
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.78
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-656-666

МУЛЬТИКАМЕРНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРА ПЛОДОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Б. М. Динь, А. Н. Тимофеев, В. В. Коротаев, Т. В. Тургалиева

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bmdinh@itmo.ru*

Предложена структура опτικο-электронной системы обеспечения сепарации плодов сложной формы по их геометрическим параметрам. Описан и апробирован генетический алгоритм для решения задачи оптимизации расположения видеокамер в соответствующих сегментах пространства по критерию обеспечения требуемой погрешности определения формы плода. Имитационное моделирование работы системы показало, что для четырех видеокамер при восстановлении формы плодов с погрешностью 18 мкм в генетическом алгоритме достаточно использовать популяцию из 30 особей. Найдены параметры пространственной ориентации четырех видеокамер, расположенных на расстоянии 500 мм от плода, для оценочной функции погрешности восстановления трехмерных координат точек плода 3,5 мкм.

Ключевые слова: бесконтактный контроль, опτικο-электронная система, пространственное расположение видеокамер, генетический алгоритм, обработка изображений, оценка геометрических параметров, оценочная функция, сортировка плодов

Введение. Необходимость повышения производительности работ при сборе и сепарации сельскохозяйственной продукции привело к активным исследованиям и разработкам соответствующих интеллектуальных роботизированных систем [1, 2]. Такие системы обычно содержат несколько видеокамер и источников подсветки, которые позволяют сортировать по геометрическим параметрам формы, текстуры поверхности и цвета трехмерной модели плодов простой формы [3—5]. Однако для получения более корректных результатов сортировки фруктов и овощей сложной формы (ананас, питайя, цветная капуста и т.д.) требуется снизить погрешность оценки параметров трехмерной формы плода [6—8]. Одним из путей частичного решения указанной задачи является увеличение числа специально ориентированных видеокамер — в зависимости от конкретной задачи и сложности контролируемых параметров до десятка. Это приводит к усложнению как алгоритмов обработки информации, так и задач калибровки системы [9, 10].

Опτικο-электронные системы обеспечения сортировки (ОЭСОС) позволяют решить ряд задач, связанных с бесконтактным контролем геометрических параметров размера и формы плодов [11, 12]. Например, для количественной оценки размера и формы плода используются проекция площади, периметр, размер главной и второстепенной осей эллипсов в изображении плода [13, 14]. В этом случае требуется определять координаты точек трехмерной модели плодов сложной формы.

Анализ интеллектуальных роботизированных систем сортировки фруктов и овощей [15—17] позволил сформировать модульную структуру мультикамерной ОЭСОС, состоящей из нескольких видеокамер ВК (рис. 1), источников импульсного освещения ИИ, блока синхронизации БС и базового компьютера БК. Предлагаемая конструкция позволяет легко изменять систему под класс сформулированных требований автоматической сортировки при одновременном выполнении оптимальных процедур обработки геометрических параметров формы плода. Компьютер и БС управляют режимами ИИ и ВК для получения оптимального контраста [10, 18]. Трехмерные изображения позволяют определить геометрические параметры „основного тела“ плода сложной формы без погрешностей, возникающих из-за наблюдения „неинформативных частей“ плода (листьев, стеблей и т.д.) [19].

Целью работы является поиск оптимального расположения видеокамер для определения геометрических параметров формы плодов с требуемыми значениями погрешности при условии предварительной калибровки, позволяющей определить внутренние и внешние параметры видеокамер.

Методика пространственной ориентации нескольких ВК. В рассматриваемой схеме (рис. 1) обозначим центральную точку O зоны анализа и свяжем с ней систему координат $OXYZ$. Наблюдаемая точка P (рис. 2) в центре экспонирования и соответствующая ей точка p изображения лежат на одной прямой [20]. Ориентацию каждой ВК $_i$ будем определять в сферической системе координат с азимутальным углом φ_i , полярным углом θ_i и радиусом r_i , где i — номер видеокамеры. Для каждой ВК введем систему координат $O_cX_cY_cZ_c$, плоскость $O_cX_cY_c$ которой совпадает с главной плоскостью объектива ВК $_i$. На расстоянии a'_i от системы координат $O_cX_cY_cZ_c$ расположим матричный приемник ВК $_i$.

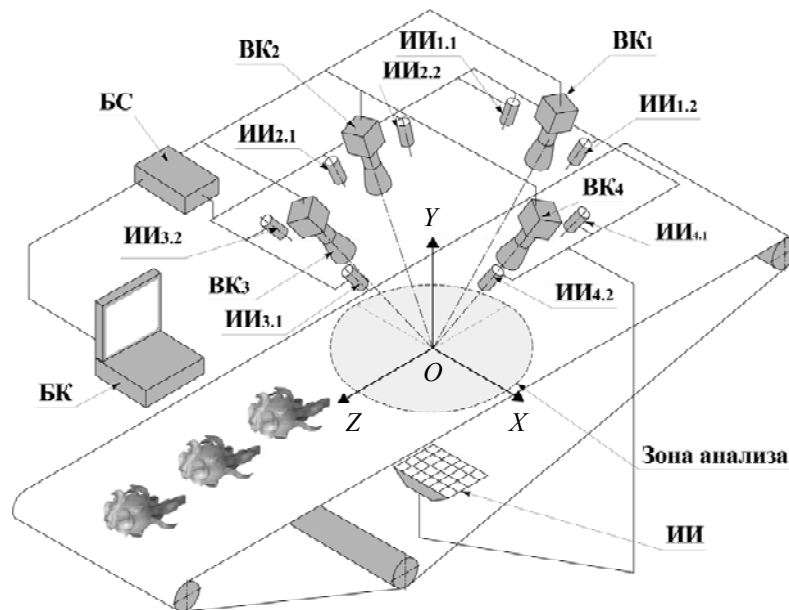


Рис. 1

Точка плода P_j с координатами (X_j, Y_j, Z_j) изображается на матричном приемнике ВК $_i$ точкой p_{ij} с координатами (u_{ij}, v_{ij}) ; $j=1, \dots, n$ — номер точки плода. Будем полагать, что погрешности координат точек изображения плода возникают исключительно из-за погрешностей в измерениях координат изображения [21, 22].

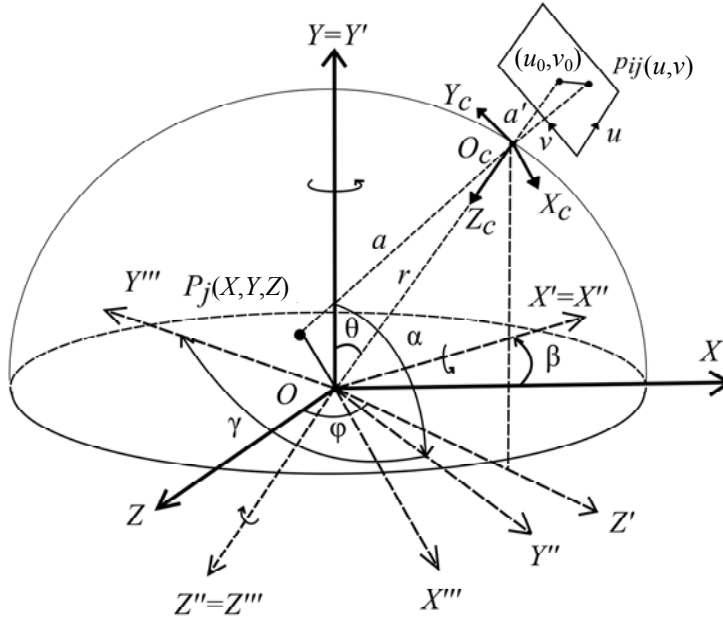


Рис. 2

В этом случае координаты (X_j, Y_j, Z_j) точки плода P_j в системе $OXYZ$ связаны с координатами (u_{ij}, v_{ij}) точки p_{ij} в плоскости изображений BK_i следующим образом:

$$\mathbf{q}_{ij} = \mathbf{M}_i \bullet \mathbf{Q}_j, \tag{1}$$

где $\mathbf{q}_{ij} = \begin{bmatrix} u_{ij} \\ v_{ij} \\ 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{Q}_j = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \\ 1 \end{bmatrix}$, \mathbf{M}_i — проективная матрица видеокамеры BK_i .

Проективная матрица \mathbf{M}_i описывает связь координат точек в пространстве объектов и координат их изображений в системе координат ВК с учетом двух операций поворота и сдвига:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{K}_i \bullet \mathbf{H} \bullet \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ \mathbf{S} & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

где $\mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} -a'_i / w & 0 & u_0 \\ 0 & -a'_i / h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ — матрица внутренних параметров BK_i , $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ —

единичная матрица, \mathbf{R} — матрица поворота, $\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ — вектор сдвига, $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ — нуле-

вой вектор, a'_i — расстояние от главной плоскости объектива BK_i до плоскости изображения на матрице, $w \times h$ — размер пиксела матрицы ВК, (u_0, v_0) — координаты центральной точки матрицы ВК, (t_x, t_y, t_z) — координаты точки O_c системы координат BK_i [23, 24].

Поворот от системы координат $OXYZ$ зоны анализа к системе координат, связанной с ВК, может быть описан с помощью матрицы \mathbf{R} , которую можно найти как последовательность поворотов вокруг оси OX на угол α , вокруг оси OY на угол β , вокруг оси OZ на угол γ [23]:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\gamma \cdot \mathbf{R}_\alpha \cdot \mathbf{R}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta - \sin \gamma \sin \alpha \sin \beta & -\sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta + \sin \gamma \sin \alpha \cos \beta \\ \sin \gamma \cos \beta + \cos \gamma \sin \alpha \sin \beta & \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta - \cos \gamma \sin \alpha \cos \beta \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Если оптическая ось ВК или ось OZ_C проходит через начало системы координат $OXYZ$, то операция поворота системы координат $OXYZ$ к системе координат ВК описывается поворотами $\alpha = \frac{\pi}{2} + \theta$, $\beta = \varphi$, $\gamma = \pi$ вокруг осей OX , OY , OZ . Вектор смещения $T = [0 \ 0 \ r]$.

Если связь внутренних и внешних параметров ВК определяется проективной матрицей камеры \mathbf{M}_i , то, согласно выражению (2), координаты точки изображения p_{ij} описываются выражениями [19, 20]:

$$u_{ij} = \frac{m_{11}^i X_j + m_{12}^i Y_j + m_{13}^i Z_j + m_{14}^i}{m_{31}^i X_j + m_{32}^i Y_j + m_{33}^i Z_j + m_{34}^i}, \quad v_{ij} = \frac{m_{21}^i X_j + m_{22}^i Y_j + m_{23}^i Z_j + m_{24}^i}{m_{31}^i X_j + m_{32}^i Y_j + m_{33}^i Z_j + m_{34}^i}, \quad (4)$$

где m_{11}^i — m_{34}^i — элементы матрицы \mathbf{M}_i .

После преобразований система уравнений (4) с учетом выражения (1) преобразуется к виду:

$$G = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} = f(g), \quad (5)$$

где $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_{ij} m_{31}^i - m_{11}^i & u_{ij} m_{32}^i - m_{12}^i & u_{ij} m_{33}^i - m_{13}^i \\ v_{ij} m_{31}^i - m_{21}^i & v_{ij} m_{32}^i - m_{22}^i & v_{ij} m_{33}^i - m_{23}^i \end{bmatrix}$, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} m_{14}^i - u_{ij} m_{34}^i \\ m_{24}^i - v_{ij} m_{34}^i \end{bmatrix}$, $G = \{Q_j\}$, $g = \{q_{ij}\}$.

Выражение (5) позволяет преобразовать координаты или функцию плотности распределения вероятности трехмерных координат точек плода в систему координат изображений точек на матрице ВК. В этом случае среднее значение или математическое ожидание функции плотности распределения вероятности трехмерных координат точек плода $E[G] = f(E[g])$ и ее ковариация ΛG описываются выражениями:

$$\Lambda G = \frac{\partial E[G]}{\partial g} \Lambda g \frac{\partial E[G]^T}{\partial g} \Leftrightarrow \Lambda G = \frac{\partial f(E[g])}{\partial g} \Lambda g \frac{\partial f(E[g])^T}{\partial g}. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет вычислить неопределенность координат трехмерной точки плода по неопределенности точек его изображения.

Для интерпретации матрицы Λg необходимо создать модель, описывающую границы области, в которой можно найти координаты точки изображения p_{ij} . Полагаем, что матрица ковариации Λg задается в диагональном виде, т.е. элементами диагонали матрицы являются

дисперсии координат точки p_{ij} на матрице приемника ВК по двум направлениям σ_u^2 и σ_v^2 [9]. Матрица ковариации $\Lambda \mathbf{g}$ описывает эллипс, внутри которого можно определить координаты изображения точки p_{ij} . Поскольку матрица $\Lambda \mathbf{g}$ уже определена, матрицу $\Lambda \mathbf{G}$ можно получить согласно формуле (6). Тогда неопределенность координат в пространстве расположения плода характеризуется эллипсоидом, полуоси которого соответствуют собственным значениям матрицы ковариации $\Lambda \mathbf{G}$. Критерием оптимизации точности восстановления трехмерных координат точек плода будет являться их оценочная функция [9]:

$$F = \min \left(\max_{k=1,2,3} (\Lambda \mathbf{G}_{kk}) \right), \quad (7)$$

где $\max(\Lambda \mathbf{G}_{kk})$ — максимальное диагональное значение ковариационной матрицы, \min — оператор, который найдет минимальное значение функции в скобках, k — номер элемента матрицы $\Lambda \mathbf{G}$.

В предлагаемой схеме ориентацию ВК системы при фиксированном расстоянии до ВК_{*i*} целесообразно описать величинами $(\theta_1, \varphi_1, \dots, \theta_i, \varphi_i)$.

Для того чтобы решить задачу минимизации погрешности определения координат точек контролируемых плодов, предлагается использовать генетический алгоритм [9, 25—27], в котором оценочная функция (7) позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные.

Результаты моделирования. В процессе исследований проводилась оптимизация пространственного расположения видеокамер ОЭСОС по критерию обеспечения требуемой погрешности определения формы плода с применением генетического алгоритма. Исследуемая ОЭСОС состоит из четырех видеокамер, расположенных на расстоянии $r = 500$ мм от зоны анализа (см. рис. 2), и имеет следующие параметры: фокусное расстояние объектива 8 мм; угловое поле 50° ; разрешение матрицы фотоприемника 1600×1200 пикселей; размер пиксела 5×5 мкм. Зададимся погрешностью определения изображений исследуемых точек на матрице ВК $\sigma = 18$ мкм [28].

При исследовании полученных результатов кроме значения оценочной функции необходимо также обеспечивать, чтобы одна ВК не перекрывала другую. Так положение каждой ВК_{*i*} предложено ориентировать в одном из четырех сегментов пространства, которые определяются углами θ и φ (см. рис. 2), изменяющимися в пределах $0^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$, $0^\circ \leq \varphi_1 \leq 90^\circ$, $91^\circ \leq \varphi_2 \leq 180^\circ$, $181^\circ \leq \varphi_3 \leq 270^\circ$, $271^\circ \leq \varphi_4 \leq 360^\circ$.

Используемый генетический алгоритм для решения задачи оптимизации местоположения видеокамеры состоит из следующих шагов (рис. 3):

- шаг 1: генерация случайной конфигурации системы, состоящей из требуемого числа камер;
- шаг 2: расчет максимальной диагональной величины матрицы $\Lambda \mathbf{G}$ и ее сохранение как лучшего значения оценочной функции;
- шаг 3: выбор базовых значений углов и их комбинация для получения нового варианта размещения;
- шаг 4: составление новой популяции из вариантов размещения предшествующего шага, которые дают лучшие значения оценочной функции;
- шаг 5: повтор шагов 2—4 до выполнения условия остановки алгоритма или оптимального решения по погрешности определения координат точек плода.

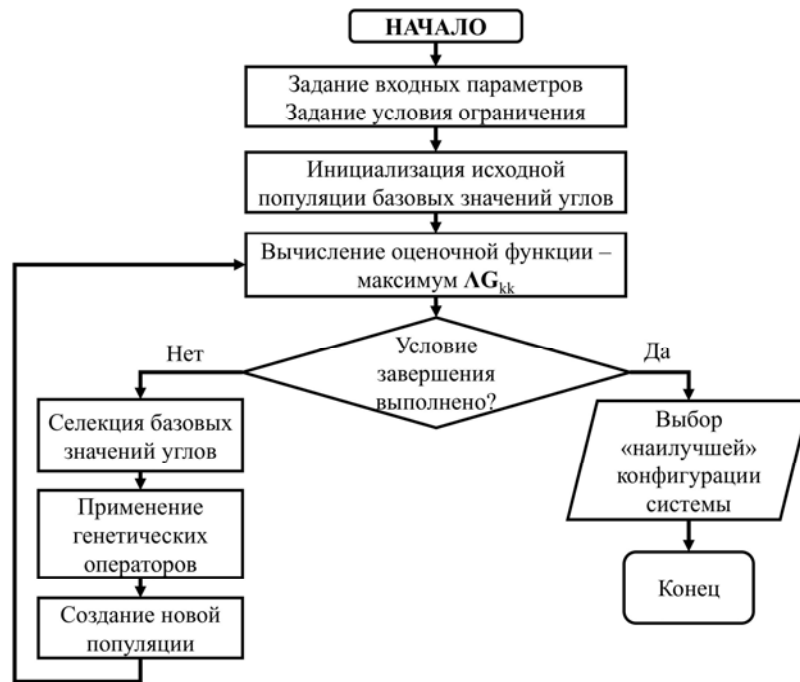


Рис. 3

Как правило, чем больше размер популяции, т.е. множество значений углов пространственного расположения видеокамер, в котором ищется решение, тем точнее определяется оптимальная конфигурация системы. Однако при большом размере популяции время, требуемое для получения конечного результата, значительно увеличивается.

Оценочная функция практически сходится после 50 поколений (рис. 4), при этом минимальное значение функции составляет 3,5 мкм на расстоянии от центра контролируемой зоны до видеокамеры $r = 500$ мм. Для многокамерной системы ОЭСОС, которая работает на расстоянии от зоны анализа в диапазоне от 500 до 1000 мм, величина оценочной функции не превышает 7,3 мкм. При увеличении расстояния до 1500 мм минимальное значение функции может достигать 13 мкм.

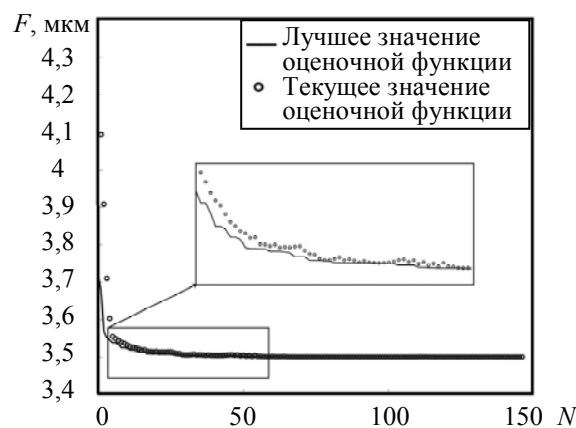


Рис. 4

Имитационное исследование по оптимизации пространственного расположения видеокамер осуществляется генетическим алгоритмом, встроенным в среду MATLAB, со следующими входными параметрами (см. рис. 3): неизвестные входные алгоритма — $\theta_1, \varphi_1, \dots, \theta_4, \varphi_4$; размер популяции 30 особей; вероятность селекции 0,7; вероятность мутации 0,005; метод селекции — турнирный [25].

Исследуя профиль зависимости оценочной функции видеокамеры $ВК_1$ для 30 особей от азимутального угла φ (рис. 5), в заданных условиях ограничения (8) и (9) можно наблюдать

минимум в районе 56° . В отличие от профиля зависимости оценочной функции от азимутального угла на профиле зависимости оценочной функции от полярного угла θ (рис. 6) практически невозможно различить минимум оценочной функции. Характер зависимости оценочной функции от азимутального и полярного углов можно более подробно рассматривать с помощью трехмерного графика (рис. 7). При фиксировании значения полярного угла, за счет изменения азимутального угла, оценочная функция достигает минимума только в одной точке. Для VK_1 минимальное значение оценочной функции достигается в точке с полярным углом $\theta = 45^\circ$ и азимутальным $\varphi = 56^\circ$ (рис. 7).

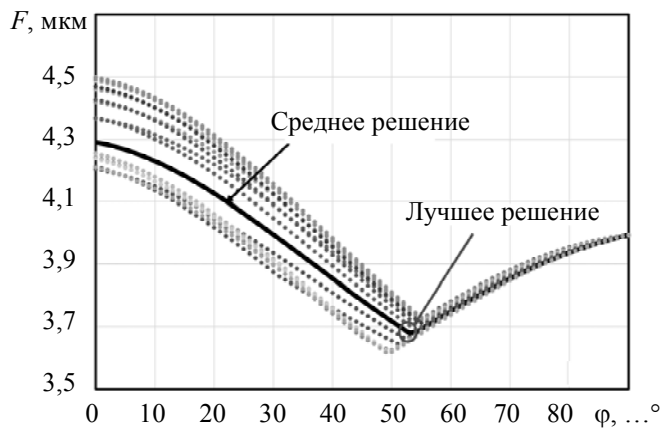


Рис. 5

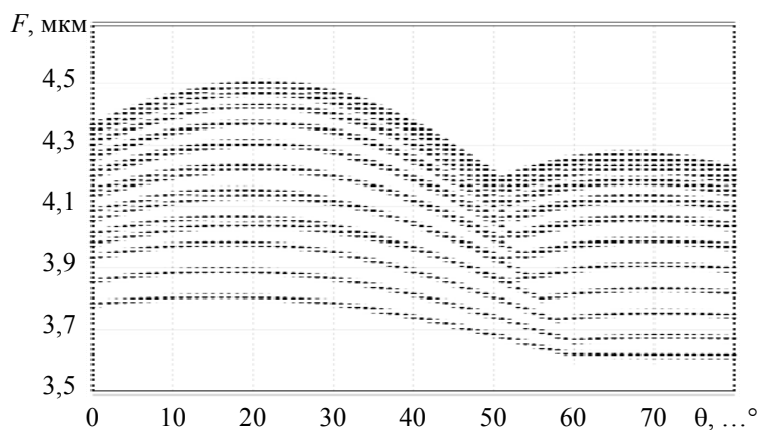


Рис. 6

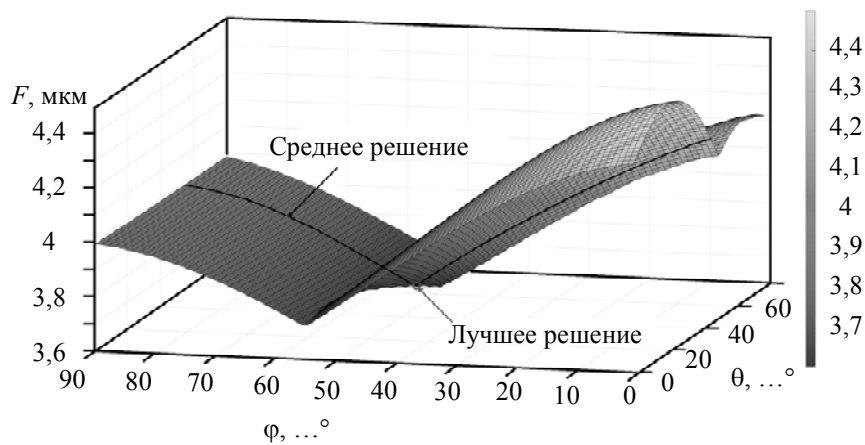


Рис. 7

Применение генетического алгоритма с популяцией в 30 особей позволяет получить оптимальную конфигурацию исследуемой системы по критерию минимизации значения

оценочной функции погрешности определения трехмерных координат точек плода. Результаты моделирования представлены в таблице.

| Камера | θ, \dots° | φ, \dots° |
|--------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 45,2 | 56,2 |
| 2 | 26,1 | 146,6 |
| 3 | 20,2 | 229,6 |
| 4 | 62,0 | 342,2 |

Заключение. Предложена структура оптико-электронной системы обеспечения сортировки плодов сложной формы, содержащая четыре видеокamеры и совокупность управляемых источников импульсного освещения, блока синхронизации и базового компьютера. Использование четырех видеокamер позволяет увеличить поле обзора системы.

Применение генетического алгоритма позволяет оптимизировать расположение видеокamер по критерию обеспечения требуемой погрешности определения формы плода.

Имитационное моделирование работы системы с четырьмя видеокamерами показало, что для диапазона дистанций от 500 до 1000 мм, при погрешности размеров формы плодов не более 18 мкм, в предлагаемом генетическом алгоритме достаточно использовать популяцию из 30 особей.

Работа финансируется Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант 08-08).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mccarthy C. L., Hancock N. H., Raine S. R.* Applied machine vision of plants: A review with implications for field deployment in automated farming operations // *Intel. Serv. Robot.* 2010. N 3. P. 209—217.
2. *Rachmawati E., Supriana I., Khodra M. L.* Toward a new approach in fruit recognition using hybrid RGBD features and fruit hierarchy property // 4th Intern. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI). 2017. P. 1—6 [Электронный ресурс]: <<https://doi.org/10.1109/EECSI.2017.8239110>>.
3. *Cerfontaine P. A., Schirski M., Bundgens D., Kuhlen T.* Automatic multi-camera setup optimization for optical tracking // *Proc. of the IEEE Conf. on Virtual Reality.* March 2006. P. 295—296.
4. *Scott W. R.* Model-Based View Planning // *Machine Vision and Applications.* 2009. Vol. 20, N 1. P. 47—69.
5. *Rosell J. R., Sanz R.* A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities // *Comput. Electron. Agric.* 2012. Vol. 81. P. 124—141.
6. *Khojastehnazhand M., Omid M., Tabatabaefar A.* Determination of tangerine volume using image processing methods // *Intern. J. Food Prop.* 2010. Vol. 13, N 4. P. 760—770.
7. *Динь Б. М., Коротаев В. В., Тимофеев А. Н.* Построение оптико-электронных каналов для сортировки фруктов по форме, размеру и цвету // *Альманах молодых ученых Университета ИТМО.* 2020. Т. 4. С. 51—56.
8. *Khojastehnazhand M., Omid M., Tabatabaefar A.* Development of lemon sorting system based on color and size // *Afr. J. Plant Sci.* 2010. Vol. 4, N 4. P. 122—127.
9. *Olague G., Mohr R.* Optimal camera placement to obtain accurate 3d point positions // 14th Intern. Conf. on Pattern Recognition. Brisbane, Australia, APRS and IAPR. 16–20 August 1998. Vol. I. P. 8—10.
10. *Dinh B. M., Konyakhin I. A., Timofeev A. N., Korotaev V. V.* Increasing the reliability of decision making by improving the characteristics of optoelectronic channels ensuring the separation of complex shape fruit // *Smart Electromechanical Systems.* April 2021. P. 229—240. DOI:10.1007/978-3-030-68172-2_19.
11. *Rosten E., Porter R., Drummond T.* Faster and better: A machine learning approach to corner detection // *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 2010. Vol. 32. P. 105—119.
12. *Li L., Zhang Q., Huan D.* A review of imaging techniques for plant phenotyping // *Sensors.* 2014. Vol. 14. P. 20078—20111.

13. Brandily M. L., Monbet V., Bureau B., Boussard-Plédel C., Loréal O., Adam J. L., Sire O. Identification of foodborne pathogens within food matrices by IR spectroscopy // *Sens Actuators B*. 2011. Vol. 160. P. 202—206.
14. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O. L., Blasco J. Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment // *Food and Bioprocess Technology*. 2012. Vol. 5, N 4. P. 1121—1142. DOI:10.1007/s11947-011-0725-1.
15. Gongal A., Amatya S., Karkee M., Zhang Q., Lewis K. Sensors and systems for fruit detection and localization: a review // *Comput. Electron. Agric.* 2015. Vol. 116. P. 8—19. DOI:10.1016/j.compag.2015.05.021.
16. Sachdeva V. D., Fida E., Baber J., Bakhtyar M., Dad I., Atif M. Better object recognition using bag of visual word model with compact vocabulary // *Proc. 13th Intern. Conf. on Emerging Technologies (ICET)*. Islamabad, Pakistan, 27—28 December 2017. P. 1—4.
17. Noordam J. C., Hemming J., Van Heerde C., Golbach F., Van Soest R., Wekking E. Automated rose cutting in greenhouses with 3D vision and robotics: Analysis of 3D vision techniques for stem detection // *Acta Horticulturae*. Belgium, Leuven: ISHS, 2005. Vol. 691. P. 885—889.
18. Динь Б. М., Тимофеев А. Н., Коротаев В. В., Ярышев С. Н. Особенности преобразования информации в многоканальных оптико-электронных системах при сепарации фруктов сложной формы // XIV Междунар. конф. „Прикладная оптика-2020“: сб. трудов. 15—18 декабря 2020 г. [Электронный ресурс]: <<http://valentin.davydov.spb.su/PO2020/Ming.pdf>>.
19. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
20. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
21. Brown D. C. Application of close-range photogrammetry to measurements of structures in orbit. Technical Report 80-012. Melbourne Florida, Geodetic Services Incorporated. 15 September 1980. Vol. 1. 131 p.
22. Fraser C. S. Limiting error propagation in network design // *Photogramm. Eng. Remote Sensing*. 1987. Vol. 48, N 4. P. 561—570.
23. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. 197 с.
24. Hoang V. P., Konyakhin I. A., Turgalieva T. V., Liu F. Autocollimating system for precise measuring of three angular coordinates // *Proc. of SPIE — The Intern. Society for Optical Engineering. Optical Sensing and Detection*. 2018. P. 106802C.
25. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейтронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие систем / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия-Телеком, 2013. 384 с.
26. Гладков Л. А., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Генетические алгоритмы / Под ред. В. М. Курейчика. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
27. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.
28. Андреев А. Л. Моделирование и расчет автоматизированных видеоинформационных систем наблюдения за объектами. Методические указания к лабораторным работам. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 82 с.

Сведения об авторах

- Ба Минь Динь** — аспирант; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: bmdinh@itmo.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: vvkorotaev@itmo.ru
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: timofeev@ifmo.ru
- Татьяна Валерьевна Тургалиева** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, инженерно-исследовательский факультет; E-mail: tvturgalieva@itmo.ru

Поступила в редакцию
17.05.2021 г.

Ссылка для цитирования: Динь Б. М., Тимофеев А. Н., Коротаев В. В., Тургалиева Т. В. Мультикамерная система определения размера плодов сложной формы // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 8. С. 656—666.

MULTI-CAMERA SYSTEM FOR DETERMINING COMPLEX-SHAPE FRUIT SIZE

B. M. Dinh, A. N. Timofeev, V. V. Korotaev, T. V. Turgalieva

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

E-mail: bmdinh@itmo.ru

The structure of an optoelectronic system for ensuring the separation of fruits of complex shape according to their geometric parameters is proposed. A genetic algorithm developed to solve the problem of optimizing location of the video cameras in the corresponding segments of space according to the criterion of ensuring the required error in determining the fruit shape is described and tested. Simulation modeling of the system performance with four video cameras shows that for restoring the shape of fruits with an error of 18 microns, it is sufficient to use a population of 30 individuals in the genetic algorithm. Parameters of spatial orientation of the four video cameras located at a distance of 500 mm from the fruit are found for estimated error of 3.5 μm in restoring three-dimensional coordinates of the points on the fruit surface.

Keywords: non-contact control, optoelectronic system, spatial arrangement of video cameras, genetic algorithm, image processing, estimation geometric parameters, fitness function, fruit sorting

REFERENCES

1. McCarthy C.L., Hancock N.H., Raine S.R. *Intel. Serv. Robot.*, 2010, no. 3, pp. 209–217.
2. Rachmawati E., Supriana I., Khodra M.L. *4th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI)*, September 1–6, 2017, <http://ieeexplore.ieee.org/document/8239110/>, <https://doi.org/10.1109/EECSI.2017.8239110>.
3. Cerfontaine P.A., Schirski M., Bundgens D., Kuhlen T. *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality*, March 2006, pp. 295–296.
4. Scott W.R. *Machine Vision and Applications*, 2009, no. 1(20), pp. 47–69.
5. Rosell J.R., Sanz R. *Comput. Electron. Agric.*, 2012, vol. 81, pp. 124–141.
6. Khojastehnazhand M., Omid M., Tabatabaefar A. *Intern. J. Food Prop.*, 2010, no. 4(13), pp. 760–770.
7. Dinh B.M., Korotaev V.V., Timofeev A.N. *Almanac of Young Scientists of ITMO University*, 2020, vol. 4, pp. 51–56. (in Russ.)
8. Khojastehnazhand M., Omid M., Tabatabaefar A. *Afr. J. Plant Sci.*, 2010, no. 4(4), pp. 122–127.
9. Olague G., Mohr R. *14th International Conference on Pattern Recognition*, Brisbane, Australia, APRS and IAPR, August 16–20, 1998, vol. 1, pp. 8–10.
10. Dinh B.M., Konyakhin I.A., Timofeev A.N., Korotaev V.V. *Smart Electromechanical Systems*, April 2021, pp. 229–240, DOI:10.1007/978-3-030-68172-2_19.
11. Rosten E., Porter R., Drummond T. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intel.*, 2010, vol. 32, pp. 105–119.
12. Li L., Zhang Q., Huan D. *Sensors*, 2014, vol. 14, pp. 20078–20111.
13. Brandily M.L., Monbet V., Bureau B., Boussard-Plédel C, Loréal O, Adam J.L, Sire O. *Sens. Actuators B*, 2011, vol. 160, pp. 202–206.
14. Lorente D., Aleixos N., Gómez-Sanchis J., Cubero S., García-Navarrete O.L., Blasco J. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, no. 5(4), pp. 1121–1142, DOI:10.1007/s11947-011-0725-1.
15. Gongal A., Amatya S., Karkee M., Zhang Q., Lewis K. *Comput. Electron. Agric.*, 2015, vol. 116, pp. 8–19, DOI:10.1016/j.compag.2015.05.021.
16. Sachdeva V.D., Fida E., Baber J., Bakhtyar M., Dad I., Atif M. *Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, Islamabad, Pakistan, December 27–28, 2017, pp. 1–4.
17. Noordam J.C., Hemming J., Van Heerde C., Golbach F., Van Soest R., Wekking E. *Acta Horticulturae*, Leuven, Belgium, ISHS, 2005, vol. 691, pp. 885–889.
18. <http://valentin.davydov.spb.su/PO2020/Ming.pdf>. (in Russ.)
19. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 2008, 954 p.
20. Shapiro L., Stockman G. *Computer Vision*, Pearson Education, 2001.
21. Brown D.C. *Application of close-range photogrammetry to measurements of structures in orbit*, Technical Report 80-012, Geodetic Services Incorporated, Melbourne Florida, September 15, 1980, vol. 1, 131 p.
22. Fraser C.S. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*, 1987, no. 4(48), pp. 561–570.
23. Dzhabiev A.N., Konyakhin I.A., Pankov E.D. *Avtokollimatsionnyye ugloizmeritel'nyye sredstva monitoringa deformatsiy* (Autocollimation Angle Measuring Devices for Deformation Monitoring), St. Petersburg, 2000, 197 p. (in Russ.)
24. Hoang V.P., Konyakhin I.A., Turgalieva T.V., Liu F. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5, Optical Sensing and Detection V, 2018, pp. 106802C.
25. Rutkowska D., Pilinski M., Rutkowski L. *Sięci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte*, Warszawa, Łódź, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2004.
26. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskiye algoritmy* (Genetic Algorithms), Moscow, 2006, 320 p. (in Russ.)

27. Emelyanov V.V., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya* (Theory and Practice of Evolutionary Modeling), Moscow, 2003, 432 p. (in Russ.)
28. Andreev A.L. *Modelirovaniye i raschet avtomatizirovannykh videoinformatsionnykh sistem nablyudeniya za ob"yektami* (Modeling and Calculation of Automated Video Information Systems for Monitoring Objects), St. Petersburg, 2013, 82 p. (in Russ.)

Data on authors

- Bha Minh Dinh** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: bmdinh@itmo.ru
- Valery V. Korotaev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: vvkorotaev@itmo.ru
- Alexander N. Timofeev** — PhD, Senior Researcher; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: timofeev@ifmo.ru
- Tatiana V. Turgalieva** — PhD; ITMO University, Faculty of Engineering Research; E-mail: tvturgalieva@itmo.ru

For citation: Dinh B. M., Timofeev A. N., Korotaev V. V., Turgalieva T. V. Multi-camera system for determining complex-shape fruit size. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 8. P. 656—666 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-8-656-666