

УДК 681.78

Методика обоснования требований к системам технического зрения промышленных робототехнических комплексов

Колючкин В. Я.¹, Нгуен К. М.^{1,*}

[*congminh@yandex.ru](mailto:congminh@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В литературных источниках отсутствует изложение подходов для обоснования технических требований к системам технического зрения промышленных робототехнических комплексов. Предлагаемая методика основана на модельном представлении систем технического зрения, которая в составе информационной системы робототехнических комплексов выполняет задачи сортировки объектов, находящихся в рабочей зоне, а также измерения их линейных и угловых координат. Результаты, полученные в работе можно рекомендовать для специалистов, занимающихся разработкой систем технического зрения промышленных робототехнических комплексов, и в частности разработкой алгоритмов и программного обеспечения систем технического зрения.

Ключевые слова: система технического зрения, робототехнический комплекс, распознавание, измерение, вероятность, погрешность, среднее квадратическое отклонение

Введение

Эффективным средством автоматизации производства является внедрение промышленных робототехнических комплексов (РТК), работающих на основе принципа гибкой технологии под управлением ЭВМ. В промышленных РТК широко используются системы технического зрения (СТЗ), которые обеспечивают системы управления рабочими органами РТК информацией, необходимой для выполнения технологических операций. В частности, такая информация от СТЗ используется для захвата неупорядоченных на ленте конвейера объектов и помещения их на технологическое оборудование. Для выполнения таких функциональных задач СТЗ должна осуществлять анализ регистрируемых изображений в рабочей зоне РТК с целью сегментации образов объектов и последующего их распознавания – отнесения к соответствующему классу, а также определение положения и ориентации этих объектов.

Совершенствование промышленных РТК связано с решением целого ряда научно-технических проблем, в том числе с разработкой программно-аппаратных средств управления, устройств регистрации внешней информации и вычислительных систем для

обработки этой информации. В том числе одной из задач, возникающих при создании перспективных промышленных РТК является разработка СТЗ. В [1] приведено описание общих принципов построения аппаратной части и алгоритмического обеспечения СТЗ промышленных РТК. Но ни в этой книге, ни в других литературных источниках [2] отсутствует изложение подходов к обоснованию значений основных показателей назначения СТЗ, к которым относятся вероятность правильного распознавания объектов, находящихся в рабочей зоне РТК, а также СКО погрешностей измерения линейных и угловых координат объектов.

В связи с этим, целью данной работы является разработка методики, позволяющей научно обосновать требования к основным показателям назначения СТЗ, функционирующих в составе промышленных РТК.

Предлагаемая методика основана на блочно-иерархическом подходе к процессу проектирования. Как известно [3, 4, 5], идея этого подхода основана, во-первых, на разделении процесса проектирования на аспекты, которые определяются видами работ, выполняемыми при проектировании. Такими аспектами являются: функциональный, алгоритмический, конструкторский и технологический. Во-вторых, в каждом аспекте производится структурирование модельного математического описания объекта проектирования путём разделения его на ряд иерархических уровней по степени детальности отображения свойств объекта и его частей. В рамках функционального аспекта процесс проектирования разделяется на следующие иерархические уровни: функционально-логический, системотехнический, схемотехнический и компонентный.

На вышестоящем, функционально-логическом уровне, объектом проектирования является комплекс, в нашем случае промышленный РТК, в состав которого входит технологическое оборудование, манипуляторы, конвейер, а также СТЗ и программно-аппаратные средства управления. На системотехническом уровне объектами проектирования являются составные части промышленного РТК, в том числе, СТЗ, в состав которой входят устройство регистрации изображений, а также программно-аппаратные средства обработки данных. На схемотехническом уровне объектами проектирования являются оптическая система, фотоприёмное устройство, блоки аналоговой и цифровой обработки, входящие в состав СТЗ. На компонентном уровне объектами проектирования могут быть отдельные элементы, входящие, например, в состав оптической системы или элементы, входящие в состав электронных блоков СТЗ.

Проектирование на каждом из иерархических уровней заключается в разработке структурных схем, математических моделей каждого из элементов этих схем, описывающих их функционирование, и формулировке на этой основе целевых функций проектирования $Q_i(\vec{a})$, которые определяют зависимость показателей качества Q_i объектов проектирования от соответствующих векторов переменных проектирования $\vec{a}_i = (a_1, \dots, a_m)^T$, которые также называют конструктивными параметрами [3, 4]. Переменными проектирования являются параметры элементов структурной схемы каждого из иерархических уровней проектирования. Основными процедурами,

выполняемыми в процессе проектирования, являются анализ, как правило, многовариантный, и параметрическая оптимизация. Целью выполнения этих процедур является определение значения оптимального вектора переменных проектирования, при котором достигается экстремум показателя качества.

Определённые на каждом вышестоящем уровне проектирования значения переменных проектирования, являются показателями качества, которые задаются в ТЗ для проектирования на нижестоящем уровне. Таким образом, все иерархические уровни оказываются взаимосвязанными для обеспечения технических требований, заданных в ТЗ на проектирование комплекса.

Для достижения цели, поставленной в настоящей работе, рассматривается задача проектирования на функционально-логическом уровне, где объектом проектирования является промышленный РТК, в состав которого входит СТЗ. Предполагается, что состав промышленного РТК и общий алгоритм его функционирования определён. Кроме этого, будем считать, что технические требования всех составных частей РТК, кроме СТЗ, известны. При таких условиях требуется на основе метода математического моделирования сформулировать целевую функцию проектирования промышленного РТК и определить состав и значения технических требований СТЗ.

Общепринятым показателем эффективности промышленного РТК является его производительность, определяемая как количество годной продукции, изготавливаемой за единицу времени. Если предположить, что скоростные показатели промышленного РТК определяются только производительностью технологического оборудования, то как показатель эффективности РТК можно использовать значение частоты возникновения брака, которая в пределе равна вероятности $P_B = P(B)$ события B , заключающегося в возникновении бракованных деталей. Можно ввести в качестве показателя эффективности РТК вероятность $P(\bar{B}) = 1 - P(B)$ отсутствия брака, что соответствует вероятности выпуска годной продукции. Будем полагать, что значение этого показателя эффективности задано в ТЗ на проектирование промышленного РТК в виде условия $P(\bar{B}) \leq P_B^{T3}$.

Алгоритм функционирования РТК включает следующую последовательность операций:

- 1) выбор (сортировка) нужной детали на конвейере;
- 2) определение координат и угловой ориентации распознанной детали на конвейере;
- 3) захват и передача детали на технологическое оборудование;
- 4) выполнение технологических операций;
- 5) возврат детали на конвейер.

СТЗ, функционирующая в составе информационной системы промышленного РТК, выполняет операции сортировки, которую можно формализовать как распознавание деталей, и измерения их координат и угловой ориентации на конвейере.

Брак при таких условиях может возникнуть по следующим причинам:

- 1) неправильно распознана деталь на конвейере при априори заданной номенклатуре этих деталей; при таком условии вероятность события $\bar{P}$, заключающего в ошибочном распознавании детали, характеризуется величиной $P(\bar{P}) = 1 - P(P)$, где $P(P)$ – вероятность правильного распознавания;
- 2) линейные координаты детали на конвейере измерены с погрешностью, превышающей предельно допустимое значение погрешности Δ_r измерений; такое событие можно характеризовать вероятностью $P(\bar{I}_r) = 1 - P_{\Delta_r}$ ошибочного измерения линейных координат, где P_{Δ_r} – доверительная вероятность измерений при заданном доверительном интервале (квантиле) Δ_r ;
- 3) угловая ориентация детали на конвейере измерена с погрешностью, превышающей предельно допустимое значение погрешности Δ_φ измерений; такое событие можно характеризовать вероятностью $P(\bar{I}_\varphi) = 1 - P_{\Delta_\varphi}$ ошибочного измерения угловой ориентации, где P_{Δ_φ} – доверительная вероятность измерений при заданном доверительном интервале (квантиле) Δ_φ ;
- 4) все прочие причины возникновения брака, не зависящие от функционирования СТЗ, в том числе, износ инструмента, выход из строя модулей технологического оборудования, погрешности манипулятора и т.п., объединим в одно событие; такое событие, заключающееся в возникновении брака в связи с отказами технологического оборудования, обозначим как B_T и будем оценивать вероятностью $P(B_T)$.

Следует отметить, что квантили Δ_r и Δ_φ погрешностей измерения положения и ориентации деталей определяются значениями погрешностей ориентации рабочих органов манипуляторов, входящих в состав промышленного РТК.

Так как ставится задача определения требований только к СТЗ, то функционирование всех остальных частей промышленного РТК характеризуется одной переменной проектирования – вероятностью $P(B_T)$ возникновения брака по технологическим причинам, не связанным с функционированием СТЗ.

При такой постановке задачи переменными проектирования промышленного РТК на функционально-логическом уровне являются:

- вероятность $P(P)$ правильного распознавания образов деталей;
- вероятность $P(\bar{I}_r)$ ошибочного измерения линейных координат деталей при заданном доверительном интервале Δ_r ;

- вероятность $P(\bar{Y}_\varphi)$ ошибочного измерения угловой ориентации деталей при заданном доверительном интервале Δ_φ ;
- вероятность $P(B_T)$ возникновении брака в связи с отказами технологического оборудования.

Чтобы решить поставленную задачу, нужно сформулировать целевую функцию проектирования в виде зависимости вероятности $P(\bar{B})$ отсутствия брака от переменных проектирования СТЗ $P(\bar{P})$, $P(\bar{Y}_r)$, $P(\bar{Y}_\varphi)$, и определить такое сочетание этих показателей, при которых обеспечивается выполнение условия $P(\bar{B}) \leq P_{\bar{B}}^{T3}$, заданного в ТЗ.

Выражение для расчёта вероятности отсутствия брака в виде

$$P(\bar{B}) = P(P) \left[1 - \left[1 - P(\bar{Y}) \right] \cdot P(B_T) - P(\bar{Y}) \right]. \quad (1)$$

где

$$P(\bar{Y}) = P(\bar{Y}_r) + P(\bar{Y}_\varphi) - P(\bar{Y}_r)P(\bar{Y}_\varphi),$$

Из (1) можно определить значения вероятностей правильного распознавания и СКО погрешностей измерения. При выполнении процедур многовариантного анализа и параметрической оптимизации определяется оптимальное сочетание значений этих параметров, которые являются основными показателями качества проектирования СТЗ на системотехническом уровне.

В частности, если предположить, что доверительные интервалы Δ_r и Δ_φ , которые задают пределы допустимых значений погрешностей измерений, выбираются на основе «правила 6σ », то вероятность $P(\bar{Y}) \approx 0$, то из выражения (1) получим следующую формулу для расчёта вероятности правильного распознавания

$$P(P) = P(\bar{B}) / \left[1 - P(B_T) \right]. \quad (2)$$

Выведенные соотношения (2) позволяют при проектировании промышленного РТК на функционально-логическом уровне определить основные показатели качества СТЗ, в том числе, вероятность $P(P)$ правильного распознавания, а также СКО σ_r и σ_φ погрешностей измерения координат и угловой ориентации деталей, находящихся на конвейере.

Заключение

Разработана методика, позволяющая определять значения основных показателей эффективности СТЗ промышленных РТК, в том числе, вероятности распознавания и СКО погрешностей измерения линейных и угловых координат объектов, при которых обеспечивается заданное значение вероятности отсутствия брака.

Список литературы

1. Мошкин В.И., Петров А.А., Титов В.С., Якушенков Ю.Г. Техническое зрение роботов. М.: Машиностроение, 1990. 272 с.
2. Ким Н.В. Обработка и анализ изображений в системах технического зрения: учеб. пособие. М.: МАИ, 2011. 160 с.
3. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 430 с. (Сер. Информатика в техническом университете).
4. Колючкин В.Я. Иерархия модельного представления оптико-электронных систем в задачах автоматизированного проектирования // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1991. Т. 34, № 5. С. 52-59.
5. Лазарев Л.П., Колючкин В.Я., Метелкин А.Н. Автоматизация проектирования оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

Technique of Substantiating Requirements for the Vision Systems of Industrial Robotic Complexes

V.Ya. Kolyuchkin¹, K.M. Nguen^{1,*}

[*congminh@yandex.ru](mailto:congminh@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: vision systems, robotic complexes, recognition, measuring, probability

In references, there is a lack of approaches to describe the justified technical requirements for the vision systems (VS) of industrial robotics complexes (IRC). Therefore, an objective of the work is to develop a technique that allows substantiating requirements for the main quality indicators of VS, functioning as a part of the IRC.

The proposed technique uses a model representation of VS, which, as a part of the IRC information system, sorts the objects in the work area, as well as measures their linear and angular coordinates. To solve the problem of statement there is a proposal to define the target function of a designed IRC as a dependence of the IRC indicator efficiency on the VS quality indicators. The paper proposes to use, as an indicator of the IRC efficiency, the probability of a lack of fault products when manufacturing. Based on the functions the VS perform as a part of the IRC information system, the accepted indicators of VS quality are as follows: a probability of the proper recognition of objects in the working IRC area, and confidential probabilities of measuring linear and angular orientation coordinates of objects with the specified values of permissible error. Specific values of these errors depend on the orientation errors of working bodies of manipulators that are a part of the IRC. The paper presents mathematical expressions that determine the functional dependence of the probability of a lack of fault products when manufacturing on the VS quality indicators and the probability of failures of IRC technological equipment.

The offered technique for substantiating engineering requirements for the VS of IRC has novelty. The results obtained in this work can be useful for professionals involved in IRC VS development, and, in particular, in development of VS algorithms and software.

References

1. Moshkin V.I., Petrov A.A., Titov V.S., Yakushenkov Yu.G. *Tekhnicheskoe zrenie robotov* [Robotic technical vision]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 272 p. (in Russian).
2. Kim N.V. *Obrabotka i analiz izobrazhenii v sistemakh tekhnicheskogo zreniya* [Image processing and analysis in machine vision systems]. Moscow, MAI Publ., 2011. 160 p. (in Russian).

3. Norenkov I.P. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya* [Fundamentals of CAD]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 430 p. (Ser. *Informatika v tekhnicheskoy universitete* [Computer science at the Technical University]). (in Russian).
4. Kolyuchkin V.Ya. The hierarchy of model representations of optoelectronic systems in computer-aided design problems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 1991, vol. 34, no. 5, pp. 52-59. (in Russian).
5. Lazarev L.P., Kolyuchkin V.Ya., Metelkin A.N. *Avtomatizatsiya proektirovaniya optiko-elektronnykh priborov* [Computer-aided design of optoelectronic devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 216 p. (in Russian).