kargina

Аффилиации

(официальное наименование учреждения на английском языке, город, страна)

¹Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk, Russia

Электронная почта

* a.v.mareev@sgugit.ru

Ключевые слова

computer vision, geodetic monitoring, alignment monitoring systems, laser spot tracking, open source, laser beam divergence

Аннотация

An assessment is presented of the applicability of computer vision algorithms and software in observation systems for continuously operating geodetic monitoring. A method for determining linear displacements based on the divergence effect of a laser beam is considered, implemented within a measurement unit comprising a semiconductor laser, an ESP32 CAM microcontroller module with an OV2640 digital camera, and a matte screen. Experimental results confirm the capability to estimate distance variations between the laser source and the screen with an error of 2 mm over a range of 30 to 50 m. Video processing is performed using open-source software designed to detect and analyze the position of the laser spot on the camera matrix. Experimental data obtained under controlled conditions are provided for the verification and refinement of technical vision algorithms. The proposed solution enables continuous displacement monitoring and can be integrated into structural deformation monitoring systems. The use of low-cost components and open software enhances the system's accessibility for widespread deployment. The results contribute to improving the accuracy and autonomy of geodetic monitoring systems.

Благодарности

The research was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Education 'Automatic geodetic monitoring of the natural environment and engineering structures by means of low-budget high-precision sensors of vertical movements in the Far North' (FEFS-2023-0003).

Библиография

infrastructure by 2050 / V. P. Melnikov, V. I. Osipov, A. V. Brouchkov [и др.] // Natural Hazards. – 2022. – Т. 112. – № 1. – С. 231–251. – DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.

2 An Innovative Low-Power, Low-Cost, Multi-Constellation Geodetic-Grade Global Navigation Satellite System Reference Station for the Densification of Permanent Networks: The GREAT Project / D. Curone, G. Savarese, M. Antonini [и др.] // Sensors. – 2023. – Т. 23. – № 13. – С. 6032. – DOI: 10.3390/s23136032.

3 Fixed photogrammetric systems for natural hazard monitoring with high spatio-temporal resolution / X. Blanch, M. Guinau, A. Eltner [и др.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2023. – Т. 23. – № 10. – С. 3285–3303. – DOI: 10.5194/nhess-23-3285-2023.

4 A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments / Y. Zhuang, W. Chen, T. Jin [и др.] // Sensors. – 2022. – Т. 22. – № 10. – С. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.

5 Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications / C. Ferraris, G. Amprimo, G. Pettiti // Signals. – 2023. – Т. 4. – № 3. – С. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.

6 A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections / M. Vicente, D. Gonzalez, J. Minguez [и др.] // Sensors. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 970. – DOI: 10.3390/s18040970.

7 Robust Range Finder Through a Laser Pointer and a Webcam / C. E. Portugal-Zambrano, J. P. Mena-Chalco // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2011. – Т. 281. – С. 143–157. – DOI: 10.1016/j.entcs.2011.11.031.

8 Сорокин, М. И. Лазерный Дальномер И 2d Сканирование Помещения / М. И. Сорокин // Аллея Науки. – 2017. – Т. 2. – № 9. – С. 877–888.

9 Губарев, Ф. А. Измерение параметров лазерного излучения / Ф. А. Губарев. – Томск 2017. – 7 с.

10 Программа для калибровки малобюджетных высокоточных цифровых видеоинклинометров / В. Р. Янгальшев, М. А. Попков, В. Ю. Наумов – Тюменский индустриальный университет, Тюмень, 2024. – С. 182–186. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=79721496&pff=1>

Авторы (заполняется для каждого автора отдельно)

Фамилия Имя Отчество (полностью в приведенном ниже формате)

Artem V. Mareev

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* a.v.mareev@sgugit.ru

Место работы (официальное наименование учреждения на английском языке, город, страна)

Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk, Russia

Кафедра, факультет, институт

Department of Space and Physical Geodesy

Ученая степень, ученое звание (с прописной буквы в приведенном ниже формате)

Ph.D. in Engineering, -

Фамилия Имя Отчество (полностью в приведенном ниже формате)

Valentine R. Yangalishev

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* _

Место работы (официальное наименование учреждения на английском языке, город, страна)

Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk, Russia

Кафедра, факультет, институт

Department of Space and Physical Geodesy

Ученая степень, ученое звание (с прописной буквы в приведенном ниже формате)

-, -

Фамилия Имя Отчество (полностью в приведенном ниже формате)

Alexandr V. Makeev

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* _

Место работы (официальное наименование учреждения на английском языке, город, страна)

Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk, Russia

Кафедра, факультет, институт

Department of Special Devices, Innovatics, and Metrology

Ученая степень, ученое звание (с прописной буквы в приведенном ниже формате)

-, -

Фамилия Имя Отчество (полностью в приведенном ниже формате)

Lidia Kargina

Электронная почта (поставьте *, если хотите, чтобы почта была опубликована в журнале)

* _

Место работы (официальное наименование учреждения на английском языке, город, страна)

Siberian state university of geosystems and technologies, Novosibirsk, Russia

Кафедра, факультет, институт

Department of Space and Physical Geodesy

Ученая степень, ученое звание (с прописной буквы в приведенном ниже формате)

-, -