

ИНФОРМАТИКА

УДК 621.865

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СЕГМЕНТАЦИИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНЫХ СКАНЕРОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

А.П. ПАШКЕВИЧ, Ч.М. САВКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 20 сентября 2007*

Произведен сравнительный анализ алгоритмов сегментации данных лазерных сканеров, применяемых в адаптивных роботизированных комплексах сварки по критериям быстродействия, точности и чувствительности. Предложены новые алгоритмы, которые превосходят аналоги по быстродействию не менее чем в пять раз, при этом незначительно уступают по критериям точности и чувствительности.

Ключевые слова: сегментация, лазерный сканер, промышленный робот, дуговая сварка.

Введение

С развитием современного производства возрастает необходимость в увеличении степени автономности эксплуатируемых технологических комплексов. Решить проблему автономности позволяет применение систем машинного зрения. В качестве таких систем широкое распространение получили дальнометрические лазерные сканеры. За последние тридцать лет сканеры претерпели серьезные изменения массогабаритных параметров, что расширило область их применения. Одной из таких областей являются адаптивные робототехнологические комплексы (РТК) дуговой сварки [1].

Одним из условий работы адаптивных комплексов в режиме реального времени является применение специализированных алгоритмов обработки данных, в основе которых положены методы сегментации. В известных работах описано много алгоритмов сегментации, применяемых в различных областях производства [2, 3], однако, выбор для работы в РТК дуговой сварки обладает своей спецификой. Поэтому возникает необходимость более детального рассмотрения проблемы выбора алгоритмов сегментации данных дальнометрических лазерных сканеров, применяемых в адаптивных РТК дуговой сварки.

Постановка задачи (Проблема сегментации данных)

В процессе дуговой сварки в результате однократного сканирования сенсор генерирует массив точек $p = \{p_{x,i}, p_{y,i}\}$, $i = 1, \dots, n$, описывающий рабочую поверхность в системе координат сканера (рис. 1). Отклонения величин $p_{x,i}$, $p_{y,i}$ от действительных значений распределены по гауссовскому закону с дисперсиями σ_x^2 , σ_y^2 [4].

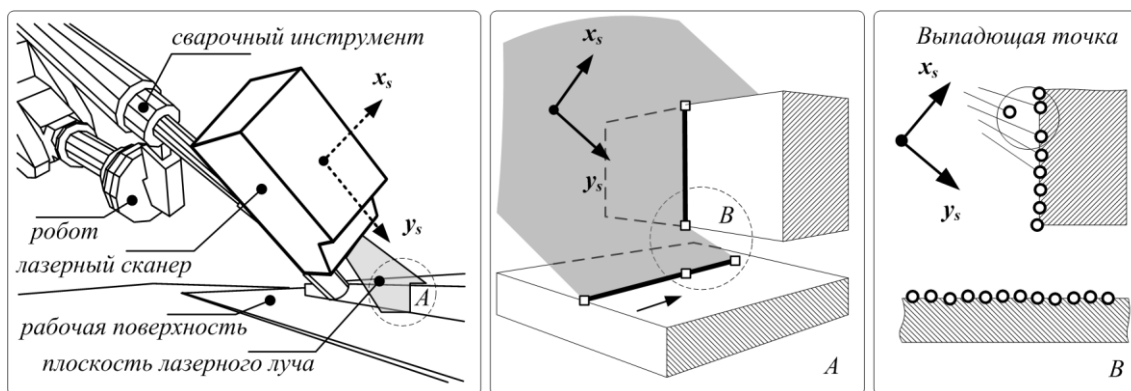


Рис. 1. Управление сварочным процессом при помощи лазерного сканера

Число точек генерируемого массива обычно равно 256, 512, 1024 или 2048. Оперировать таким количеством данных в режиме реального времени достаточно трудно, поэтому используют алгоритмы сжатия данных (рис. 1). В основе таких алгоритмов положены методы сегментации, задача которых — аппроксимация кусочно-линейной функции p множеством прямолинейных сегментов $s = \{s_k\}, k \leq n$.

Поэтому в процессе обработки данных лазерного сканера необходимо решить следующие задачи: определение количества сегментов k в массиве точек p , определение параметров прямолинейного сегмента, определение принадлежности точки p_{i+1} сегменту s_k . Для обработки данных лазерных сканеров наиболее важное значение играют две последние задачи, так как в этом случае нет возможности заранее определить количество сегментов.

Алгоритмы сегментации

Известные алгоритмы сегментации данных можно разделить на два вида: рекуррентные и нерекуррентные. В первых работах, посвященных адаптивному управлению роботами на основе лазерных сканеров, применяли преимущественно рекуррентные алгоритмы. Такие алгоритмы давали приемлемые быстродействие и точность.

Общая схема рекуррентного метода состоит из следующих шагов: (1) изначально массив p разбивается на k сегментов; (2) вычисляем для s_k значения a, b ; (3) для всех p_i из сегмента s_k определяем δ_i ; (4) если $|\delta_i| \geq \varepsilon$, то разбиваем s_k на $s_{k,1}$ и $s_{k,2}$, сохраняем параметры $s_{k,1}$, начинаем $s_k = s_{k,2}$, иначе переходим к s_{k+1} ; (5) переходим к пункту 2; (6) рекуррентно повторяем пункты 2–5 для полученного множества s , пока разбиение возможно; (7) рекуррентно объединяются коллинеарные сегменты.

В одной из первых работ [4] для определения принадлежности точки p_{i+1} сегменту s_k предлагалось использовать сумму квадратов отклонений:

$$\delta_i = \sum_{i=1}^k e_i^2, \text{ где } e = p_{y,i} - (a p_{x,i} + b).$$

Как было показано в [5], быстродействия этого способа недостаточно, поэтому было предложено рассчитывать величину отклонения как кратчайшее расстояние от точки p_i до прямолинейного сегмента s_k по формуле:

$$\delta_i = (b + a p_{x,i} - p_{y,i}) / \sqrt{a^2 + 1}.$$

С развитием производственных мощностей возникла необходимость в увеличении производительности РТК и точности выполняемых ими работ. Требовалось применение более быстродействующих и не менее точных алгоритмов обработки данных. Нерекуррентные методы удовлетворяли этим требованиям.

Общая схема нерекуррентного метода состоит из следующих шагов: (1) изначально s_k состоит из двух точек; (2) определяем значения a, b ; (3) рассчитываем величину отклонения

δ_i для p_{i+1} ; (4) если $|\delta_i| \geq \varepsilon$, то сохраняем s_k , инициализируем s_{k+1} ; иначе, добавляем p_i в s_k ; (5) переходим к шагу 2.

Один из первых нерекуррентных алгоритмов обработки данных лазерного сканера был представлен в работе [3]. Авторы предлагали аппроксимировать множество точек поверхности B множеством точек прямолинейного сегмента A , таким образом, чтобы расстояние Хаусдорфа между множествами A и B не превышало значение порога ε , где величина ε задается пользователем. Расстояние Хаусдорфа $H(A, B)$ вычисляется по следующей формуле:

$$H(A, B) = \max \left[\max_{p_1 \in B} \min_{p_2 \in A} \|p_1 - p_2\|, \max_{p_1 \in A} \min_{p_2 \in B} \|p_1 - p_2\| \right],$$

где $\|p_1 - p_2\|$ — Евклидово расстояние между точками p_1 и p_2 .

Этот способ не получил широкого распространения в связи с низкой чувствительностью метода. Устранить такой недостаток позволило применение метода наименьших квадратов [5]. Параметры прямолинейного сегмента в этом случае рассчитываются по формулам:

$$a = \left(\sum_{i=1}^n p_{x,i} \sum_{i=1}^n p_{y,i} - n \sum_{i=1}^n p_{x,i} p_{y,i} \right) / \left(\left(\sum_{i=1}^n p_{x,i} \right)^2 - n \sum_{i=1}^n p_{x,i}^2 \right),$$

$$b = \left(\sum_{i=1}^n p_{x,i} \sum_{i=1}^n p_{x,i} p_{y,i} + \sum_{i=1}^n p_{y,i} \sum_{i=1}^n p_{x,i}^2 \right) / \left(n \sum_{i=1}^n p_{x,i}^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_{x,i} \right)^2 \right)$$

Применение метода наименьших квадратов обеспечивает наивысшую точность по сравнению с остальными из рассмотренных методов, но его быстроедействие недостаточно для современных систем машинного зрения с многоуровневыми алгоритмами обработки данных. Для проведения сравнительного анализа предлагается два алгоритма по нерекуррентной схеме: сегментация по угловому отклонению и по абсолютному отклонению [6]. В обоих случаях прямолинейный сегмент s_k описывается уравнением прямой вида $y - y' = a \cdot (x - x')$, где (x', y') — любая точка, принадлежащая прямой. Для обоих алгоритмов сегментации значения параметров сегмента s_k на i -м шаге (a_i, x'_i, y'_i) одинаковы. Коэффициент наклона a_i определяется как среднее значение коэффициентов наклона отрезков $[p_1, p_2], [p_2, p_3], \dots, [p_{i-1}, p_i]$:

$$a_i = i^{-1} \sum_{k=2}^i (p_{y,k} - p_{y,k-1}) / (p_{x,k} - p_{x,k-1}).$$

Величины x'_i, y'_i вычисляются как средние значения всех точек $p_{k,i}$ сегмента s_k вплоть до i -й итерации по формулам:

$$x'_i = i^{-1} \sum_{k=2}^i (p_{x,k} - p_{y,k-1}), \quad y'_i = i^{-1} \sum_{k=2}^i (p_{y,k} - p_{y,k-1}).$$

Для первого алгоритма (сегментация по угловому отклонению) отклонение и пороговая функция вычисляются по формулам:

$$\delta_i = a_i - (p_{y,i+1} - y'_i) / (p_{x,i+1} - x'_i), \quad \varepsilon \delta_i = i^{-1} \left(\varepsilon_0 + \sum_{k=1}^i |\delta_k| \right),$$

где ε_0 — коэффициент коррекции количества выпадающих точек.

Для второго алгоритма (сегментация по абсолютному отклонению) вычисляется как кратчайшее расстояние от точки p_{k+1} до прямой сегмента s_k следующим образом:

$$\delta_i = a_i (p_{y,i+1} - x'_i) - (p_{y,i+1} - y'_i) / \sqrt{1 + a_i^2}.$$

Недостающие точки прямолинейных отрезков определяются как точки пересечения смежных сегментов s_{k-1}, s_k и вычисляются следующим образом:

$$\begin{cases} x_{k-1}^* = x_k^* = (a_{k-1} x'_{k-1} - a_k x'_k + y'_k - y'_{k-1}) / (a_{k-1} - a_k); \\ y_{k-1}^* = y_k^* = (a_{k-1} a_k (x'_{k-1} - x'_k) + a_{k-1} y'_k - a_k y'_{k-1}) / (a_{k-1} - a_k). \end{cases}$$

Преимущества предложенных алгоритмов заключаются в простоте вычисления параметров прямолинейного сегмента a_i, x'_i, y'_i , так как нет необходимости рассчитывать параметры полностью (частично параметры вычислены на предыдущих итерациях).

Моделирование процесса сегментации

Тестирование алгоритмов осуществляется на основе модели лазерного сканера, реализованного в программном пакете ROBOMAX. Разработанная модель [7, 8] предоставляет возможность изменять такие параметры, как: диапазон измерения координаты Δx , диапазон изменения координаты Δy , разрешающую способность n сканера, а также значения максимальных погрешностей измерения $\delta_{x,\max}, \delta_{y,\max}$.

Параметры $\delta_{x,\max}, \delta_{y,\max}$ позволяют задавать максимальные отклонения данных лазерного сканера от действительных значений в соответствии с Гауссовым законом распределения. Следует отметить, что при проведении работы основной акцент делается на производительность, относительную точность и чувствительность алгоритмов сегментации к данным, поэтому не учитываются систематические ошибки, возникающие на практике и зависящие, в основном, от аппаратного обеспечения и рабочей среды.

Анализ представленных алгоритмов выполняется при равных условиях для типового соединения внахлест (рис. 1). Ось z расположена вдоль сварного соединения. Плоскость (xoy) системы координат датчика перпендикулярна направлению сварного стыка. Ось y наклонена к нормали поверхности на угол, равный 45 градусам. Расстояние от центра системы координат датчика до рабочей поверхности — 100 мм (вдоль оси x). Значения параметров сканера: $\Delta x = 75$ мм, $\Delta y = 50$ мм, $n = 1024$, $\delta_{x,\max} = \delta_{y,\max} = 0,05$ мм. Значение порога чувствительности алгоритмов $\varepsilon_0 = \varepsilon = 0,1$ мм.

Тестирование по всем критериям производилось на ЭВМ со следующими характеристиками: процессор AMD Athlon (1,4 ГГц), 512 Мб оперативной памяти. Тест выполнялся десять тысяч раз. На каждой итерации формировались новые искажения в соответствии с гауссовским законом распределения. На вход всех алгоритмов передавался один и тот же массив точек поверхности с внесенными искажениями).

Критерии сравнения алгоритмов

В зависимости от области применения лазерных сканеров, к алгоритмам сжатия данных сенсора предъявляются различные требования. Так, при дуговой сварке для выбора алгоритма обработки данных лазерных сканеров важное значение имеют следующие параметры: быстродействие, точность определения геометрических параметров стыка деталей, предельная угловая чувствительность алгоритма. Рассмотрим эти критерии подробнее.

Быстродействие является одним из важнейших критериев выбора алгоритмов сегментации, так как он определяет возможность работы системы в режиме реального времени и частоту сканирования (количество профилей в секунду). От частоты сканирования напрямую зависит степень сложности отслеживаемых системой сварных стыков, так как с увеличением частоты сканирования возрастает детализация стыка. Алгоритмы реализованы на языке программирования С. По результатам испытаний вычисляется среднее значение времени, затраченное на выполнение каждого алгоритма.

Точность определения характерных точек профиля стыка свариваемых деталей – следующий по важности критерий выбора алгоритмов обработки данных, так как определяет качественные характеристики алгоритмов. В качестве показателя критерия был введен коэффициент точности μ , представляющий собой отношение среднеквадратического значения ошибки определения характерной точки σ_{est} к среднеквадратическому значению искажения данных σ_{dst}

лазерного сканера $\mu = \sigma_{est} / \sigma_{dst}$, где $\sigma_{est} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \sqrt{e_{vx,i}^2 + e_{vy,i}^2}$, $\sigma_{dst} = n^{-1} \sum_{i=1}^n \sqrt{e_{px,i}^2 + e_{py,i}^2}$,

e_i — отклонение от действительного значения величин $v_{x,i}$, $v_{y,i}$ или $p_{x,i}$, $p_{y,i}$ соответственно.

Показатель точности μ позволяет произвести сравнительную оценку определения характерных точек профиля сварного стыка различными алгоритмами при прочих равных условиях.

Предельная угловая чувствительность алгоритма соответствует минимальному значению межсегментного угла (угла изменения наклона поверхности) α_{min} , который алгоритм способен обнаружить с желаемым значением коэффициента точности. В этом случае испытание проводится для одного из межсегментных углов рабочей поверхности $[v_1, v_2]$ и $[v_2, v_3]$ (рис. 2). Для определения предельной угловой чувствительности алгоритма необходимо построить зависимость коэффициента точности μ от значения угла α . На рис. 3 представлен график функции $\mu(\alpha)$ при $\alpha = [5, 60]$ для предложенного алгоритма сегментации по методу наименьших квадратов. Данная кривая показывает общий характер отношения среднего значения точности определения характерной точки к точности измерения лазерного сканера. Из графика видно, что при значениях межсегментного угла менее тридцати градусов точность измерения датчика должна превышать желаемую точность определения характерной точки. Для сравнения алгоритмов достаточно одного значения угла при равном коэффициенте точности. Примем критическое значение коэффициента точности равным пяти, то есть при превышении среднеквадратического значения ошибки определения характерной точки среднеквадратического значения искажения данных лазерного сканера в пять раз. Таким образом, из графика функции $\mu(\alpha)$ при $\mu = 5$ получаем $\alpha_{min} \approx 12,4^\circ$. Для разработчика это значение гарантирует, что данный алгоритм определит характерную точку с коэффициентом точности не более пяти. Опыт повторяется для каждого из алгоритмов.

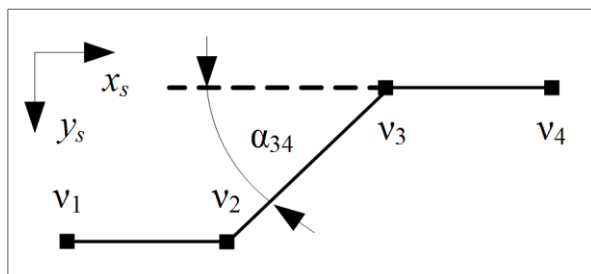


Рис. 2. Профиль стыка

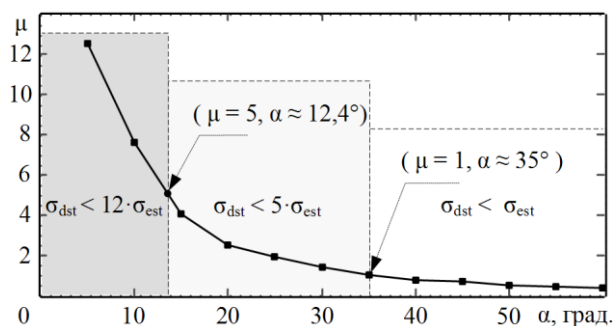


Рис. 3. Определение чувствительности

Исследование предельной чувствительности алгоритма показывает, что для определения характерной точки при малых значениях межсегментного угла (менее предельной угловой чувствительности) с заданной точностью необходимо, чтобы точность измерения лазерного сканера на порядок превышала желаемую точность.

Анализ результатов моделирования

Результаты сравнения алгоритмов сегментации данных лазерного сканера представлены в графическом виде (рис. 4) по критериям быстродействия (а), точности определения характерных точек (б) и предельной угловой чувствительности соответственно (в).

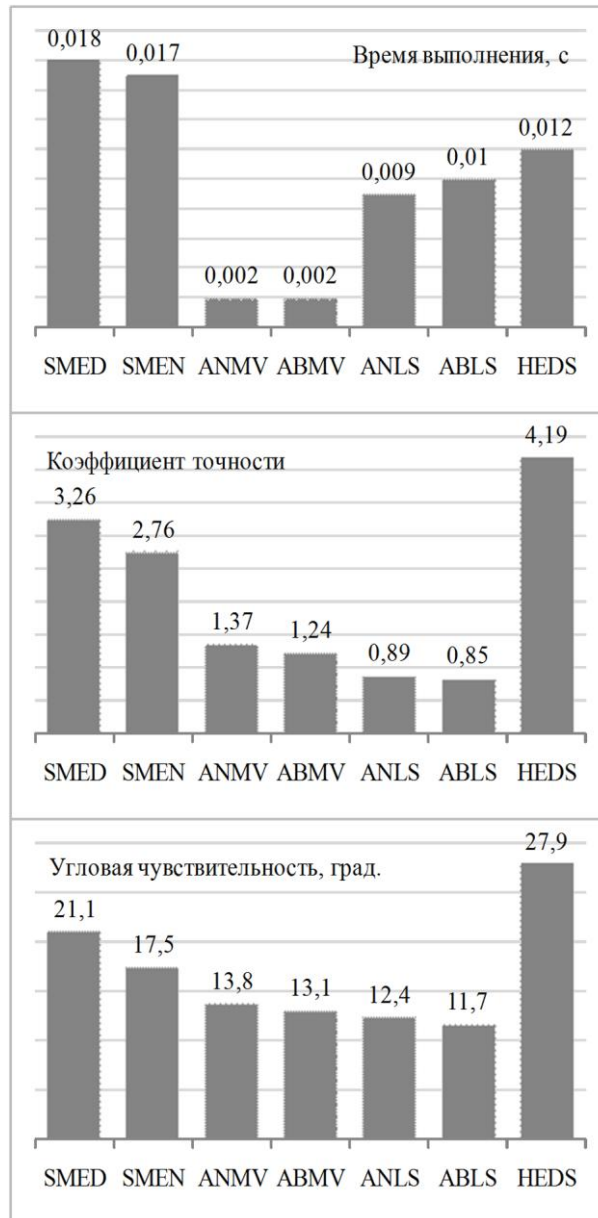


Рис. 4. Результаты моделирования

Введем следующие сокращения для алгоритмов: рекуррентный алгоритм сегментации по Евклидову расстоянию (SMED — split and merge Euclidian distance); рекуррентный алгоритм сегментации по сумме квадратов ошибки (SMEN — split and merge error norm); однопроходный алгоритм сегментации по угловому отклонению (ANMV — angle deviation, mean value); однопроходный алгоритм сегментации по абсолютному отклонению (ABMV — absolute deviation, mean value); однопроходный алгоритм сегментации по угловому отклонению по методу наименьших квадратов (ANLS — angle deviation, least squares); однопроходный алгоритм сегментации по абсолютному отклонению по методу наименьших квадратов (ABLs — absolute deviation, least squares); однопроходный алгоритм сегментации по расстоянию Хаусдорфа (HEDS — Hausdorf-Euclidian deviation segmentation).

По критерию быстродействия алгоритмов анализ показывает превосходство предложенных (ANMV, ABMV) как минимум в пять раз по сравнению с аналогами. Такой результат

позволяет увеличить частоту сканирования и, следовательно, отслеживать стыки с большей крутизной.

По критерию точности предложенные алгоритмы также превосходят аналоги, но алгоритмы, реализующие метод наименьших квадратов (ANLS, ABLs), показывают несколько большую точность определения характерных точек нежели алгоритмы, реализованные по методу средних значений (ANMV, ABMV).

По критерию предельной угловой чувствительности предложенные алгоритмы также превосходят аналоги. Так для предложенных алгоритмов значение угловой чувствительности колеблется в пределах 11,7–13,8 градусов, в то время как чувствительность аналогов изменяется от 17,5 до 27,9 градусов.

Результаты моделирования показали, что предложенные алгоритмы значительно превосходят аналоги по быстродействию, не уступая по показателям точности и предельной угловой чувствительности. Таким образом, применение предложенных алгоритмов позволит затрачивать больше процессорного времени на другие задачи и повысить тем самым эффективность системы управления в целом.

Заключение

В работе предложено два алгоритма сегментации нерекуррентного типа. Предложены критерии сравнения алгоритмов по точности определения характерных точек и предельной угловой чувствительности. Произведен сравнительный анализ предложенных алгоритмов с их аналогами по следующим критериям: быстродействие, точность определения характерных точек, предельная угловая чувствительность. Результаты сравнения показали, что предложенные алгоритмы превосходят аналоги по быстродействию более чем в пять раз, при этом не уступая по показателям точности и чувствительности.

A COMPARISON OF SEGMENTATION ALGORITHMS USING LASER SCANNER FOR ROBOTIC ARC WELDING

A.P. PASHKEVICH, CH.M. SAVKO

Abstract

A comparative analysis of data segmentation approaches for laser scanner has been performed with criteria of processing speed, accuracy and sensitiveness. The new approach about five times faster and slightly less accurate and sensitive than analogues is proposed.

Литература

1. *W-S Yoo; S-J Na* // J. of Manufacturing Systems. 2003. Vol 22 (4). P. 340–347.
2. *Jitae Kim; Suck-Joo Na*. // J. of Manufacturing Systems; 2003. Vol. 22(2). P. 73–81.
3. *Sicard P. Levine M.D.* // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. 1989. Vol. 19(4). P. 714–728.
4. *Fridenfalk M., Bolmsjo G.* // Journal of Industrial Robot. 2003. Vol. 30(5). P. 437–448.
5. *Nguyen V., Martinelli A., Tomatis N., Siegwart R.* // International Conference on Intelligent Robots and Systems. IROS'2005, Edmonton, Canada.
6. *Савко Ч.М.* // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы X Респ. науч. конф. студентов и аспирантов. Гомель: УО "ГГУ им. Ф.Скорины", 2007. Автоматизация производственных процессов. С. 156–157.
7. *Пашкевич А.П., Савко Ч.М.* // Инженерный вестник. 2006. № 1(21)/2. С. 82–86.
8. *Савко Ч.М., Пашкевич А.П.* // Современные проблемы радиоэлектроники. Сб. науч. тр. Красноярск, 2007. Приборостроение. С. 573–574.