

Алгоритмы контрастного автофокуса для поиска дефектов в АПАК

В отечественном производстве изделий электронной техники (ИЭТ) с автоматизированным программно-аппаратным комплексом (АПАК) визуального поиска дефектов применяются системы машинного зрения (СМЗ) с технологией искусственного интеллекта («Электронные компоненты» № 2–12'2025, 1–3'2026). При таком подходе растут производительность труда и выход годных изделий, повышается репутация предприятия.

**Дарья Дормидошина¹,
Юрий Евстифеев¹,
К. Т. Н.,
Константин Иванов¹,
Юрий Рубцов¹**

В оптическую часть СМЗ входят камера, объектив и подсветка в случае недостатка освещения. Эти комплектующие должны соответствовать всем функциональным требованиям, иначе проведение автоматического визуального анализа потеряет смысл, поскольку качество изображений, необходимое для обнаружения нужных объектов, не будет достигнуто.

Без нужной камеры невозможно достичь требуемого соотношения скорости передачи изображения и его разрешения, что вызовет пропуск системой мелких деталей. Без подходящего объектива не удастся получить четкое изображение на матрице камеры, что приведет к недостатку или искажению информации об inspected объекте. Без необходимого освещения даже самая дорогая камера и качественный объектив не смогут выделить интересующие признаки объекта из-за неправильной интенсивности света: при слишком слабом свете детали теряются в тени, а при слишком ярком пропадают в засветках.

В статье рассматриваются виды и свойства объективов в СМЗ, методы автофокусов; особое внимание уделяется контрастному автофокусу и его алгоритмической реализации, приводятся результаты сравнения и практического использования алгоритмов контрастного автофокуса в СМЗ для АПАК на примере поиска дефектов в пластине диаметром 300 мм для изготовления микросхем.

Объективы для СМЗ

Существуют разные объективы, и выбор конкретного типа диктуется не столько бюджетом, сколько физикой процесса измерений. К свойствам объектива, напрямую влияющих на точность автоматического визуального анализа и на работу всей СМЗ, относятся:

- фокусное расстояние, определяющее угол обзора и масштаб изображения;
- разрешающая способность, от которой зависит уровень детализации изображения;

- рабочий отрезок или рабочее расстояние — дистанция от объектива до объекта, на которой обеспечивается оптимальный фокус и заданный масштаб изображения;
- глубина резкости (глубина резко изображаемого пространства, ГРИП) — совокупность расстояний от объектива до объекта, в котором последний воспринимается резким;
- дисторсия — геометрические искажения, которые приводят к искривлению прямых линий изображения, придавая ему «подушкообразную» или «бочкообразную» форму.

Оперируя значениями данных свойств, можно найти их оптимальное сочетание для решения поставленной задачи. Однако стоит понимать, что универсального баланса свойств не существует и каждый производственный случай требует индивидуального подбора объектива.

В СМЗ чаще всего используются специальные промышленные объективы с фиксированным фокусным расстоянием: они дают меньшую дисторсию и имеют большую разрешающую способность, что позволяет выполнять оптическую инспекцию с высокой точностью. Для автоматического визуального контроля в большинстве случаев константного фокусного расстояния вполне достаточно, при этом благодаря относительно простой оптической схеме рассматриваемые объективы отличаются компактностью — это упрощает интеграцию системы в стесненные условия производственных линий.

Однако обычные объективы с фиксированным фокусным расстоянием не пригодны для сверхточного автоматизированного измерения, поскольку они работают по принципу человеческого глаза: удаленные объекты кажутся меньше, а близкие — крупнее. Это объясняется тем, что главные лучи неосевых пучков света проходят через центр системы под углом к оси. Таким образом, угол, под которым объект «виден» объективу, меняется с расстоянием: чем объект ближе, тем больше угол и крупнее его проекция на сенсоре. Если исследуемая область объекта запол-

няет все поле зрения объектива, но интересующие части находятся в разных плоскостях, любое изменение дистанции приведет к изменению масштаба и, как следствие, к ошибке измерений. В таких случаях оптимальным решением становятся телецентрические объективы. Они также относятся к классу объективов с фиксированным фокусным расстоянием, но имеют одну отличительную особенность. Главные лучи неосевых световых пучков параллельны оптической оси, поскольку общая точка, через которую они проходят, удалена в бесконечность. Это обеспечивает независимость увеличения от расстояния до предмета и формирует изображение в ортогональной проекции. Именно телецентрические объективы применяются в прецизионной метрологии.

У объективов с фиксированным фокусным расстоянием есть и недостатки. Главный из них следует из самого определения: такие объективы рассчитаны на фиксированное рабочее расстояние до объекта. Обычно это не вызывает проблем при эксплуатации, однако перед началом автоматического визуального анализа необходима калибровка этого расстояния оператором вручную, к тому же нельзя исключать человеческий фактор, поскольку даже опытный инженер-технолог может допустить ошибки в данной настройке. Это объясняется субъективным контролем резкости, ограниченными возможностями человеческого зрения, которое отличается от машинного, невозможностью получить изображение с оригинальным качеством из-за небольших размеров монитора, а также отсутствием или неточностью измерительных приборов у оператора. Если перед началом инспекции фокусное расстояние будет задано неверно, работа системы окажется не только бессмысленной, но и вредной, поскольку приведет к ложным результатам. В системах автоматического визуального контроля это может означать брак годных изделий и пропуск бракованных. Это, в свою очередь, влечет экономические и репутационные потери компании-производителя.

Однако даже при точной начальной калибровке фокусного расстояния нельзя гарантировать стабильное качество изображений и точность измерений в процессе инспекции. Это связано с технологическим разбросом высот исследуемых объектов — например, проверяемые детали на конвейере могут иметь неровности в пределах допуска плоскостности, из-за чего их фактическая высота отличается от расчетной. Для не телецентрических объективов это критично, поскольку масштаб изображения меняется и геометрические размеры одной и той же детали на разных кадрах варьируются.

Кроме того, ГРИП рассматриваемых объективов ограничена и небольшие отклонения от установленного фокусного расстояния могут вызвать падение резкости и привести к заметному ухудшению качества изображения. Из этого следует важный вывод: если технологический разброс высот инспектируемых деталей выходит за рамки ГРИП, то часть объектов или их элементов окажется вне зоны резкости. В таком случае для получения качественного изображения требуется индивидуальная проверка резкости для каждого объекта и при необходимости корректировка рабочего расстояния перед съемкой.

Следует понимать, что иным способом улучшить качество изображения объективов с постоянным фокусным расстоянием, не получится из-за их конструкции: в ней отсутствует специальный фокусирующий механизм. Изменение рабочего расстояния — единственный способ сохранить резкость для данных объективов. Для не телецентрических объективов это еще и единственный способ удержать стабильный масштаб изображения.

Способы корректировки рабочего расстояния объективов

Начальное определение, или корректировка рабочего расстояния объектива, — процесс рутинный, трудоемкий, требующий от оператора-технолога высокой усидчивости, поэтому разумнее всего автоматизировать данную процедуру. Для этого в СМЗ вводится программно-управляемый механизм перемещения камеры по оси Z. Благодаря специальным алгоритмам он задает рабочее расстояние объектива и производит его корректировку непосредственно в процессе визуального анализа.

В настоящее время существуют разные технологии автоматической фокусировки. Прежде чем перейти к обзору конкретных примеров, необходимо отметить, что все системы автофокуса делятся на два типа: активные и пассивные.

Активные системы используют встроенные в камеру излучатели, которые посылают сигнал в сторону объекта. Затем приемники фиксируют отраженный сигнал и по времени его возвращения система вычисляет дистанцию до объекта съемки. Главное преимущество таких систем в том, что они не зависят от условий освещения. Среди недостатков выделяют ограниченную дальность действия и невозможность точной фокусировки через прозрачные преграды, поскольку сигнал может отражаться или преломляться.

Пассивные системы не имеют собственных излучателей. Они анализируют естественный свет, который попадает в камеру от объекта съемки. У таких систем нет ограничений по дальности, они хорошо работают через стекло, но становятся малоэффективными в условиях недостаточной освещенности или при съемке монотонных, низкоконтрастных поверхностей.

К основным методам автофокусировки относятся:

- контрастный автофокус (пассивный), основанный на анализе изображения на матрице камеры и поиске положения объектива с максимальным контрастом между соседними элементами. Он не требует отдельных датчиков и является недорогим решением;
- фазовый автофокус (пассивный), основанный на разделении светового потока, проходящего через объектив, на два потока, которые направляются на парные сенсоры для построения изображений. Анализ разности фаз этих изображений позволяет мгновенно определить направление и величину смещения объектива для достижения резкости. Данный метод обладает высокой скоростью, но критически зависит от светосилы объектива;
- гибридный автофокус (пассивный), объединяющий фазовый и контрастный методы. Фазовые сенсоры размещаются на матрице для быстрой предварительной фокусировки с последующей корректировкой контрастным методом. В данном методе оптимально сочетаются скорость и точность;
- лазерный автофокус (активный), основанный на принципе лазерного дальномера. Излучатель посылает луч к объекту, приемник фиксирует время возвращения, процессор вычисляет расстояние. Такой автофокус незаменим при слабом освещении и работе с низкоконтрастными объектами.

Далее рассмотрен метод контрастного автофокуса и два алгоритма его реализации.

Контрастный автофокус и его алгоритмическая реализация

Контрастный автофокус — наиболее простое и доступное решение с точки зрения аппаратной реализации, не требующее дополнительных датчиков-приемников, разделения на световые потоки или излучателей, что существенно снижает стоимость СМЗ и упрощает ее конструкцию. Платой за аппаратную простоту становится алгоритмическая сложность. В отличие от фазового или лазерного методов с прямым измерением дистанции, контрастный автофокус работает итеративно, посредством поиска экстремума контрастности. Именно программно-алгоритмическая часть здесь выходит на первый план, тогда как в других технологиях основная сложность смещена в сторону аппаратных компонентов.

Прежде чем перейти к конкретным примерам алгоритмов контрастного автофокуса, необходимо рассмотреть способы измерения резкости изображения, которые лежат в основе любого такого алгоритма. Наиболее распространенные подходы реализованы на базе дискретных операторов, вычисляющих градиент яркости. Среди них выделяются оператор Лапласа (лапласиан), оператор Собеля и оператор Кэнни. Все они работают с масками свертки — небольшими матрицами (например, 3×3), которые применяются к каждому пикселю изображения для выделения перепадов яркости. Результатом работы дискретных операторов является число, которое служит показателем резкости изображения. Оно вычисляется как сумма или среднее значение градиентов по всем пикселям кадра. Чем больше это число, тем больше перепадов яркости зафиксировано, следовательно, изображение считается более резким, и наоборот, низкие значения соответствуют размытому, нерезкому кадру.

Важно отметить, что данные алгоритмы давно реализованы и оптимизированы. Они входят в состав библиотек компьютерного зрения,

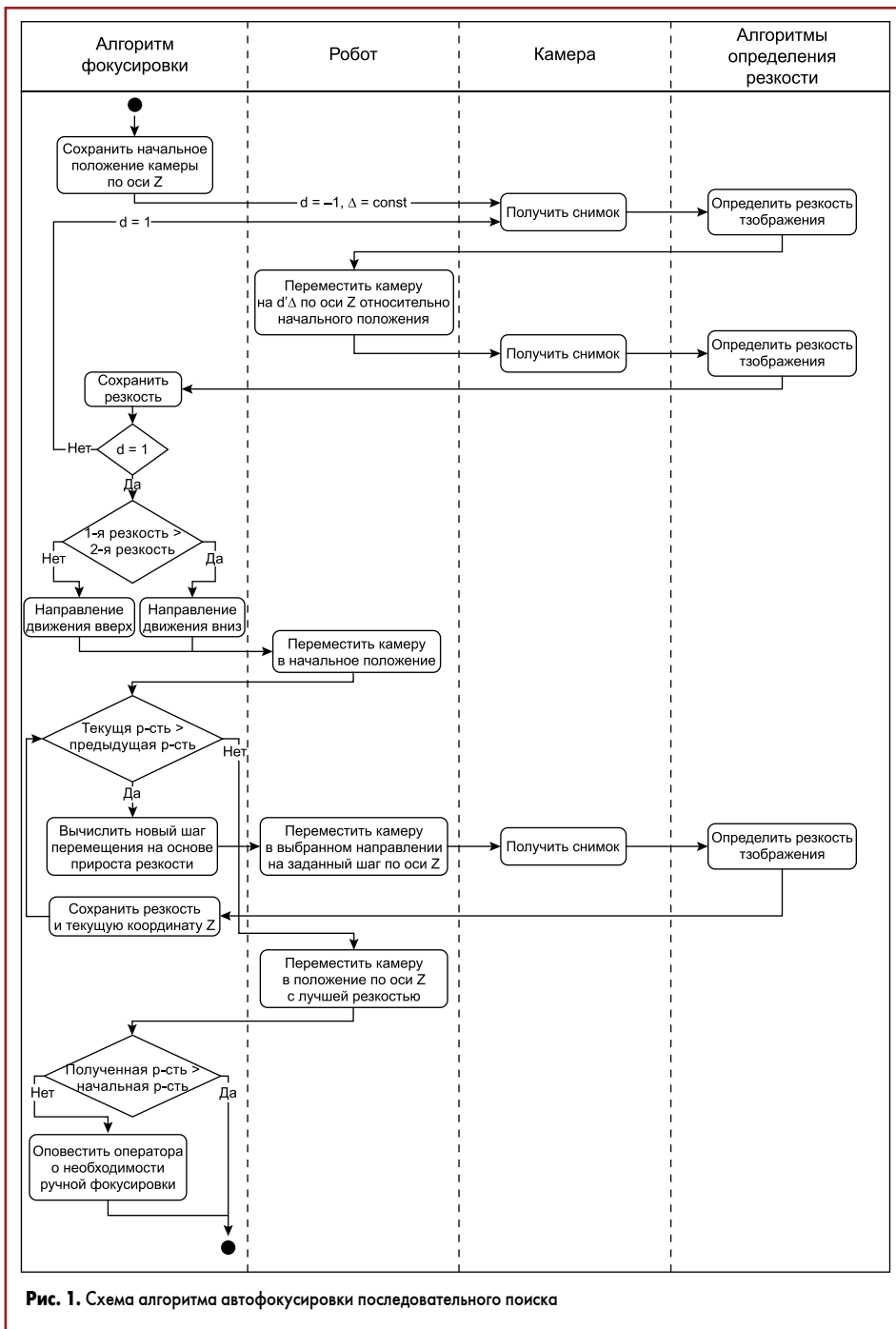


Рис. 1. Схема алгоритма автофокусировки последовательного поиска

таких как OpenCV, и доступны для использования на различных языках программирования: Python, C++, Java и других. Это позволяет программисту не реализовывать их с нуля, а сосредоточиться на общей логике автофокуса.

Алгоритм поиска экстремума резкости с адаптивным шагом А1

В начале данного алгоритма сохраняется координата Z исходного положения камеры относительно оптической оси, а также резкость изображения на данном фокусном расстоянии. Это нужно для того, чтобы в конце алгоритма можно было сравнить резкость изображения на полученном рабочем расстоянии с ее начальной величиной.

На следующем этапе определяется направление движения камеры вдоль оптической оси для поиска наилучшего показателя резкости.

Система делает два пробных шага камеры от ее исходной позиции: один вверх, другой вниз на заданную величину Δ. В обеих точках измеряется резкость, и направление выбирается в ту сторону, где ее значение оказалось выше. Однако если величины резкости отличаются незначительно, шаг Δ уменьшается и процедура повторяется, пока не будет получено существенное различие значений резкости в рассматриваемых точках.

После того как направление задано, камера возвращается к начальной координате и приступает к последовательному перемещению с определенным начальным шагом. На каждом шаге выполняется оценка резкости и ее сравнение с результатом предыдущей итерации. В зависимости от величины прироста резкости шаг может корректироваться: чем активнее рост, тем крупнее шаг, и наоборот. Если очередное значение резкости ниже предыдущего, значит,

экстремум пройден и поиск пошел на регресс. В таком случае перемещение камеры завершается, и камера возвращается на позицию, где была зафиксирована наилучшая резкость.

На последнем этапе выполняется сравнение достигнутого значения резкости с исходным. Если оно превышает начальное, автофокусировка считается успешной. В противном случае камера возвращается в исходное положение, работа системы приостанавливается, а оператор получает уведомление о необходимости ручной фокусировки.

Дополнительным механизмом повышения надежности алгоритма служит введение эталонного значения резкости. Оно может быть задано в процессе калибровки системы: после успешного выполнения автофокусировки оператор подтверждает результат и достигнутое значение резкости сохраняется как эталон. В дальнейшем при динамической коррекции рабочего расстояния полученная резкость сравнивается с эталоном. Например, если алгоритму не удается достичь не менее 90% эталонного значения резкости кадра, выполнение процедуры автофокуса признается неуспешным и она может быть повторена.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема данного алгоритма.

Алгоритм бинарного поиска экстремума резкости с дроблением интервала А2

Второй алгоритм автофокуса базируется на тех же начальных этапах, что и первый: фиксируется исходная координата Z0 и соответствующее ей значение резкости, после чего выполняется определение направления движения камеры путем пробных перемещений на величину Δ. Основное отличие заключается в стратегии поиска экстремума резкости после выбора направления.

Когда направление определено, камера начинает последовательное перемещение с постоянным шагом. На каждой итерации вычисляется текущее значение резкости и сравнивается с предыдущим. Когда очередное значение оказывается ниже предшествующего, значит, пик функции резкости пройден. Последовательное движение камеры в одном направлении завершается.

Далее выполняется локализация экстремума. Фиксируется координата Z_{max}, соответствующая максимальному зарегистрированному значению резкости, и определяются две соседние с ней точки. Если первоначально имеется только две точки (исходная и одна пробная), производится дополнительное перемещение в середину между ними, затем в данной точке выполняется измерение резкости. Таким образом формируется массив из трех точек, необходимых для дальнейшего анализа.

Поиск экстремума реализуется по принципу бинарного сокращения интервала. Имея три точки, образующие два смежных отрезка, алгоритм сравнивает значения резкости на их концах. Отрезок, крайняя точка которого имеет более высокую резкость, сохраняется для дальнейшего исследования, а противопо-

ложный отрезок исключается. Оставшийся интервал делится пополам, и в его средней точке производится измерение резкости. Таким образом формируется новая тройка точек, и итерация повторяется.

В случае, когда разность значений резкости на границах сравниваемых отрезков не превышает порогового значения (например, 30%), выполняется дополнительное дробление: каждый из отрезков делится на равные части и резкость измеряется в их серединах. Выбирается тот отрезок, где зафиксировано более высокое значение. Это позволяет снизить влияние погрешностей, возникающих при измерении резкости на концах отрезков, и повысить достоверность выбора направления при неоднозначной картине. Процесс продолжается до тех пор, пока длина исследуемого интервала не станет меньше минимально допустимого шага перемещения системы по оси Z.

На завершающем этапе, аналогично алгоритму A1, выполняется сравнение достигнутого значения резкости с исходным и эталонным, на основании чего делается вывод об успешности автофокусировки.

На рис. 2 показана упрощенная структурная схема рассмотренного алгоритма автофокуса.

Сравнение алгоритмов контрастного автофокуса

Важная черта обоих алгоритмов — верификация результата: достигнутое значение резкости сравнивается с исходным и эталонным. Верификация повышает надежность системы и исключает ложные выводы об успехе автофокусировки при внешних помехах, таких как шумы сенсора камеры, временное затемнение объектива, блики, перепады освещения, вибрация системы или анализируемых объектов. Предложенные алгоритмы могут быть адаптированы под конкретную систему и условия ее эксплуатации. Универсальности можно достичь, задавая константы (например, базовый шаг перемещения или максимально допустимое значение разности между двумя показателями резкости) не в абсолютных величинах, а в процентном отношении к неизменяемым параметрам системы, таким как ГРИП или полный рабочий ход оптической оси. В любом случае подбор величин, будь то процентные или фиксированные числовые значения, нуждается в экспериментальном или статистическом обосновании.

На этапе калибровки приоритетным критерием является точность. Калибровка производится один раз, и скорость выполнения алгоритма здесь не критична. Ошибочно заданное эталонное значение резкости ставит под угрозу эффективность последующего оптического анализа для всех объектов контроля, будь то партия корпусов микросхем на конвейере или множество кристаллов на полупроводниковой пластине, каждые из которых могут насчитывать сотни и тысячи штук.

В процессе инспекции требования к механизму автофокуса повышаются. Кроме точности, критически важным становится время выполнения. Высокая частота вызова проце-

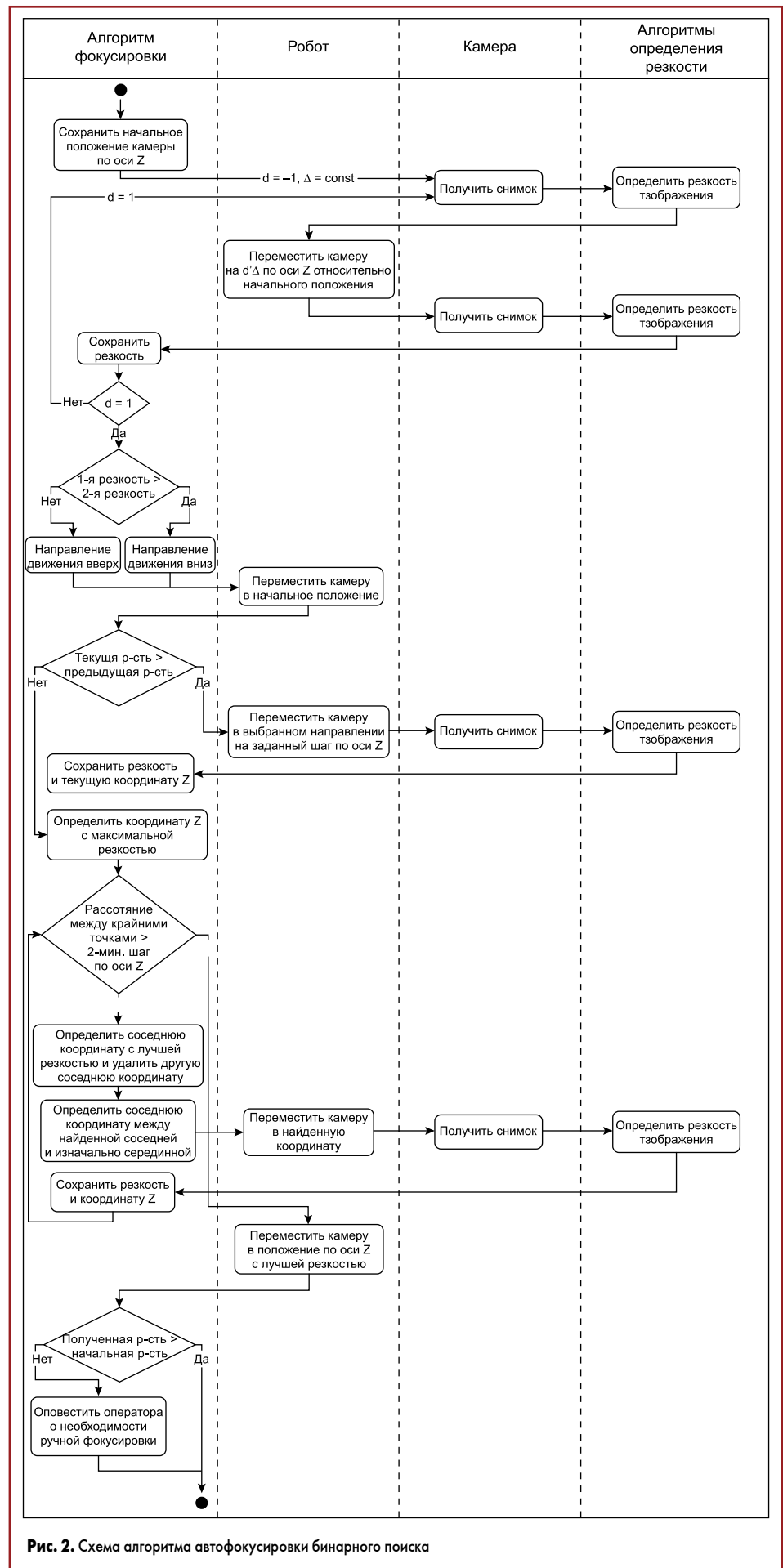


Рис. 2. Схема алгоритма автофокусировки бинарного поиска

дуры автофокусировки в сочетании с низкой скоростью алгоритма может свести на нет вы-

игрыш в производительности, получаемый за счет автоматизации контроля.

Таблица 1. Сравнительный анализ А1 и А2

Характеристика	Алгоритм	
	А1	А2
Зависимость скорости алгоритма расстояния L	Линейная O(n)	Логарифмическая O(log n)
Скорость выполнения	$t * (2 + L / \text{step_adapt}) = 1.5 - 5.5 \text{ с}$	$t * (2 + L / \text{step} + 1 + \log_2(\text{step} * 2 / \epsilon)) = 3.5 - 5 \text{ с}$
Среднее время итерации	0,5 с	0,5 с
Число перемещений камеры	$2 + L / \text{step_adapt} = 3 - 12$	$2 + L / \text{step} + 1 + \log_2(\text{step} * 2 / \epsilon) = 7 - 10$

Точность и скорость работы автофокуса зависят не только от его программной реализации, в основе которой лежит тот или иной алгоритм, но и от аппаратной части системы. Значительное влияние оказывают такие параметры, как частота кадров камеры (fps), определяющая скорость получения изображений для анализа, скорость перемещения оптического модуля и его минимальный шаг позиционирования (ϵ). Поэтому нельзя заранее предсказать абсолютные показатели быстродействия алгоритмов автофокуса и они могут быть получены лишь экспериментально для конкретной конфигурации оборудования.

Для сравнительного анализа введем следующие обозначения:

- L — расстояние от начальной позиции камеры до точки экстремума функции резкости;
- step — постоянный шаг перемещения камеры по оптической оси;
- step_adapt — шаг, адаптивный к разности значений резкости двух соседних точек.

Представленные в таблице 1 количественные оценки могут создать впечатление о преимуществе А1 с точки зрения быстродействия. Однако такой вывод был бы преждевременным без учета надежности работы алгоритмов в реальных условиях.

Основным недостатком А1 является его зависимость от достоверности прогноза поведения функции резкости. Адаптивный шаг рассчитывается исходя из предположения о линейной связи между приростом резкости и перемещением камеры по оптической оси. На практике вид функции резкости определяется совокупностью факторов: индивидуальными особенностями объектива, текстурой поверхности контролируемого изделия, уровнем шумов сенсора и условиями освещения. Линейная зависимость в таких условиях не всегда выполняется, что вносит неопределенность в процесс поиска экстремума и может стать причиной схождения алгоритма к ложному максимуму функции резкости. А2 свободен от указанного недостатка. Стратегия последовательного деления интервала гарантирует анализ значений резкости в точках, удаленных друг от друга, что существенно снижает влияние погрешности единичного измерения, а детерминированный характер логарифмической сходимости обеспечивает предсказуемость времени выполнения. Наличие логики дополнительного дробления обоих подынтервалов при незначительной разности резкости повышает устойчивость алгоритма к помехам.

Совокупность перечисленных факторов позволяет рекомендовать А2 как более надежное и предсказуемое решение в задаче автофокуса.

Оба алгоритма обеспечивают одинаковую предельную точность позиционирования, определяемую минимальным шагом перемещения камеры по оси Z (ϵ). Однако А2 достигает этой точности с большей вероятностью за счет устойчивости к помехам в процессе поиска.

Для оценки практического влияния механизма автофокуса на производительность системы и сравнения эффективности рассмотренных алгоритмов проведен эксперимент на базе АПАК для АОИ кристаллов на полупроводниковой пластине диаметром 300 мм. На выборке из 100 кристаллов сравнивались 3 сценария работы системы: с применением алгоритмов А1, А2 и без автофокусировки.

Таблица 2. Сравнительные характеристики различных алгоритмов автофокуса и без него

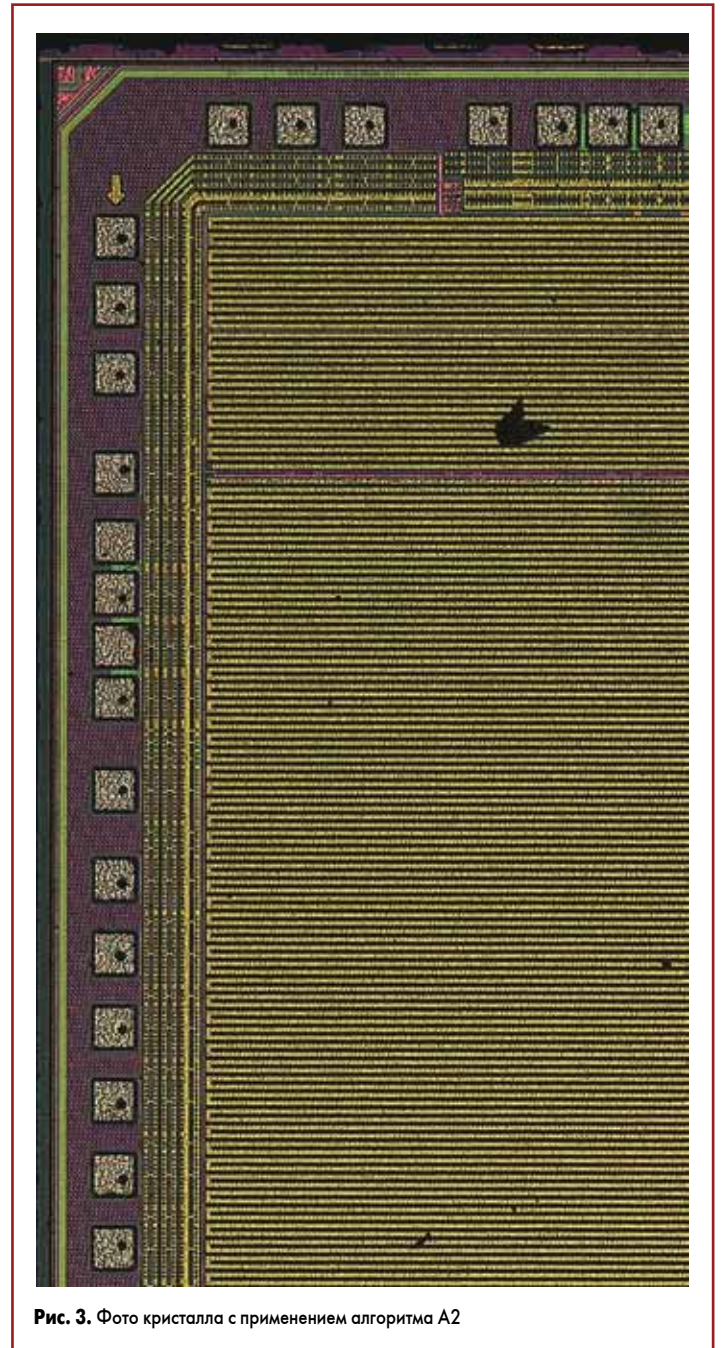
Характеристика	Автофокус		
	А1	А2	Отсутствует
Время инспекции, с	308,8	318,93	252,6
Время инспекции кристалла, с	3,09	3,19	2,53
Количество процедур автофокусировки	13	14	0
Среднее время работы автофокусировки, с	4,34	4,71	0
Количество изображений с неприемлимым качеством	4	0	68

Результаты эксперимента представлены в таблице 2, на рис. 3 показано фото фрагмента кристалла (размер кристалла 2,9×3,62 мм) полученное с помощью алгоритма А2 с предполагаемыми дефектами (черного цвета).

Выводы

В статье рассмотрены виды объективов и их свойства, методы автоматической фокусировки в СМЗ с объективами с фиксированным фокусным расстоянием и существующие активные и пассивные методы автофокуса. Целевым методом статьи выбран контрастный автофокус как наиболее аппаратно независимое и доступное решение для АПАК. Рассмотрены два алгоритма автофокусировки с разными стратегиями поиска экстремума функции резкости. Дана оценка надежности и универсальности данных алгоритмов, проведен сравнительный анализ алгоритмов в АПАК для АОИ кристаллов, показывающий явное преимущество алгоритма А2 по надежности по сравнению с А1 при поиске дефектов.

Экспериментальный стенд АПАК для поиска дефектов полупроводниковой пластины диаметром 300 мм более чем с 6000 кристаллов для изготовления микросхем показал работоспособность в обнаружении дефектов.


Рис. 3. Фото кристалла с применением алгоритма А2