

МЕТОД ОПТОЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В РЕЗЕРВУАРЕ*С.А. Борминский, А.В. Солнцева, Б.В. Скворцов**Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия***Аннотация**

В статье представлены основы оптоэлектронного контроля объема жидкости в резервуаре, позволяющие дистанционно производить измерения без проведения процедуры тарировки резервуара. Метод измерения основан на наличии на поверхности жидкости у стен резервуара области повышенного отражения света, возникающей вследствие силы поверхностного натяжения или слабого волнения поверхности. В предложенном методе на полученном с фотокамеры изображении распознается граница между жидкостью и воздухом у стенки резервуара, затем определяется текущая площадь поверхности жидкости. При первом наливе жидкости устройство запоминает площадь резервуара для каждого уровня, тем самым автоматически создается тарировочная таблица без применения дополнительных инструментов. Кроме того, разработана математическая модель, позволяющая избавиться от неточности расположения камеры относительно резервуара, для чего используются реперные метки, расположенные в горизонтальной плоскости сверху резервуара. Разработан алгоритм распознавания границы жидкости на изображении. Макетный образец, основанный на цифровом фотоаппарате, показал приведенную погрешность измерения объема жидкости в пределах 0,5 % при отсутствии жесткой фиксации камеры.

Ключевые слова: оптические измерения, контроль объема жидкости, преобразование координат, реперные метки.

Цитирование: Борминский, С.А. Метод оптоэлектронного контроля объема жидкости в резервуаре / С.А. Борминский, А.В. Солнцева, Б.В. Скворцов // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 4. – С. 552-559. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559.

Введение

Оптоэлектронный контроль уровня [1, 2, 3, 4] и объема жидкости является перспективным направлением развития измерительных систем подвижных и стационарных резервуарных комплексов. Некоторые конструкции [1, 2] используют источники лазерного излучения, параллельные лазерные лучи которых создают на контролируемой поверхности метки, воспринимаемые фотокамерой. По координатам точек отражения на изображении определяется уровень [5], а в некоторых случаях и наклон резервуара относительно горизонтальной плоскости [6].

Информация об уровне жидкости преобразуется в объем продукта с помощью тарировочных таблиц резервуара [7], в которых указано соответствие объема известному уровню. Создание тарировочной таблицы – трудоёмкий процесс, который производится путем пошагового добавления известного объема жидкости в емкость, при этом фиксируется получаемый уровень.

В статье предложен новый метод измерения объема жидкости, при котором не требуется производить дополнительную тарировку резервуара – измерение геометрии резервуара осуществляется автоматически [8].

Основной задачей исследования являлось создание метода контроля объема жидкости, включающего в себя алгоритм анализа изображения и математическую модель измерения уровня и объема жидкости в резервуаре. Кроме того, разработан общий алгоритм работы устройства.

Основная часть

За прототип разрабатываемого метода взят метод измерения уровня, реализованный в лазерно-телеви-

зионном уровнемере [6]. Устройство, реализующее метод, состоит из телекамеры, источников лазерного излучения и устройства обработки. Параллельные лазерные лучи создают на контролируемой поверхности метки, воспринимаемые фотокамерой. Затем устройство обработки по расстоянию между метками определяет уровень жидкости. Контроль объема с применением уровнемера требует обязательного использования тарировочных таблиц.

На рис. 1 приведена структурная схема устройства. Уровень жидкости определяется по ранее известным алгоритмам [2, 6], суть которых состоит в том, что один или несколько лучей от источников лазерного излучения оставляют метки на поверхности жидкости, затем по координатам на матрице данных меток происходит вычисление уровня жидкости. Модернизация измерительного устройства достигается тем, что в модуль обработки добавляются алгоритмы, способные распознать на изображении границу между жидкостью и воздухом у стенки (далее ГЖВС) резервуара, что даёт возможность при известном расстоянии L определить текущую площадь сечения. Жидкость при эксплуатации резервуара сливается и наливается, при этом модуль обработки запоминает площадь резервуара для каждого уровня H , тем самым автоматически создается тарировочная таблица без применения дополнительных инструментов. Фактически метод определения объема основан на том, что сама измеряемая жидкость помогает устройству рассечь резервуар на плоскости через определенные расстояния по высоте.

При реализации метода приняты следующие допущения:

1. Считается, что при наполнении резервуар изменяет свою геометрию незначительно – меньше допус-

тимой погрешности измерений объема, что на практике выполняется для большинства промышленных резервуаров.

2. Вся поверхность стен пустого резервуара просматривается с точки фиксации камеры, все элементы: балки жёсткости, перемешиватели и трубы – имеют объем менее допустимой погрешности измерения объема, при этом незначительно перекрывают обзор камере.

3. Жидкость в резервуаре рассматривается стационарной, то есть процессы слива/налива намного медленнее процесса измерения и обработки информации.

4. На данном этапе не рассматриваются значительные волны у стен резервуара, которые могут возникнуть в случае транспортировки, например, в танкерах, железнодорожных цистернах и авиационных баках, однако при статистической обработке возможны измерения и на движущихся объектах.

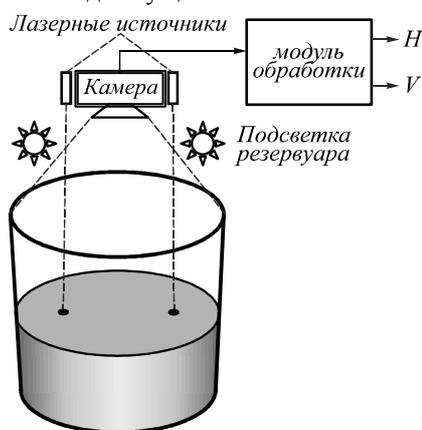


Рис. 1. Структурная схема устройства оптического контроля уровня и объема жидкости

Предлагаемое устройство не требует предварительной тарировки и определяет объем жидкости автоматически при первом же наполнении резервуара. В основе работы устройства лежит тот факт, что жидкая среда в месте соприкосновения с резервуаром оставляет видимый след, координаты на изображении которого определяются в модуле обработки. На рис. 2а схематично показано изображение, получаемое на фотоприёмной матрице, на рис. 2б приведена реальная фотография резервуара.

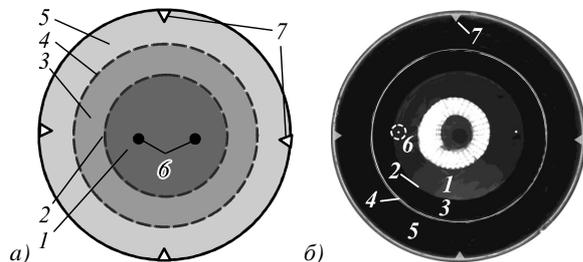


Рис. 2. а) Схема изображения, получаемого на фотоприёмной матрице. б) Реальное изображение, получаемое с камеры. 1 – дно резервуара; 2 – шов между дном и стенками резервуара; 3 – стенка резервуара, находящаяся под жидкостью; 4 – граница между жидкостью и воздухом у стенки резервуара (ГЖВС); 5 – стенка резервуара в воздушном пространстве; 6 – метки от лазерных лучей, 7 – реперные метки

Основная задача для определения объема – распознать на изображении линию ГЖВС. Для облегчения поиска на изображении линии ГЖВС желательно иметь резервуар темных тонов. Благодаря силе поверхностного натяжения или слабого волнения поверхности жидкости, на ГЖВС образуется область повышенного отражения света, которая оказывается намного ярче стен резервуара.

Алгоритм распознавания основан на поиске линии контраста на изображении, при этом для уменьшения погрешности отбрасываются резкие скачки и разрывы данной линии. При этом необходимо учесть тот факт, что в центре изображения ярко отражается устройство подсветки и метки от лазерных лучей уровнямера.

Далее рассмотрим простой случай (рис. 3), когда камера жестко зафиксирована над резервуаром на известном расстоянии $H+L$, а оптическая ось перпендикулярна горизонту.

Расстояния L и H вычисляются заранее по известным алгоритмам уровнямера [2, 6, 9], которые в данной статье не рассматриваются.

Расстояние между матрицей и оптической системой a является известной величиной, которую можно измерить с высокой точностью для каждого конкретного объектива камеры, также можно воспользоваться классической формулой для собирающей линзы [10]:

$$1/f = 1/L + 1/a, \quad (1)$$

где f – фокусное расстояние оптической системы.

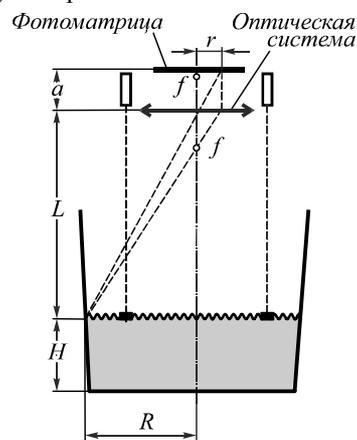


Рис. 3. Упрощенная оптическая схема процесса измерения

Расстояние от оптической оси до стенки резервуара R может быть получено из подобия треугольников:

$$R = r(L/a). \quad (2)$$

Аналогично через подобие можно вычислить площадь поверхности жидкости при текущем наполнении. Для этого суммируется количество пикселей N фигуры, которая образована линией, ранее распознанной ГЖВС. Площадь жидкости в резервуаре может быть вычислена по формуле:

$$S = (L/a)N \cdot S_1, \quad (3)$$

где N – площадь фигуры в пикселях на фотоматрице;

S_l – площадь единичного пикселя (является известной константой для любой фотоматрицы).

Работа алгоритма вычисления объема основана на хранении таблицы сечений, в которой представлена зависимость площади жидкости от уровня в резервуаре H . При первом же наполнении резервуара происходит заполнение таблицы сечений значениями S_H через шаг уровня Δh . Получить текущий объем жидкости в резервуаре можно по формуле:

$$V = \sum_{h=0}^H S_h \cdot \Delta h. \tag{4}$$

Одна из проблем, возникающая при эксплуатации, – необходимость фиксировать устройство над резервуаром с высокой точностью – в противном случае даже после каждого технического обслуживания необходимо будет заново перекалибровывать устройство. Рассмотрим случай, когда камера располагается произвольно над резервуаром.

Для уменьшения погрешности измерения и упрощения эксплуатации на стенках сверху резервуара устанавливаются реперные метки, по которым устройство самостоятельно может определять свое расположение в пространстве, при этом дорабатывается математическая модель процесса измерения. Реперные метки в простом случае могут представлять собой нанесенную на стенку сверху резервуара краску, в более сложном случае – специальные детали, прикрепленные сверху резервуара на незатопляемой высоте. Примем, что реперные метки находятся в горизонтальной плоскости параллельно поверхности жидкости.

На рис. 4 показан случай с произвольным расположением камеры в пространстве, откуда обеспечивается обзор всей площади стен резервуара. Пусть объектив камеры находится в точке O , которая выбирается за начало координат. Для наглядности плоскость матрицы располагается перед точкой фокуса O .

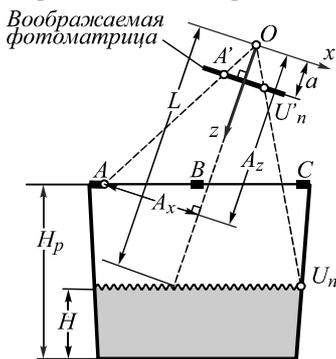


Рис. 4. Модель произвольного расположения камеры над резервуаром

Задача измерения уровня и объема при расположении камеры в произвольной точке сводится к тому, чтобы определить параметры плоскости реперных меток в системе координат камеры, затем рассчитать параметры плоскости жидкости, которая параллельна плоскости реперов, затем рассчитать уровень, площадь сечения и объем. Следует отметить, что использовать

обычные алгоритмы устранения перспективных искажений изображения в данном случае невозможно, поскольку плоскости реперов и жидкости находятся на разном изначально неизвестном расстоянии.

Расстояния между метками A и B , A и C , B и C обозначим \underline{AB} , \underline{AC} , \underline{BC} соответственно. Эти расстояния практически не изменяются со временем и могут быть заранее измерены с высокой точностью, в дальнейших расчетах они будут считаться известными. Известными также являются координаты точек на фотоматрице $A'(A'_x, A'_y)$, $B'(B'_x, B'_y)$ и $C'(C'_x, C'_y)$. Координаты данных точек в пикселях распознаются специальным алгоритмом, затем для перевода в линейные координаты происходит умножение на геометрический размер пикселя. Координаты точек $A(A_x, A_y, A_z)$, $B(B_x, B_y, B_z)$, $C(C_x, C_y, C_z)$ в системе координат относительно камеры являются неизвестными, и их можно найти при решении системы из 9 уравнений:

$$\begin{cases} A_x/A'_x = A_z/a = A_y/A'_y \\ B_x/B'_x = B_z/a = B_y/B'_y \\ C_x/C'_x = C_z/a = C_y/C'_y \\ (A_x - B_x)^2 + (A_y - B_y)^2 + (A_z - B_z)^2 = \underline{AB}^2 \\ (A_x - C_x)^2 + (A_y - C_y)^2 + (A_z - C_z)^2 = \underline{AC}^2 \\ (B_x - C_x)^2 + (B_y - C_y)^2 + (B_z - C_z)^2 = \underline{BC}^2. \end{cases} \tag{5}$$

Первые три строки системы получены из подобия треугольников, оставшиеся три – по теореме Пифагора. При очевидном условии $A_z > 0$, $B_z > 0$, $C_z > 0$ система имеет одно решение.

После того, как координаты точек A , B , C найдены, запишем уравнение плоскости реперных меток.

В рассматриваемом случае плоскость никогда не проходит через начало координат, поэтому уравнение плоскости можно записать с тремя коэффициентами:

$$P_x \cdot x + P_y \cdot y + P_z \cdot z + 1 = 0. \tag{6}$$

Коэффициенты уравнения P_x , P_y , P_z плоскости реперов можно найти из системы:

$$\begin{cases} P_x \cdot A_x + P_y \cdot A_y + P_z \cdot A_z + 1 = 0 \\ P_x \cdot B_x + P_y \cdot B_y + P_z \cdot B_z + 1 = 0 \\ P_x \cdot C_x + P_y \cdot C_y + P_z \cdot C_z + 1 = 0. \end{cases} \tag{7}$$

Для плоскости, соответствующей поверхности жидкости, составляется аналогичное уравнение плоскости с коэффициентами G_x , G_y , G_z . С учетом параллельности плоскостей и принадлежности этой плоскости точки с координатами $(0, 0, L)$ можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} G_x/P_x = G_y/P_y = G_z/P_z \\ G_z \cdot L + 1 = 0. \end{cases} \tag{8}$$

Расстояние от фотокамеры до поверхности жидкости L является известным, которое измеряется одним из следующих способов [2, 6]: лазерно-телевизионным, акустическим, лазерным дальномером и др.

По известным формулам расстояния между параллельными плоскостями можно определить уровень жидкости в резервуаре:

$$H = H_p - \frac{P_z / G_z - 1}{\sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}}, \quad (9)$$

где H_p – расстояние от плоскости дна до плоскости реперных меток, которое является известным конструкционным параметром.

Дальнейшая обработка сводится к вычислению площади поверхности жидкости. Для этого координаты каждого распознанного пикселя ГЖВС $U_n'(U_{x,n}', U_{y,n}')$ преобразуются в объёмные координаты точек $U_n(U_{x,n}, U_{y,n}, U_{z,n})$ с учётом принадлежности точки U_n плоскости жидкости:

$$\begin{cases} G_x \cdot U_x + G_y \cdot U_y + G_z \cdot U_z + 1 = 0 \\ U_{x,n} / U_{x,n}' = U_{y,n} / U_{y,n}' = U_{z,n} / a. \end{cases} \quad (10)$$

Для нахождения площади поверхности жидкости можно использовать способ разбиения на треугольники, суть которого поясняется на рис. 5.

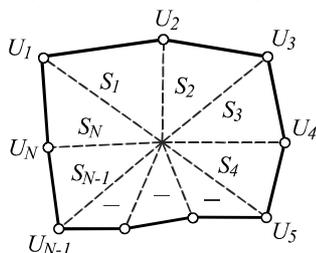


Рис. 5. Определение площади поверхности жидкости

За центральную точку выбрана точка с координатами $(0,0,L)$, поскольку она лежит в плоскости уровня жидкости и обязательно находится внутри фигуры. Площадь определится как сумма площади треугольников, вычисленных по формуле Герона:

$$S = \sum_{n=1}^N \sqrt{p_n(p_n - l_{1,n})(p_n - l_{2,n})(p_n - l_{3,n})}, \quad (11)$$

где l_{1n}, l_{2n}, l_{3n} – стороны треугольников, p_n – полупериметр:

$$\begin{aligned} l_{1,n} &= \sqrt{(U_{x,n})^2 + (U_{y,n})^2 + (U_{z,n} - L)^2}, \\ l_{2,n} &= \sqrt{(U_{x,n+1})^2 + (U_{y,n+1})^2 + (U_{z,n+1} - L)^2}, \\ l_{3,n} &= \sqrt{(U_{x,n} - U_{x,n+1})^2 + (U_{y,n} - U_{y,n+1})^2 + (U_{z,n} - U_{z,n+1})^2}, \\ p_n &= (l_{1,n} + l_{2,n} + l_{3,n}) / 2. \end{aligned}$$

Найденная площадь подставляется в (4) для дальнейшего вычисления объема.

Алгоритм работы устройства

Основной целью при создании алгоритма являлось обеспечение надежности распознавания при высоком быстродействии. Оптимизация на скорость распознавания связана с планами разместить созданное программное обеспечение непосредственно в цифровой камере с относительно медленным процес-

сором, тем самым получить автономное компактное измерительное устройство. Увеличение количества обработанных кадров в секунду после дальнейшей доработки алгоритма позволит также измерять параметры при волнении жидкости, связанном с движением резервуара, например, в танкерах, авто и ж/д цистернах. В настоящее время реализован и отлажен алгоритм измерения статически расположенной жидкости, который выглядит следующим образом:

1. Включается подсветка, производится фотографирование резервуара с жидкостью, затем изображение передается в вычислительное устройство для анализа.

2. Если был использован лазерно-телевизионный метод [2, 6], то по координатам лазерных меток происходит вычисление расстояния L . Если измеряемая жидкость не обладает красящими свойствами, то уровень может быть определен по меткам, нанесённым на стенки резервуара [11], в ином случае запускается внешний измеритель расстояния до поверхности жидкости.

3. Происходит распознавание на изображении реперных меток. Реперные метки сделаны треугольной формы (см. рис. 2), вершины треугольников, направленные к центру, являются реперными точками, между которыми расстояния известны. Для упрощения процесса распознавания реперные метки имеют цвет, не встречающийся в других местах кадра, в частности красный. Процесс распознавания реперных меток можно выполнить по известным алгоритмам [12, 13], однако для повышения быстродействия предлагается использовать собственный ускоренный алгоритм, основанный на следующих фактах. Во-первых, максимальная точность измерения будет достигнута в том случае, если изображение резервуара окажется максимально крупно вписано в размер кадра. Поэтому поиск реперных меток целесообразно проводить по краям изображения, а если алгоритм не может обнаружить в нужной зоне все 4 метки – пользователя просят передвинуть камеру. Во-вторых, реперные метки выделяются по цвету и являются наиболее крупными объектами данного цвета в анализируемой области.

Алгоритм поиска реперных меток выглядит следующим образом. Сначала грубо определяется положение реперной метки на изображении, для чего в определенной области количество пикселей (на практике использовалась область 50×50 пикс.) одного цветового диапазона должно превысить пороговое значение. Такой подход позволяет отфильтровать случайно совпадающие по цветам небольшие группы пикселей, возникающие из-за шумов или различного мусора. После оптимизации данный поиск осуществляется в цикле за один проход с использованием простейших целочисленных операций.

Далее уточняются координаты определяющих размер вершин треугольников. Для этого из ранее определённых групп пикселей заданного цвета отбираются те пиксели, которые ближе всего находятся к центру изображения, при этом для повышения поме-

хозащищенности отдельно расположенные пиксели игнорируются. Алгоритм имеет высокую скорость, однако при загрязнении реперных меток может произойти небольшое смещение полученных данным алгоритмом координат. Для возможности контроля оператором правильности распознавания координаты реперных меток отображаются крестиком на исходном изображении на экране монитора.

4. Происходит распознавание на изображении ГЖВС. В центре изображения присутствуют блики от подсветки, поэтому поиск ГЖВС ведется по направлению от краёв кадра к центру, как показано стрелками на рис. 6.

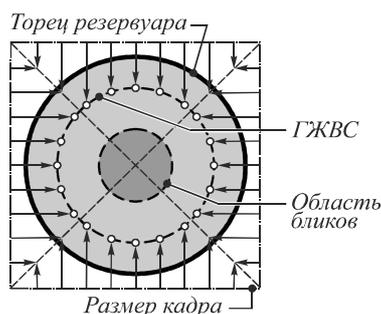


Рис. 6. Упрощенная оптическая схема процесса измерения

Поиск ведется от края изображения до диагонали (на рис. 6 показаны пунктиром), далее аналогичный процесс происходит со сдвигом на один пиксель. Когда четверть изображения между двумя диагоналями отсканирована, меняется направление поиска и сканируется следующая четверть. Таким образом, алгоритм проходит по часовой стрелке и определяет все точки на ГЖВС.

Критерий опознавания точки на ГЖВС следующий: высокая яркость после нескольких темных пикселей, соответствующих стенке резервуара. Дополнительно анализируется расстояние с предыдущей распознанной точкой ГЖВС, которое не должно превышать определённого порога. Для возможности контроля оператором правильности распознавания ГЖВС распознанные точки на исходном изображении отображаются синим цветом.

5. Для распознанных точек корректируется аберрация оптической системы. Экспериментальные исследования показали, что при применении распространённых широкофокусных объективов с $f < 24$ мм максимальную погрешность оказывает дисторсия оптической системы. Таким образом, для дальнейших расчетов координаты реперов $A' B' C'$ и точек границы жидкости U_n преобразуются с помощью известных формул коррекции дисторсии [14].

6. Координаты реперов на фотоматрице преобразуются в объемные путем решения системы (5), затем происходит определение параметров плоскости реперных меток по формулам (7), далее с учетом (8) определяются параметры плоскости поверхности жидкости.

7. Происходит расчет текущего уровня жидкости H от дна резервуара по формуле (9), далее из системы (10) определяются объемные координаты всех распознанных точек ГЖВС, затем по формуле (11) опреде-

ляется площадь поверхности жидкости, после чего она записывается в соответствующую ячейку таблицы в памяти устройства S_H . Если резервуар уже когда-то был до этого наполнен до уровня H , то перед обновлением происходит сравнение с предыдущим значением. Значительное изменение площади говорит о неисправности измерительного оборудования или значительной деформации резервуара.

8. Вычисляется объем продукта по формуле (4). В случае отсутствия данных о некоторых сечениях применяется метод интерполяции данных.

Экспериментальные исследования

Для проведения испытаний был создан макетный образец, в котором в качестве фотокамеры был использован зеркальный фотоаппарат с 18 мегапиксельной матрицей размером $22,3 \times 14,9$ мм и объектив с фокусным расстоянием $f = 18$ мм. Для обеспечения достаточной глубины резкости при съемке использовалась относительная диафрагма $f/8$, что соответствует дифракционному пределу для данной камеры – дальнейшее закрытие диафрагмы уменьшает резкость изображения. Фокусировка на резкость выполнена в ручном режиме, после чего кольцо фокусировки объектива жестко зафиксировано. В качестве освещения в макете была использована расположенная вокруг фотокамеры кольцевая светодиодная подсветка, что позволило получить равномерное отражение света от ГЖВС без ярких бликов и разрывов. Для проверки алгоритмов измерения эксперименты проводились с двумя макетными резервуарами, имеющими форму усеченного конуса. Нижний и верхний диаметры первого резервуара составляли 240 мм и 350 мм при высоте 450 мм, второго – 500 мм и 700 мм при высоте 1000 мм. Полученное в ходе эксперимента изображение первого резервуара приведено на рис. 2б. Следует отметить, что в эксперименте использовались 4 реперные метки: три необходимы для вышеописанного алгоритма, четвертая метка использовалась для проверки. Реперные метки нанесены красной краской сверху на внутреннюю поверхность резервуара и имеют треугольную форму. За сами реперные точки A, B, C были выбраны вершины треугольника, направленные в центр.

Изображение с фотокамеры передавалось для дальнейшей обработки в персональный компьютер. Для распознавания координат реперных меток и линии ГЖВС была создана специальная программа. Проведена оптимизация программы распознавания с целью повышения быстродействия – при вычислениях в основных циклах не используются операции с плавающей точкой, а также операции умножения и деления. В результате оптимизации получена скорость распознавания 8–12 кадров в секунду на одном ядре процессора Intel Core i7–2600k с тактовой частотой 3,4 ГГц.

Обработка после распознавания массива точек ГЖВС проводилась в программном продукте Mathcad, где вычислялся объем и уровень жидкости. В дальнейшем все математические расчеты будут реализованы в собственном ПО.

Проведенные эксперименты на макетном образце подтвердили высокую точность измерения оптоэлектронным методом. Алгоритмы распознавания обеспечивают высокую скорость и стабильность распознавания. Приведенная погрешность определения объема при использовании бытового объектива (Canon 18–55 f 3,5–5,6) не превысила 0,5 % при свободном расположении камеры и 0,3 % при жесткой фиксации на известном расстоянии.

Заключение

Основной полученный результат – создание метода автоматической градуировки резервуара с вычислением объема жидкости без дополнительных технологических операций и тарифовочных таблиц. Разработан алгоритм распознавания границы жидкости на изображении, обладающий высокой скоростью. Дополнительным преимуществом разработанного метода является измерение геометрии резервуара при каждом сливе/наливе продукта, что позволяет учитывать изменение формы в процессе эксплуатации резервуара. Таким образом, устройство позволяет дополнительно контролировать опасные отклонения в геометрических параметрах резервуара, например, большие вмятины, что особенно важно при эксплуатации на подвижных объектах, в частности, танкерах. Разработка математической модели с произвольным расположением камеры относительно резервуара упрощает пусконаладочные работы, позволяет демонтировать для обслуживания камеру без последующей дополнительной градуировки резервуара, а также открывает путь к созданию мобильных оптических устройств измерения уровня и объема жидкости в резервуарах.

Литература

1. **Леонидова, З.Е.** Датчики уровня жидкости с матричными приемниками излучения / З.Е. Леонидова, Р.Ю. Мукаев // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 6. – С. 53–58.
2. **Солнцева, А.В.** Дистанционные методы контроля параметров жидких продуктов в емкостях резервуарного парка / А.В. Солнцева, Б.В. Скворцов, С.А. Борминский. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2015. – 187 с. – ISBN 978-5-93424-749-3.
3. **Граевский, О.С.** Новый способ измерения уровня жидкости / О.С. Граевский, А.В. Бадеев. – В сб.: «Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009. – Т. 1/2009. – С. 34–36.
4. **Chakravarthy, S.** Noncontact level sensing technique using computer vision / S. Chakravarthy, R. Sharma, R. Kasturi // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2002. – Vol. 51, Issue 2. – P. 353–361. – DOI: 10.1109/19.997837.
5. **Патент 2332644 Российская Федерация G01F 23/292.** Способ и устройство измерения уровня жидкости / Леонидова З.Е., Мукаев Р.Ю.; правообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уфимский государственный авиационный технический университет; № 2007111271/28, заявл. 27.03.2007, опубл. 27.08.2008, Бюл. № 24. – 11 с.: ил.
6. **Патент 151875 Российская Федерация G01F 23/00 (полезная модель).** Лазерно-телевизионный уровнемер / Скворцов Б.В., Блинов Д.И., Борминский С.А.; заявл. 23.09.2014, опубл. 20.04.2015, Бюл. № 11. – 8 с.: ил.
7. **Патент 2497085 Российская Федерация G01F 1/76.** Способ измерения массы жидкости в резервуаре / Б.В. Скворцов, С.А. Борминский, А.В. Солнцева, Д.И. Блинов; заявитель и правообладатель ООО "Сенсорные беспроводные системы"; № 2011147442/28, заявл. 22.11.2011, опубл. 27.10.2013, Бюл. № 15. – 11 с.: ил.
8. **Патент 156459 Российская Федерация (полезная модель).** Устройство оптического измерения уровня и объема жидкости в резервуаре / Борминский С.А.; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31. – 8 с.: ил.
9. **Борминский, С.А.** Методы измерений количественных и качественных характеристик жидких энергоносителей / С.А. Борминский, Б.В. Скворцов, А.В. Солнцева. – Самара: СНЦ РАН, 2012. – 222 с. – ISBN 978-5-93424-607-6.
10. **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики. Т. IV. Оптика / Д.В. Сивухин. – 3-е изд. – М.: Физматлит, 2006. – 792 с.
11. **U.S. Patent 8,184,848 G06K 9/00, G06K 2209/03, 382/100.** Liquid level detection method / Wu J.-H., Lin F.-P., Hsiao Y.-H., Chung T.-L., filed of June 17, 2009, published of May 22, 2012.
12. **Спицын, В.Г.** Применение вейвлет-преобразования Хаара, метода главных компонент и нейронных сетей для оптического распознавания символов на изображениях в присутствии импульсного шума / В.Г. Спицын, Ю.А. Болотова, Н.Х. Фан, Т.Т.Ч. Буй // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 249–257. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.
13. **Красильников, Н.Н.** Цифровая обработка 2D и 3D изображений / Н.Н. Красильников. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 608 с. – ISBN: 978-5-9775-0700-4.
14. **Жимбуева, Л.Д.** Метод определения суммарной дисторсии цифровых изображений / Л.Д. Жимбуева // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 347–355.

Сведения об авторах

Борминский Сергей Анатольевич, доцент кафедры электротехники Самарского университета, 1980 года рождения, в 2002 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет (сейчас Самарский университет) по специальности 201500 «Бытовая радиоэлектронная аппаратура», в 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления». E-mail: b80@mail.ru.

Солнцева Александра Валерьевна, ассистент кафедры электротехники университета, 1988 года рождения, в 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет (сейчас Самарский университет) по специальности 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы», в 2014 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления». E-mail: als063@mail.ru.

Скворцов Борис Владимирович, профессор кафедры электротехники Самарского университета, 1951 года рождения, в 1973 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности 200106 «Информационно-измерительная техника», в 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.05 «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления». E-mail: aps@ssau.ru.

ГРПТИ:59.31.29

Поступила в редакцию 15 апреля 2016 г. Окончательный вариант – 12 августа 2016 г.

A METHOD FOR OPTOELECTRONIC CONTROL OF LIQUID VOLUME IN A TANK

S.A. Borminsky, A.V. Solntseva, B.V. Skvortsov
Samara National Research University, Samara, Russia

Abstract

The article describes a method for optoelectronic control of liquid volume in a tank. Measurements can be performed remotely without tank calibration. The method is based on the fact that there is a near-wall region where the liquid surface has a higher reflectivity. This region occurs due to surface tension or minor ripples. With this method, first, an image of liquid surface is taken with a photo-camera. Then, a near-wall liquid-air boundary is identified in the image before calculating the current area of the liquid surface. When the tank is filled for the first time, the device records the liquid area for every level. A calibration table is automatically created without applying additional tools. To avoid the error caused by inaccurate photo-camera positioning, a special mathematical model is devised. It uses reference marks made on tank walls horizontally. An algorithm for recognition of liquid boundaries in the image is developed. Measurements of the liquid volume conducted using a laboratory prototype have shown the reduced error to be within 0.5%, provided that the digital photo-camera is not rigidly fixed.

Keywords: optical measurement, control of liquid volume, transformation of coordinates, reference marks.

Citation: Borminsky SA, Solntseva AV, Skvortsov BV. A method for optoelectronic control of liquid volume in a tank. *Computer Optics* 2016; 40(4): 552-559. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-4-552-559.

References

- [1] Leonidova ZE, Mukaev RU. Liquid's level sensors with matrix signal receiver [in Russian]. *Industrial Automatic Process Control Systems and controllers* 2012; 6: 53-58.
- [2] Solntseva AV, Skvortsov BV, Borminsky SA. Remote control methods of liquid products' parameters in a pool of tanks [in Russian]. Samara: Samara Scientific Center of RAS; 2015. ISBN 978-5-93424-749-3.
- [3] Graevsky OS, Badeev AV. A new method of liquid's level measurement [in Russian]. *International symposium works "Reliability and Quality"*. Penza: Penza State University Publisher; 2009; 1: 34-36.
- [4] Chakravarthy S, Sharma R, Kasturi R. Non-contact level sensing technique using computer vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 2002; 51(2): 353-361. DOI: 10.1109/19.997837.
- [5] Leonidova ZE, Mukaev RU. A new method and device of liquid's level measurement [in Russian]. Patent RU 2332644, filed of Mar 27, 2007, published of Aug 28, 2008.
- [6] Skvortsov BV, Blinov DI, Borminsky SA. Lazer-television level gauge [in Russian]. Patent RU 151875, filed of Sept 23, 2014, published of Apr 20, 2015.
- [7] Skvortsov BV, Borminsky SA, Solntseva AV, Blinov DI. Method of liquid's mass measurement in tanks [in Russian]. Patent RU 2497085, filed of Nov 22, 2011, published of Oct 27, 2013.
- [8] Borminsky SA. Device for optical measurement of liquid's level and volume in tank [in Russian]. Patent RU 156459, published of Nov 10, 2015.
- [9] Borminsky SA, Skvortsov BV, Solntseva AV. Liquid fuels quantity and quality measurement methods [in Russian]. Samara: Samara Scientific Center of RAS Publisher; 2012. ISBN 978-5-93424-607-6.
- [10] Sivuhin D.V. General physics. Volume 4. Optics [in Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher; 2006.
- [11] Wu J-H, Lin F-P, Hsiao Y-H, Chung T-L. Liquid level detection method. Patent US 8184848 B2, filed of Jun 17, 2009, published of May 22, 2012.
- [12] Spitsyn VG, Bolotova YuA, Phan NH, Bui TTT. Using a Haar wavelet transform, principal component analysis and neural networks for OCR in the presence of impulse noise. *Computer Optics* 2016; 40(2): 249-257. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-2-249-257.
- [13] Krasilnikov N.N. Digital processing of 2D and 3D images [in Russian]. Saint-Petersburg: "BHV-Petersburg" Publisher; 2011. ISBN: 978-5-9775-0700-4.
- [14] Zhimbueva LD. Method of determining the total distortion digital images. *Computer Optics* 2011; 35(3): 347-355.

Authors' information

Sergey Anatolievich Borminsky (b.1980) is an associate Professor at Electrical Engineering sub-department of Samara National Research University. He graduated from Samara State Aerospace University in 2002 on the specialty Domestic Radioelectronic Equipment, received his Candidate's degree in Engineering from SSAU in 2006 on the specialty Computer Engineering and Control Systems Elements and Devices. E-mail: b80@mail.ru .

Alexandra Valerievna Solntseva (b. 1988) is a junior lecturer at Electrical Engineering sub-department of Samara National Research University. She graduated from Samara State Aerospace University in 2011, specialty Biotechnical and Medical Devices and Systems, received her Candidate's degree in Engineering from SSAU in Computer Engineering and Control Systems Elements and Devices. E-mail: als063@mail.ru .

Boris Vladimirovich Skvortsov (b. 1951) is a Professor at Electrical Engineering sub-department of Samara National Research University. He graduated from Kuibyshev Polytechnic Institute in 1973 on the specialty Information-measuring Engineering, received his Doctor's degree in Engineering in 2000 from SSAU in the specialty Computer Engineering and Control Systems Elements and Devices. E-mail: aps@ssau.ru .

Received April 15, 2016. The final version – August 12, 2016.
