

РОЗРОБКА МЕТОДІВ АПАРАТНОГО КОНТРОЛЮ
ЛІНІЙНИХ ІНТЕРПОЛЮЮЧИХ ПРИСТРОЇВ

Запропоновано методи лінійних інтерполюючих пристроїв

The methods of linear interpolation of control devices.

Ключові слова: інтерполяція.

Вступ

Необхідність контролю реалізації функцій лінійного інтерполювання обумовлюється тим, що вони є базовими як для контурного формоутворення, так і для основних процедур машинної графіки [1, 2]. Особливо актуальною ця проблема є для верстатів з числовим програмним керуванням, які працюють в умовах великих промислових заводів, а також для систем стратегічного призначення, для яких недопустимо одержання хибного результату.

Для організації контролю пристроїв інтерполяції знайшли застосування методи резервування та надлишкового кодування [3]. При цьому, основним методом контролю є постійне гаряче резервування арифметико-логічного блоку з порівнянням результатів виконання заданої операції основним та резервними блоками, що обумовлює велику апаратну надлишковість. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки нових принципів контролю функцій лінійної інтерполяції.

Мета дослідження

Метою даної статті є розробка нових принципів контролю лінійних пристроїв, які базуються на структурних властивостях відрізків прямих у дискретному координатному просторі. В процесі розробки принципів контролю важливо, щоб апаратні витрати блоків контролю були суттєво меншими від апаратних витрат реалізації, бо тільки в цьому випадку може бути досягнуто підвищення надійності роботи.

Розробка принципів контролю лінійних інтерполюючих пристроїв

У сучасних засобах машинної графіки для реалізації лінійного інтерполювання найбільшого поширення набув алгоритм співробітника фірми ІВМ Брезенхема І.Е. Цей алгоритм, як і ряд інших графічних побудов, оснований на розрахунках за рекурентними співвідношеннями. Згідно відзначеного алгоритму напрямком чергового елементарного кроку обчислюється за спеціальною оцінювальною функцією, яка визначає положення точки траєкторії відносно ідеальної прямої. В цілому алгоритми оцінювальної функції базуються на мікрооперації додавання і віднімання в основному початковим значенням та використаними операндами. В подальшому будемо розглядати тільки інтерполювання, яке виконується з максимальною точністю.

Доведено, що похибка інтерполювання однозначно визначається значенням оцінювальної функції [4]. Оскільки початкова та кінцева точки завжди розміщуються в вузлах координатної ґратки, то похибка інтерполювання в цих точках дорівнює нулю. Таким чином, можна констатувати, що при правильному інтерполюванні початкове $ОФ_{\Pi}$ і кінцеве $ОФ_{\kappa}$ значення оцінювальної функції рівні.

Контроль, в основу якого закладене вище сформульоване положення, в процесі апаратної реалізації потребує тільки схеми порівняння та реєстр для зберігання початкового значення оцінювальної функції. Позитивним є те, що не потрібно додаткових розрахунків, бо апріорне значення оцінювальної функції співпадає з початковим, яке необхідне для подальших розрахунків, а кінцеве значення одержується після закінчення інтерполяції. Незважаючи на зазначені переваги, факт встановлення правильності виконання інтерполювання можливий тільки після формування останнього крокового переміщення.

Для вдосконалення запропонованого принципу контролю проаналізуємо крокові переміщення, які формуються на середині відрізка прямої.

Ординатна відстань прямої $Y = МПХ/БП$ від найближчого ординатного рівня координатної ґратки в точці $X = \Delta$ дорівнює:

$$g(\Delta) = \left[\frac{МП}{БП} \Delta \right] - \frac{МП}{БП} \Delta$$

В точці $X=БП- \Delta$:

$$g(БП - \Delta) = \left[\frac{МП}{БП} (БП - \Delta) \right] - \frac{МП}{БП} (БП - \Delta) = - \left[\frac{МП}{БП} \Delta \right] + \frac{МП}{БП} \Delta$$

Оскільки віддалення ідеальної прямої від найближчих точок ґратки співпадає по модулю зі значеннями абсцис, рівних Δ , $БП-\Delta$ ($\Delta \leq \lfloor БП / 2 \rfloor$), то із одноваріантності виконання елементарних кроків під час інтерполювання вектору з максимальною точністю робимо висновок, що послідовність крокових переміщень у напрямку непровідної (меншої) координати симетрична відносно свого центру.

Визначимо значення крокових переміщень за непровідною координатою, які є найближчими до центру послідовності, оскільки вони можуть відрізнятися кількістю одиничних переміщень під час виконання першого та другого півциклів.

Якщо БП і МП парні, то точка (БП/2, МП/2) ідеальної прямої співпадає з точкою ґратки, а число одиничних крокових переміщень по непровідній координаті за перший та другий півцикли співпадають. Отже, при парних БП і МП властивість симетричності крокових переміщень по непровідній координаті виконується для всіх $\Delta = 1, БП / 2$.

Для спрощення подальших викладок введемо позначення:

$$a = \lfloor МП / 2 \rfloor, b = \lfloor БП / 2 \rfloor$$

За умови парного БП і непарного МП

$$g(b) = \left\{ \begin{matrix} МП & БП \\ БП & 2 \end{matrix} \right\} = \left\{ \begin{matrix} 2a + 1 \\ 2b \end{matrix} \right\}$$

У даному випадку в БП/2 такті по непровідній координаті можливе формування як одиничного, так і нульового елементарного кроку, оскільки похибка інтерполювання в обох випадках не перевищує половини кроку дискретизації. Для першого півоктанту формування двох крокових переміщень у суміжних тактових моментах часу неприпустиме. Таким чином робимо висновок – якщо при парному БП і непарному МП в БП/2 такті виконується одиничне крокове переміщення по непровідній координаті, то в (БП/2+1) такті значення крокового переміщення по непровідній координаті нульове, і навпаки.

За умови непарного БП і парного МП ордината ідеальної прямої в точці БП/2 дорівнює a. Відстань точки (b, a) ґратки від прямої складає:

$$a - \frac{2a}{2b+1}b = \frac{a}{2b+1},$$

а точки (b + 1, a) – a / (2b + 1). Враховуючи, що одержані відхилення менші за модулем, ніж 0,5, а також їх знаки, констатуємо, що в такті (b + 1) по непровідній координаті одиничне крокове переміщення не формується, тобто в зазначеному такті виконується горизонтальне переміщення.

Аналогічно можна показати, що з непарними значеннями БП та МП в такті (b + 1) по непровідній координаті виконується одиничне крокове переміщення.

Таким чином, послідовність крокових переміщень по непровідній координаті симетрична відносно свого центру. Виняток складають не більше двох значень крокових переміщень, які безпосередньо прилягають до центру і які визначаються парністю БП і МП.

Властивість подвійності крокових переміщень [5] дозволяє перенести отримані результати на другий півоктант.

У таблиці 1 наведені значення крокових переміщень по непровідній координаті в центрі послідовності.

Таблиця 1

Значення крокових переміщень по непровідній координаті в центрі послідовності

Ознака	Парність БП	Парність МП	Значення крокових переміщень у центрі послідовності
БП>2МП	0	0	00
	0	1	01
	1	0	0
	1	1	1
БП<2МП	0	0	11
	0	1	10
	1	0	1
	1	1	0

Запропонований принцип контролю, оснований на порівнянні початкового та кінцевого значення оцінювальної функції, можна значно покращити, якщо визначити значення оцінювальної функції в середині вектора.

У подальшому розгляді будемо враховувати, що з парним БП $\lfloor (БП + 1) / 2 \rfloor = БП / 2$, а з непарним $\lfloor (БП + 1) / 2 \rfloor = \lfloor БП / 2 \rfloor + 1$.

Визначимо значення оцінювальної функції в $\lfloor (БП + 1) / 2 \rfloor$ такті для найдосконалішого на наш час алгоритму [5], запропонованого співробітниками ВНТУ Петухом А. М., Обідником Д. Т., згідно якого значення оцінювальної функції визначається за формулами:

$$\begin{aligned} O\Phi_0 &= \lfloor БП / 2 \rfloor, \\ O\Phi_{i+1} &= O\Phi_i - МП \quad \text{для } O\Phi_i \geq 0, \\ O\Phi_{i+1} &= O\Phi_i + \Delta \quad \text{для } O\Phi_i < 0, \end{aligned} \tag{1}$$

де $\Delta = \text{БП} - \text{МП}$. При цьому будемо враховувати властивість симетрії крокових переміщень, а також зміст табл. 1.

За умови парних БП та МП за БП/2 інтерполяційних тактів буде сформовано МП/2 одиничних крокових переміщень по непровідній координаті. Значення оцінювальної функції в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ інтерполяційному такті дорівнює:

$$O\Phi \lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor = O\Phi_0 + \Delta \frac{\text{МП}}{2} - \text{БП} \frac{\text{БП} - \text{МП}}{2} = \frac{\text{БП}}{2}.$$

У випадку, коли БП і МП непарні, в $(\text{БП} + 1) / 2$ інтерполяційному такті формується діагональний крок. Таким чином, за $(\text{БП} + 1) / 2$ інтерполяційних тактів буде виконано $\lfloor \text{МП} / 2 \rfloor + 1$ одиничних крокових переміщень по непровідній координаті. Необхідно особливо відзначити, що коли в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ інтерполяційному такті виконується діагональний крок, значення Δ згідно виразу (1) враховується тільки в наступному інтерполяційному такті. Таким чином:

$$O\Phi \lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor = O\Phi_0 + \Delta \left\lfloor \frac{\text{МП}}{2} \right\rfloor - \text{МП} \left(\frac{\text{БП} + 1}{2} - \left\lfloor \frac{\text{МП}}{2} \right\rfloor \right) = -\frac{\text{МП} + 1}{2}.$$

Легко довести, що отримане значення відповідає $\overline{\text{МП} / 2}$.

Аналогічно знаходяться значення оцінювальної функції і для інших випадків, які зведені в таблицю 2.

Таблиця 2

Значення оцінювальної функції в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ інтерполяційному такті

Парність БП	Парність МП	Значення оцінювальної функції в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ інтерполяційному такті
0	0	БП/2
0	1	0
1	0	$\lfloor \Delta / 2 \rfloor$
1	1	$-(\text{МП} + 1) / 2$

Аналіз оцінювальної функції в центрі траєкторії дозволяє вдвічі підвищити оперативність контролю порівняно з раніше запропонованим принципом. При цьому необхідне додаткове введення лише одного комутатора для передачі одного з операндів згідно табл. 2. Слід відзначити, що апіорні значення оцінювальної функції, які формуються в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ інтерполяційному такті, не потрібно розраховувати, оскільки вони вдвічі менші за вихідні операнди для інтерполяції і їх легко одержати монтажною комутацією на один розряд в сторону молодших розрядів (еквівалентно діленню на 2).

За цих умов контроль базується на порівнянні значення оцінювальної функції з апіорно розрахованими в $\lfloor (\text{БП} + 1) / 2 \rfloor$ та в БП інтерполяційних тактах, тобто аналізується спочатку достовірність інтерполювання першої, а потім другої половини відрізка прямої. Достовірність правильності розрахунку значення оцінювальної функції завдяки контролю дорівнює 100 %. Запропонований принцип контролю має апаратну надлишковість лише 20 %, в той час як контроль, що базується на дублюванні, має надлишковість 100 %.

Один із можливих варіантів контролю реалізації функцій лінійного інтерполювання полягає в порівнянні координат кінцевої точки траєкторії з апіорно заданими. В цьому випадку для реалізації контролю необхідно два регістри і дві схеми порівняння, що обумовлює при 12-розрядному адресному координатному просторі майже 50 % надлишковість. Це значно гірше, ніж при реалізації контролю, згідно раніше запропонованого принципу.

Важливим функціональним вузлом лінійних пристроїв інтерполяції є блок вихідних переміщень, який забезпечує формування сигналів керування для координатних лічильників за значеннями ознак (ознаки координатних переміщень, результат їх мажоритарності, ознак оцінювальної функції). Контроль вказаного блоку можна реалізувати на основі структурних властивостей крокових переміщень.

При інтерполюванні відрізків прямих з першого півкванту ($\text{БП} \leq 2\text{МП}$) комбінація її крокових переміщень по непровідній координаті неприпустима, якщо інтерполювання здійснюється з максимальною точністю. Це обумовлюється тим, що в цьому випадку ординатний приріст прямої за два інтерполяційних такти не перевищує одиниці, а комбінація її по непровідній координаті дає приріст 2, тобто порушується умова досягнення максимальної точності. З урахуванням правила подвійності крокових переміщень можна констатувати, що для другого півкванту такою забороненою буде комбінація 00.

Контроль, з урахуванням одержаної властивості, базується на аналізі суміжних крокових переміщень на предмет їх допустимості.

Детерміновані значення крокових переміщень по непровідній координаті, які формуються в центрі

відрізка прямої, дозволяють запропонувати такий підхід до контролю функцій лінійної інтерполяції. Значення крокових переміщень згідно табл. 1 порівнюються в відповідні тактові проміжки часу з фактично сформованими. При негативному результаті порівняння формується сигнал про порушення роботи.

Крім того, неприпустима зміна орієнтації крокових переміщень за цикл інтерполювання, а також одночасне формування зустрічних переміщень.

Оскільки блок вихідних переміщень характеризується незначними апаратними витратами (2–3 мікросхеми малого ступеня інтеграції), то його можна не охоплювати контролем.

Структурну схему лінійного інтерполятора з контролем рівності початкового та кінцевого значень ОФ наведено на рисунку 1.

Пристрій включає регістри RG для зберігання МП, БП, Δ, ОФ₀; нагромаджувальний суматор, який складається з комбінаційного суматора Sm і регістра RG, комутатори MX1, MX2, лічильник СТ2 і схему порівняння Cmp.

У регістр БП і МП зі входньої шини D заносяться відповідно більший (БП) та менший (МП) прирости. Значення БП через мультиплексор MX2 заноситься в RG нагромаджувального суматора (утворений комбінаційним суматором Sm і регістром RG). Через мультиплексор MX1 на вхід нагромаджувального суматора подається значення МП в інверсному коді (оскільки операція віднімання для даного випадку виконується в доповняльному коді, то при її реалізації на вхід переносу нагромаджувального суматора подається рівень логічної одиниці).

Слід зазначити, вихід з регістра RG МП – інверсний, тобто дані зчитуються з інверсних виходів тригерів, які утворюють зазначений регістр. Значення БП-МП з виходу суматора Sm заноситься в регістр Δ. У лічильник СТ2 з виходу регістра БП подається значення більшого прирости, яке під дією сигналу y1 записується в лічильник. У регістр ОФ₀ монтажним шляхом, під дією сигналу y4, заноситься з виходу регістра БП значення $\lfloor БП / 2 \rfloor$. У регістр RG нагромаджувального суматора подається значення $\lfloor БП / 2 \rfloor$, яке отримуємо з виходу регістра ОФ₀, з'єднаному з другим входом мультиплексора MX2.

На цьому закінчується цикл підготовки.

У циклі інтерполяції в кожному такті знаходиться значення оцінювальної функції. Для цього на вхід нагромаджувального суматора з виходу мультиплексора MX1 подається значення Δ або МП.

Знак оцінювальної функції визначає сигнал переносу P_{вих} суматора. З кожним інтерполяційним тактом значення лічильника зменшується на 1. При досягненні лічильником нульового стану процес інтерполяції закінчується.

Після закінчення процесу інтерполяції на виході схеми порівняння отримуємо остаточне значення рівності/нерівності початкового та кінцевого значення оцінювальних функцій. Якщо виконується рівність, то схема лінійного інтерполятора працює вірно і стабільно.

Висновки

Запропоновані принцип контролю дозволяють суттєво зменшити апаратні витрати на виготовлення лінійних інтерполюючих пристроїв з контролем процесу формування векторів.

Література

1. Заботин Ю.Д., Шапошникова А.С. Новейшая энциклопедия персонального компьютера 2005 – М.: РИПОЛ классик, 2005. – 608с.: ил.
2. Петух А. М. Интерполяция в задачах контурного формоутворения. Монография. / А. М. Петух, Д. Т. Обідник, О. Н. Романюк. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 103 с.
3. Елизаров В.И., Харисов М.А., Ларионова Н.И. Безопасность и методы резервирования АСУТП: учебное пособие. – КГТУ, 2003 г. – 84с.
4. Романюк А. Н., Супьяк Я. В. Взаимосвязь погрешности линейного интерполирования со значением оценочной функции. – Вінниця, 1995. Деп. в Укр. НИИТИ, № 679 – УК 95. Дел., – 6 с.
5. Ободник Д. Т. Анализ и разработка цифровых интерполяторов для систем отображения измерительной информации: Дис. канд. техн. наук – Вінниця, 1983. – 183 с.

Надійшла до редакції
3.5.2012 р.