



УДК 621.791.753

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕСТИРУЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Г. А. ЦЫБУЛЬКИН, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Предложен алгоритм, обеспечивающий ориентацию манипуляционного робота по нормали к тестируемой поверхности в условиях неопределенности относительно ее положения в рабочем пространстве робота. Алгоритм синтезирован в результате решения задачи минимизации функционалов, характеризующих текущее расстояние от некоторой виртуальной плоскости до тестируемой поверхности при движении робота по заданным траекториям.

Ключевые слова: роботизация сварочных процессов, измерения, алгоритм, автоматическая ориентация

При роботизации процессов восстановительной наплавки изношенных деталей или термической правки деформированных тонколистовых конструкций возникает ряд задач, связанных с необходимостью предварительно (и в ходе самих процессов) определять геометрические параметры поверхностей, обрабатываемых деталей. Иногда можно обойтись измерениями деформаций лишь в характерных точках этих поверхностей. Один из алгоритмов локализации таких точек и определения в них деформаций с помощью манипуляционных роботов предложен в работе [1] и практически реализован при создании автоматизированного комплекса для термической правки, описанного в [2].

В работе [1] предполагалось, что измерительное устройство (ИУ), которым оснащается манипуляционный робот, заранее сориентировано по нормали к так называемым плоскостям уровня [3], характеризующим рельеф тестируемой поверхности. Вопросы, относящиеся к самой процедуре ориентирования ИУ, в работе [1] не рассматривались. Между тем, если указанная поверхность расположена в рабочем пространстве робота произвольным образом, а именно так, что упомянутые плоскости уровня не обязательно параллельны одной из координатных плоскостей системы координат робота, то процесс ориентирования ИУ в этом случае значительно усложняется. Это объясняется тем, что ориентирование обычно осуществляют путем обучения робота, при режиме ручного управления выполняют последовательность целенаправленных движений ИУ с одновременным измерением каким-либо образом его положения относительно нормали к тестируемой поверхности. И только после совмещения продольной оси ИУ с указанной нормалью производят запись угловых координат в запоминающем устройстве системы управления роботом.

Очевидно, что такой метод ориентирования имеет ряд недостатков. В частности, время обучения робота довольно продолжительное (иногда соизмеримо со временем выполнения основных тех-

нологических операций), а точность ориентации невысокая и зависит от опытности и квалификации оператора. В результате точность последующего измерения рельефа тестируемых поверхностей может оказаться недопустимо низкой.

В связи с этим весьма актуальным представляется решение задачи, связанной с автоматизацией самого процесса ориентирования ИУ относительно тестируемых поверхностей. Однако, насколько нам известно из публикаций [4–8], успехи в этом направлении пока весьма незначительны.

В настоящей работе представлен один из алгоритмов автоматического ориентирования, обеспечивающий в условиях неопределенности положения тестируемой поверхности заданную точность ориентации и существенно упрощающий процедуру обучения манипуляционного робота. Алгоритм синтезируется в результате решения задачи минимизации функционалов, характеризующих текущее расстояние от некоторой заданной виртуальной плоскости до тестируемой поверхности при движении измерительного устройства по специально заданным траекториям.

Формулировка задачи. Рассмотрим классическую (антропоморфную) кинематическую схему манипуляционного робота (рис. 1). Согласно этой схеме робот представляет собой пятизвенный механизм, связанный вращательными сочленениями. В качестве базовой системы координат робота используется декартова система $0xyz$. Относительное положение звеньев определяется угловыми координатами q_i ($i = 1, \dots, 5$). Последнее (пятое) звено соединено с ИУ, предназначенным для определе-

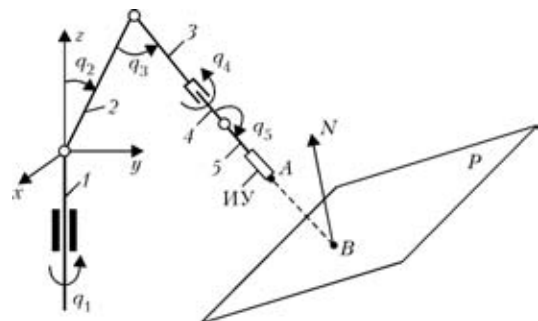


Рис. 1. Схема робота с ИУ и тестируемой поверхностью P : 1–5 — здесь и далее номера звеньев; остальные обозначения см. в тексте



ния расстояния D от точки A до поверхности P вдоль осевой линии ИУ. Продольная ось ИУ совпадает с этой осевой линией.

В рабочем пространстве робота расположена плоская поверхность P . Ее положение относительно базовой системы координат робота не известно, а следовательно, не определена ориентация продольной оси ИУ (отрезок AB на рис. 1) относительно указанной поверхности. Существует лишь возможность измерять с помощью ИУ расстояние D . Согласно рис. 1 точка A располагается в торце ИУ, точка B находится на поверхности P , N — нормаль к плоскости P .

Задачу автоматизации процесса ориентирования ИУ сформулируем следующим образом: требуется синтезировать такой алгоритм изменения угловых координат q_i , который на основе текущей информации о расстоянии D обеспечил бы автоматическую ориентацию продольной оси ИУ по нормали к поверхности P .

Синтез алгоритма ориентации. На первый взгляд может показаться, что из-за дефицита информации о положении поверхности в системе координат робота решение этой робототехнической задачи не возможно. Однако при более внимательном рассмотрении оказалось, что если использовать определенный технический прием, позволяющий получить недостающую информацию, то решение данной задачи вполне возможно.

Суть одного из таких приемов состоит в следующем. Пусть зафиксировано некоторое положение (конфигурация) манипуляционного робота с грубой ориентацией измерительного устройства ИУ относительно плоскости, например, изображенной на рис. 1. Пусть, кроме того, выполняется условие $q_5 = \pi - \Delta q_5$, где Δq_5 — достаточно малое приращение угловой координаты q_5 . Если теперь ИУ привести в движение путем изменения лишь одной угловой координаты q_4 , то точка A будет двигаться по окружности, расположенной в некоторой виртуальной плоскости W , ортогональной продольной оси звена 4, а изображающая точка B при этом будет описывать эллипс на плоскости P (рис. 2).

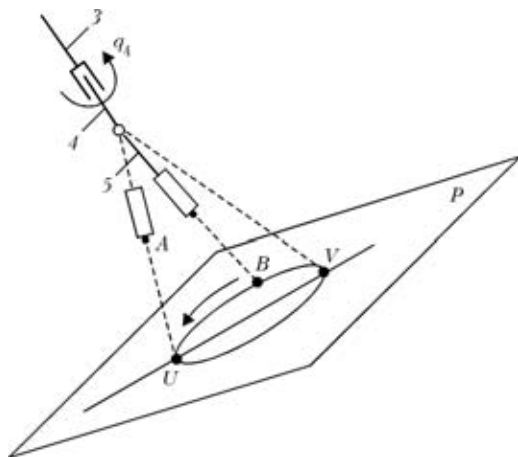


Рис. 2. Схема движения изображающей точки B по эллипсу при изменении угловой координаты q_4

Ось UV этого эллипса перпендикулярна линии пересечения плоскостей W и P . Очевидно, только тогда, когда изображающая точка находится в одной из вершин эллипса U или V , линия UV и осевые линии звеньев 4 и 5 лежат в одной плоскости, перпендикулярной плоскости P (рис. 3). Следовательно, если теперь перемещать изображающую точку B по линии UV , например, от точки U в направлении к точке V путем изменения угловой координаты q_5 при «замороженных» остальных координатах, то в точке B^* произойдет совмещение осевой линии AB с нормалью N к плоскости P .

Таким образом, для окончательного решения данной задачи остается локализовать точки U и B^* . С этой целью используем ИУ. Поскольку в общем случае плоскости W и P не параллельны, то расстояние D (равное отрезку AB) при движении точки B по эллипсу (рис. 2) будет изменяться и станет минимальным в точке U . Следуя [9], координаты этой точки можно определить из соотношения

$$q_4^U = \arg \min_{0 \leq q_4 \leq 2\pi} D[q_i(t)], \quad (1)$$

где q_4^U — пока еще неизвестная угловая координата точки U ; $D[q_i(t)]$ — функционал, характеризующий расстояние D в зависимости от координат q_i . Координата точки B^* (рис. 3) может быть найдена из аналогичного соотношения

$$q_5^{B^*} = \arg \min_{q_{n5} \leq q_5 \leq q_{b5}} D[q_i(t)], \quad (2)$$

где q_{n5}, q_{b5} — соответственно нижний и верхний пределы значений угла q_5 , назначаемые заранее при решении конкретной задачи.

Итак, алгоритм ориентирования ИУ относительно тестируемой поверхности P работает следующим образом. Сначала в режиме обучения устанавливается ИУ вблизи тестируемой поверхности P на нужном расстоянии и достаточно грубо ориентируется по нормали к этой поверхности. Затем запускается программа, обеспечивающая пошаговое (поточечное) движение ИУ по окружности над

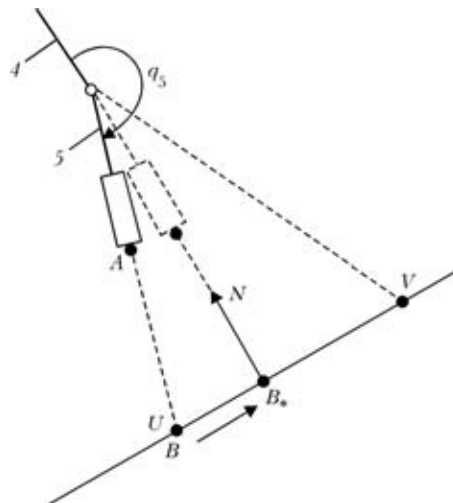


Рис. 3. Схема движения изображающей точки B вдоль линии UV при изменении угловой координаты q_5



поверхностью P путем изменения координаты q_4 при остальных «замороженных» координатах. В каждой локальной точке измеряется расстояние D и проверяется условие

$$D_k - D_{k-1} < 0, \quad (3)$$

где $k = 1, 2, \dots$ — номер локальной точки. Программа выполняется до тех пор, пока не будет нарушено условие (3), т. е. пока изображающая точка B не совпадет с точкой U (см. рис. 2).

После этого запускается аналогичная программа, также осуществляющая поточечное движение ИУ, но теперь уже по линии UV путем изменения угловой координаты q_5 при неизменных остальных координатах. При этом, как и прежде, в каждой точке k измеряется расстояние D и проверяется условие (3). Как только произойдет нарушение этого условия, точка B совпадет с целевой точкой B_* , в которой продольная ось ИУ будет совмещена с нормалью N к плоскости P . В завершение работы алгоритма производится запись угловых координат в запоминающем устройстве системы управления роботом. На этом процесс автоматического ориентирования ИУ относительно плоскости P заканчивается.

Экспериментальная проверка алгоритма. Для проверки работоспособности синтезированного алгоритма проведен ряд экспериментов с помощью шестизвеного манипуляционного робота РМ 01 (PUMA-560). Кинематическая схема РМ 01 отличается от схемы, изображенной на рис. 1, лишь дополнительным (шестым) звеном, благодаря которому ИУ вращается вокруг продольной оси этого звена.

В качестве ИУ использован датчик расстояния потенциометрического типа. Поскольку датчик конструктивно устроен так, что его продольная ось совпадает с продольной осью шестого звена РМ01, то изменение угловой координаты q_6 не оказывает влияние на положение и ориентацию ИУ. Тестируемую плоскую поверхность размером 500×500 мм разместили в рабочем пространстве РМ 01 под углом 36° к плоскости xy системы координат робота. ИУ в режиме обучения установили примерно в центре тестируемой поверхности и приблизительно сориентировали его относительно нормали к этой поверхности.

После таких простых подготовительных операций запускалась программа, реализующая алгоритм автоматической ориентации ИУ. Отработка программы длилась около 35 с. В результате ИУ автоматически устанавливалось по нормали к тестируемой поверхности.

Для окончательного вывода относительно эффективности предложенного алгоритма проведена экспериментальная проверка точности ориентирования ИУ, заключающаяся в следующем. В виртуаль-

ной плоскости W , которая теперь уже параллельна координатной плоскости tb так называемой системы координат инструмента $Ftbn$, выбраны три точки, отстоящие друг от друга на расстоянии $\Delta l = 200$ мм. В этих точках (при предварительно установленной ориентации) с помощью ИУ измеряли расстояния D_1 , D_2 и D_3 . Поскольку ось n направлена вдоль продольной оси ИУ, то в случае точной ориентации относительно тестируемой поверхности должно выполняться условие $D_1 = D_2 = D_3$. Степень нарушения этого условия как раз и будет характеризовать погрешность в ориентировании ИУ относительно тестируемой поверхности.

В результате измерений получены следующие усредненные данные: $D_1 = 52,3$ мм, $D_2 = 52,9$ мм, $D_3 = 52,7$ мм. Подставляя эти значения в формулы

$$\psi_\tau = \arctg \frac{D_2 - D_1}{\Delta l}, \quad \psi_b = \arctg \frac{D_3 - D_1}{\Delta l},$$

получаем $\psi_\tau = 10,3'$, $\psi_b = 6,8'$.

Как и следовало ожидать, отклонения осевой линии ИУ от нормали к тестируемой поверхности, характеризуемые здесь углами ψ_τ и ψ_b , незначительны. Следует заметить, что при ориентировании ИУ в ручном режиме эти углы обычно на порядок больше.

Таким образом, экспериментальная проверка показала достаточно высокую эффективность предложенного алгоритма автоматического ориентирования ИУ относительно тестируемой поверхности, расположенной в рабочем пространстве робота произвольным образом: во-первых, существенно повысилась точность ориентации ИУ; во-вторых, заметно упростилась сама процедура ориентирования; в-третьих, значительно уменьшилось время, затрачиваемое на ориентирование.

1. Цыбульский Г. А. Алгоритм поиска максимальных деформаций листовых конструкций с помощью манипуляционного робота // Автомат. сварка. — 1999. — № 6. — С. 55–57.
2. Автоматизированная термическая правка сварных тонколистовых конструкций // Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, Г. А. Цыбульский и др. // Там же. — 2003. — № 7. — С. 3–8.
3. Торп Дж. Начальные главы дифференциальной геометрии / Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 360 с.
4. Куафе Ф. Взаимодействие робота с внешней средой / Пер. с фр. — М.: Мир, 1985. — 285 с.
5. Черноуско Ф. А., Болотник Н. Н., Градецкий Р. Г. Манипуляционные роботы: динамика, управление, оптимизация. — М.: Наука, 1989. — 368 с.
6. Вукобратович М., Стокич Д., Кирчански Н. Неадаптивное и адаптивное управление манипуляционными роботами / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 376 с.
7. Хорн Б. К. П. Зрение роботов / Пер. с англ. — М.: Мир, 1989. — 487 с.
8. Козлов Ю. М. Адаптация и обучение в робототехнике. — М.: Наука, 1990. — 248 с.
9. Цыбульский Г. А. Двухуровневое координирующее управление манипуляционным роботом с кинематической избыточностью // Пробл. управления и информатики. — 1995. — № 3. — С. 143–150.

Suggested is the algorithm for ensuring orientation of the manipulation robot normal to the test surface under the conditions of uncertainty relative to its position in a work space of the robot. The algorithm was synthesised as a result of solution of the problem of minimising the functionals that characterise the current distance from some virtual plane to the test surface in movement of the robot along the set paths.