

**ИНФОРМАТИКА**

УДК 681.5.015

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНИПУЛЯТОРОМ ИЗДЕЛИЯ  
ПРИ СВАРКЕ ГРУППИРОВАННЫХ ШВОВ**

К.И. СЁМКИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 20 ноября 2004*

Рассмотрены проблемы оптимального управления позиционером при сварке нескольких групп швов. Предложены алгоритм минимизации времени перехода между группами швов а также критерий объединения швов в группы. Эффективность рассмотренного подхода проверена на конкретном примере.

*Ключевые слова:* робот, позиционер дуговая сварка, оптимальное управление.

**Введение**

Применение промышленных роботов (ПР) в дуговой сварке позволяет повысить качество швов, автоматизировать процесс сварки швов с любой формой линии соединения во всех пространственных положениях, а также исключить необходимость изготовления и применения специализированных сварочных установок, станков и машин [1, 2]. Однако существует ряд особенностей затрудняющих использование роботов в этой области. К таким особенностям можно отнести худшие по сравнению с человеком сенсорные и манипуляционные свойства роботов. Поэтому конструкции, приемлемые для ручной или механизированной сварки, в ряде случаев оказываются непригодными для сварки роботами из-за недоступности некоторых мест сварки инструментом. Для решения этой проблемы, наряду с промышленным роботом (манипулятором инструмента), обязательным компонентом современного роботизированного технологического комплекса (РТК) сварки является позиционер (манипулятор изделия), который, кроме того, обеспечивает рациональную ориентацию шва по отношению к силе тяжести и наиболее удобное для робота его пространственное положение. Еще одна особенность, которую надо учитывать при проектировании РТК дуговой сварки, связана со сравнительно невысоким (по сравнению с ПР) быстродействием позиционеров, что накладывает ограничение на перемещение изделия в процессе сварки. Поэтому в данной работе рассматривается задача оптимального использования кинематической избыточности с целью уменьшения времени обработки детали и повышения качества сварных соединений.

**Проблемы оптимального управления позиционером при обработке нескольких групп швов**

Обозначим через  $\{W_i\}$  множество фреймов  $W_i$ , каждый из которых задает ориентацию и положение шва относительно точки крепления детали. При этом учтем, что матрица  $W_i$  задает ориентацию всех осей фрейма, связанного со швом, однако на скорость сварки влияют лишь два угла —  $\xi$  и  $\theta$  (угол отклонения биссектрисы угла шва от вертикали и угол отклонения линии шва

от горизонтальной плоскости). Поэтому далее будем рассматривать функции  $\xi = F_\xi(\mathbf{W})$  и  $\theta = F_\theta(\mathbf{W})$ , позволяющие вычислить показатели качества ориентации шва в пространстве. Предположим также, что математическая модель позиционера задается матричной функцией

$$\mathbf{P} = {}^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где  ${}^P\mathbf{T}_D$  — однородная матрица преобразования из системы координат основания позиционера "P" в систему координат детали "D",  $\mathbf{q}$  — обобщенные координаты позиционера.

Как следует из анализа режимов сварки швов с различной пространственной ориентацией [3], зависимость скорости сварки от углов ориентации шва и инструмента можно аппроксимировать функцией вида

$$F_v(\theta, \xi) = F_{v_0} + \eta_\theta (|\theta - \theta_0|)^2 + \eta_\xi (|\xi - \xi_0|)^2, \quad (2)$$

где  $\theta_0, \xi_0$  — оптимальные значения соответствующих углов, а  $\eta_\theta, \eta_\xi$  — весовые коэффициенты, учитывающие влияние отклонения соответствующего угла от оптимума на скорость сварки.

Введем также функцию, определяющую время обработки шва длиной  $l$  при ориентации шва  $\mathbf{W}$ , ориентации горелки относительно шва  ${}^P\mathbf{T}_D$ :

$$F_\tau(\mathbf{q}) = F_v(F_\theta(\mathbf{q}), F_\xi(\mathbf{q}))l, \quad (3)$$

где  $F_\theta(\mathbf{q}) = F_\theta({}^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q})\mathbf{W})$ ;  $F_\xi(\mathbf{q}) = F_\xi({}^P\mathbf{T}_D(\mathbf{q})\mathbf{W})$ . Тогда с учетом введенных обозначений время обработки одной группы швов можно представить в виде

$$T = \sum_i F_\tau(F_{\theta_i}(\mathbf{q}_P), F_{\xi_i}(\mathbf{q}_P))l_i. \quad (4)$$

Однако при использовании РТК ДС для обработки сложных узлов с большим количеством швов в связи с большей (по сравнению с промышленным роботом) инерционностью позиционера значительное влияние на время обработки всей детали оказывает время перехода между группами швов. Чтобы учесть эти составляющие, предположим, имеется заданная последовательность из  $n$  групп швов  $\{\mathbf{W}_i^1\}, \{\mathbf{W}_i^2\}, \dots, \{\mathbf{W}_i^n\}$  размером  $m_1, m_2, \dots, m_n$  соответственно, каждая группа швов обрабатывается в фиксированной конфигурации манипулятора  $\mathbf{q}^k \in \mathbf{Q}^k$  из  $\{\mathbf{Q}^1\}, \{\mathbf{Q}^2\}, \dots, \{\mathbf{Q}^n\}$ , где  $\mathbf{Q}^k$  множество конфигураций позиционера, в которых выражение (4) отклоняется от минимума не более чем на заданную величину  $\Delta_{\max}$ , т.е. каждому  $\{\mathbf{W}_i^k\}$  соответствует область  $\mathbf{Q}^k$ , в пределах которой обработка всех швов группы является оптимальной. Тогда время обхода заданной последовательности швов определяется как

$$T^n = \sum_{k=1}^n \left( \max_i \{ \eta_i |q_i^k - q_i^{k+1}| \} + t_{app} \cdot \begin{cases} 1, & q^k \neq q^{k+1} \\ 0, & q^k \equiv q^{k+1} \end{cases} + \sum_i \Omega \cdot \begin{cases} 1, & q_i^k \neq q_i^{k+1} \\ 0, & q_i^k \equiv q_i^{k+1} \end{cases} \right), \quad q_i^k \in \mathbf{Q}^k, \quad (5)$$

где  $\eta_i$  — весовые коэффициенты, определяемые скоростью движения звеньев позиционера,  $t_{app}$  — время отхода/подхода инструмента,  $\Omega$  — штраф на движение каждым суставом позиционера, минимизирующий переходы, равнозначные по времени, но различные по объему движения.

В результате задача оптимального управления манипулятором при сварке группы швов состоит в следующем: необходимо найти такие значения  $\mathbf{q}^k$ , которые обеспечат минимум критерия (5) с учетом ограничений на конфигурацию манипулятора  $\mathbf{q}^k \in \mathbf{Q}^k$ , а также весовых коэффициентов  $\eta_i$ , определяемых скоростью движения каждого звена позиционера, и времени подхода

инструмента  $t_{app}$ . Однако на практике последовательность сварки швов, как правило, не фиксируется (за исключением случаев, когда конструкции необходимо придать первоначальную жесткость за счет "прихватки" первых нескольких швов). Поэтому существует возможность оптимизации времени обхода путем нахождения оптимальной последовательности групп сварных соединений.

Исходя из вышесказанного, задача оптимального управления позиционером при обработке нескольких групп швов формулируется следующим образом: найти такую последовательность присоединенных координат позиционера  $\{q^{k_1}, q^{k_2}, \dots, q^{k_n}\}$ , которая бы обеспечивала минимальное время (5) обхода всех  $q^k$  при заданных ограничениях  $q^k \in Q^k$  и  $k_j = \text{const}$  для некоторых  $j$ . Последнее ограничение обеспечивает фиксированную позицию для некоторых групп швов, используемых при прихватке.

### Поиск оптимальной последовательности групп швов

Поставленная задача является обобщением классической задачи комбинаторной оптимизации "о коммивояжере", в которой узловые точки пути заданы с точностью до несвязных множеств (в классическом случае каждый узел задается единственной точкой). Как известно [4], задачи такого типа являются NP полными и не могут быть решены за полиномиальное время. Поэтому применяют различные эвристические алгоритмы, дающие приемлемые с инженерной точки зрения решения [5], одним из которых является метод 2-перестановки [5]. В данной работе этот метод усовершенствован применительно к рассматриваемой задаче, причем в отличие от классического метода 2-перестановки предложенный алгоритм использует оригинальную процедуру вычисления целевой функции, основанную на динамическом программировании (так как перестановка элементов последовательности не сохраняет узловых точек от предыдущего решения, что требует пересчета оптимального пути и нахождения соответствующих узловых точек). При этом для сокращения времени вычислений нахождение решения методом динамического программирования начинается не с начальной точки, а с точки, предшествующей заменяемой точке с меньшим индексом.

Как показали проведенные расчеты, разработанный алгоритм дает оптимальное или квазиоптимальное решение за гораздо меньшее время, чем полный перебор. Причем при количестве групп швов более 10 (при сетке 5 град), классический алгоритм перебора вообще не позволяет получить решение за приемлемое время. Аналогичный результат получен и для 7 групп швов при сетке 1 град. В качестве примера на рис. 1 изображена эволюция последовательности обхода семи групп швов, которая подтверждает эффективность предложенного метода.

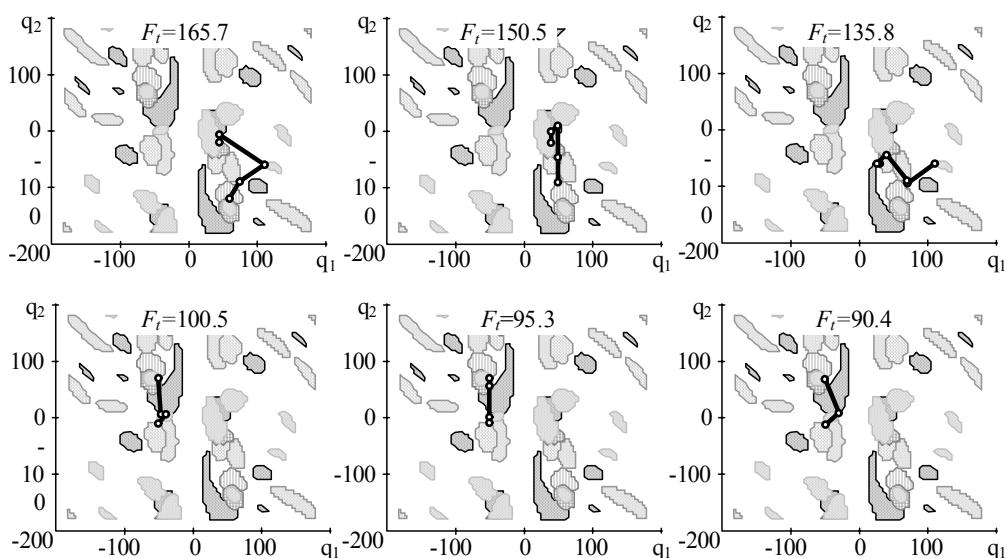


Рис. 1. Эволюция пути обхода для модифицированного алгоритма 2-перестановки

## Оптимальная группировка швов

Ранее предполагалось, что до решения задач оптимизации швы уже объединены в фиксированные группы. Однако порядок объединения швов также является предметом оптимизации, довольно существенно влияющим на результаты работы вышеописанных алгоритмов и, в конечном итоге, на общее время обработки изделия.

С учетом проведенных выше обозначений задача группировки швов формулируется следующим образом: *Найти разбиение совокупности швов  $\{W_i\}$  на оптимальное количество непесекающихся подмножеств  $W^{(1)} \dots W^{(n)}$  таких, что  $W^{(i)} \cap W^{(j)} = \emptyset$ ,  $i \neq j$  и  $\bigcup_i W^{(i)} = \{W_i\}$  и обеспечивается минимум суммарного времени обхода всех групп швов, в оптимальной последовательности по оптимальному пути. При этом время обхода определяется выражением (5).* Таким образом, для разбиения множества швов на оптимальный набор групп требуется выполнить итеративный алгоритм разбиения, который для определения близости швов также использует итеративный алгоритм 2-перестановки для определения оптимальной последовательности швов, который в свою очередь включает в себя итеративный алгоритм динамического программирования. Сложность такого алгоритма равна  $O(n^4)$ . Поэтому далее предлагается алгоритм группировки швов, основанный на взаимной близости ориентации швов относительно вектора гравитации.

Исходя из содержательного смысла задачи, определим функцию расстояния между двумя швами следующим образом:

$$\rho_{ij} = \sqrt{w_\theta^2 (|\theta_i| - |\theta_j|)^2 + w_\xi^2 (|\xi_i| - |\xi_j|)^2}, \quad (1)$$

где  $w_\theta$  и  $w_\xi$  — весовые коэффициенты, задаваемые пользователем. Тогда рассматриваемую задачу группировки швов можно свести к классической проблеме кластеризации точек на плоскости.

В настоящее время существует большое количество алгоритмов кластеризации точек на плоскости. Рассмотрим ниже эффективность алгоритма К-средних реализованного в пакете Matlab. Данный алгоритм использовался со следующими параметрами: 'dist'='sqEuclidean' 'rep' = 80, 'Maxiter' = 500, 'EmptyAction'='drop'). На рис.2 изображены группы швов на плоскости  $\theta, \xi$  до и после группировки. А на рис. 3 показаны пути обхода групп швов без применения группировки и с использованием ее. Приведенный пример показывает, что группировка швов позволила уменьшить время обхода групп швов на 12%, что подтверждает необходимость использования группировки швов и эффективность выбранного критерия оценки расстояния между швами (1).

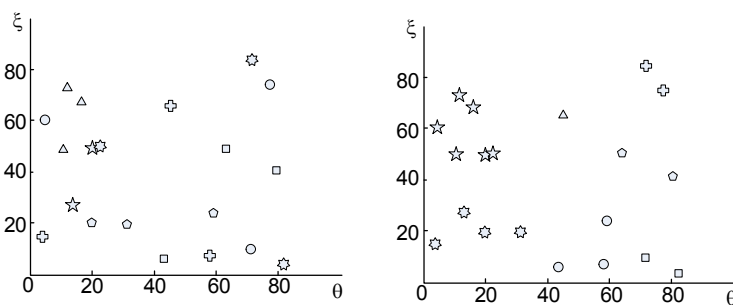


Рис. 2. Разбиение швов на группы

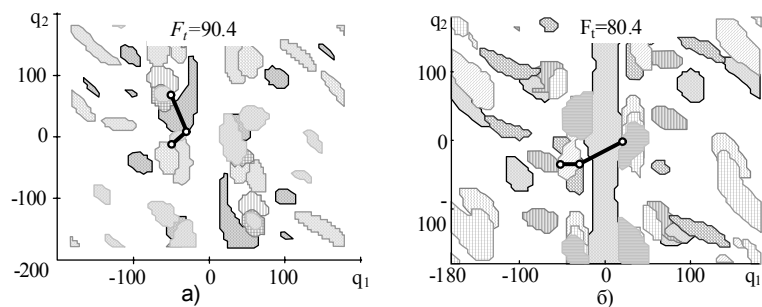


Рис. 3. Оптимальные траектории позиционера до (а) и после (б) разбиения на группы

### Заключение

Разработанные алгоритмы позволяют автоматизировать процесс подготовки управляющих программ для РТК дуговой сварки и существенно сократить время обработки изделия. Они реализованы в САПР РТК Robotax и используются для решения реальных производственных задач.

## OPTIMAL CONTROL OF POSITIONER FOR PROCESSING OF GROUPED WELDING JOINTS

K.I. SIOMKIN

### Abstract

The paper focuses on optimal control of welding positioner while processing grouped welding joints. It is proposed an optimization algorithm, which minimizes the inter-group transition times, and welding joints clustering routines. The efficiency of the developed techniques is validated by an application example.

### Литература

1. Бернадский В.Н. // Сварщик. 2001. № 5. С. 4–5.
2. Тимченко В.А. // Сварщик. 1998. № 2. С. 8–9.
3. Справочник по специальным работам. Сварочные работы в строительстве / Под ред. В.Д. Тарана М., 1971.
4. Пападимитриу Х.Х. Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М., 2000. С. 352.
5. Рейнгольд Э., Нивергельт Ю., Део Н. Комбинаторные алгоритмы. Теория и практика М., 1980. С. 124–194.