

УДК 004.932:004.451.353

БЫСТРАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ НОРМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ МЕТРИК ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА

К.А. ВОЛКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6 Минск 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 4 октября 2010

Рассмотрено применение p -норм к вектору цвета для снижения вычислительной сложности сегментации цветных изображений. Предложен ряд алгоритмов вычисления метрик цветового пространства на основе норм, имеющих различную вычислительную сложность. Суть алгоритмов состоит в ускорении обработки пикселей за счет использования норменных метрик векторов цвета при осуществлении специфического преобразования цветного изображения в полутоновое. Приведены экспериментальные данные по вычислительным затратам и качеству сегментации для каждого из алгоритмов.

Ключевые слова: сегментация изображений, цветовое пространство, норма вектора цвета.

Введение

В настоящее время актуальной является задача создания виртуальных трехмерных пространств и реконструкции объектов реального мира для использования в области виртуального туризма, телемедицины, военных приложений, образовательных технологий и т.д. Одним из основных этапов создания трехмерного пространства является предварительная сегментация исходных изображений. Существующие методы сегментации цветных изображений используют сравнение цвета соседних пикселей для выделения гомогенных областей или детектирования границ между ними. В зависимости от метода и его реализации, сегментация может осуществляться для собственно цветного изображения или для его полутонового представления [1, 2]. Основным недостатком известных алгоритмов сегментации является высокая вычислительная сложность. Вычислительная сложность сегментации цветных изображений может быть уменьшена за счет использования целочисленной арифметики с исключением вычислительно сложных операций умножения и деления для расчета p -норменных метрик при сравнении цветных пикселей и преобразовании их в полутоновое представление.

Целью работы является разработка быстродействующих алгоритмов вычисления метрик цветового пространства на основе p -норм для сегментации цветных изображений и оценка их эффективности в условиях функционирования в реальном масштабе времени.

Цветовое преобразование изображений с использованием норм

Согласно закону аддитивности Грассмана, любой цвет может быть представлен как точка в трехмерном пространстве базисных цветов [3]. В области компьютерной графики получила распространение модель RGB, которая в качестве базисных цветов использует красный (длина волны $\lambda = 700,0 \text{ нм}$), зеленый ($\lambda = 546,1 \text{ нм}$) и синий ($\lambda = 435,8 \text{ нм}$) цвета. Любой цвет в ней может быть представлен в виде [1]:

$$\vec{C} = \vec{r}C_R + \vec{g}C_G + \vec{b}C_B, \quad (1)$$

где (r, g, b) – ортонормированный базис цветового пространства, C_R, C_G, C_B – цветовые координаты красного, зеленого и синего, соответственно.

Сегментация цветных изображений основана на преобразовании цветового вектора в скалярную величину для сравнения цветов соседних пикселей. Широкое распространение для преобразования получило следующее выражение:

$$C_{GST} = 0,3C_R + 0,59C_G + 0,11C_B, \quad (2)$$

Формула (2) учитывает различную чувствительность человеческого зрения к каждой из цветовых составляющих. Недостатком преобразования является потеря информации о цвете.

Поскольку большинство фотографических изображений в цветовом пространстве имеет близкое к равномерному распределение энергии, при преобразовании цветового пространства для сокращения потери информации о цвете предлагается использовать метрики, задаваемые p -нормой для вектора C (1). Для цветового пространства p -нормы описываются в общем виде следующим уравнением:

$$\|C\|_p = \sqrt[p]{|C_R|^p + |C_G|^p + |C_B|^p} = C_R^p + C_G^p + C_B^p \sqrt[p]{}.$$

Применимость норм для сегментации цветных изображений обусловлена следующими свойствами норм:

1) норма для вектора цвета является числом. Поэтому нормированное изображение может рассматриваться как полутоновое, яркость пикселей которого определяется соответствующей метрикой;

2) размерность машинного представления нормы много меньше размерности машинного представления цвета (это позволяет строить компактные гистограммы цвета);

3) различие между цветами пропорционально различию их норм, что дает возможность производить корректное сравнение цвета пикселей.

С точки зрения вычислительных затрат наиболее эффективны манхэттенская $\|C\|_1$, евклидова $\|C\|_2$ и супремум $\|C\|_\infty$ нормы соответственно:

$$\|C\|_1 = C_R + C_G + C_B, \quad (3)$$

$$\|C\|_2 = \sqrt{C_R^2 + C_G^2 + C_B^2}, \quad (4)$$

$$\|C\|_\infty = \max(C_R, C_G, C_B). \quad (5)$$

В машинном представлении под каждую цветовую координату отводится 8 бит: $C_R \in 0..255$, $C_G \in 0..255$, $C_B \in 0..255$. Соответственно, из формул (3) – (5) имеем следующие области значений для норм: $\|C\|_1 \in [0, 765]$, $\|C\|_2 \in [0, 3^{0.5}765]$, $\|C\|_\infty \in [0, 255]$. При этом $\|C\|_1 \in Z$, $\|C\|_2 \in R$, $\|C\|_\infty \in Z$. Для традиционного преобразования (2) $C_{GST} \in [0, 255]$, $C_{GST} \in R$. Методы сегментации полутоновых изображений оперируют с 256 градациями яркости, т.е. для результата нормирования p -ой нормой должно выполняться условие $C_{GST} \in [0, 255]$.

При сегментации цветных изображений применяются два типа сравнения соседних пикселей: разность норм и норма разности их векторов цвета. Процедура сегментации цветных изображений, в зависимости от выбранного метода [2, 4, 5], может осуществляться с использованием промежуточного преобразования цветного изображения в полутоновое, или непосредственным анализом исходного изображения. Использование промежуточного преобразования соответствует априорному вычислению норм цвета пикселей.

Норменные алгоритмы сегментации

Для сегментации цветных изображений предлагаются норменные алгоритмы вычисления оценки D'_{DN} разности норм и оценки D'_{ND} норм разности, вычисляемых с помощью выражений

$$D'_{DN} = \| \|C_1\| - \|C_2\| \| = \| \| (C_{1,R}, C_{1,G}, C_{1,B}) \| - \| (C_{2,R}, C_{2,G}, C_{2,B}) \| \|, \quad (6)$$

$$D'_{ND} = \| C_1 - C_2 \| = \| (C_{1,R} - C_{2,R}, C_{1,G} - C_{2,G}, C_{1,B} - C_{2,B}) \|, \quad (7)$$

где $C_1 = (C_{1,R}, C_{1,G}, C_{1,B})$ и $C_2 = (C_{2,R}, C_{2,G}, C_{2,B})$ – цвета двух соседних пикселей.

Суть норменных алгоритмов состоит в использовании специфического цветового преобразования исходного цветного изображения в полутоновое с использованием норменных метрик цветовых векторов для ускорения обработки пикселей.

Для уменьшения динамического диапазона оценок соседних пикселей D'_{DN} и D'_{ND} предлагается произвести масштабирование норм с использованием выражений

$$C_{GS1} = \text{round} \left(\frac{C_R + C_G + C_B}{3} \right), \quad (8)$$

$$C_{GS2} = \text{round} \left(\sqrt{\frac{C_R^2 + C_G^2 + C_B^2}{3}} \right), \quad (9)$$

$$C_{GS\infty} = \max(C_R, C_G, C_B), \quad (10)$$

где $\text{round} \cdot$ – функция округления вещественного числа к ближайшему целому; $\max(\cdot, \cdot, \cdot)$ – функция определения максимального из трех аргументов.

Для уменьшения вычислительной сложности сегментации вместо выражения (8) предлагается использовать выражение, основанное на целочисленной арифметике:

$$C_{GS1} = C_R + C_G + C_B \text{ div } 3, \quad (11)$$

где $\cdot \text{div} \cdot$ – оператор целочисленного деления.

В результате применений выражений (8) – (11) к нормам (3) – (5), динамический диапазон метрик сужается до $\{0..255\}$:

$$D_{ND} : D'_{ND} \rightarrow \{0..255\}, \quad (12)$$

$$D_{DN} : D'_{DN} \rightarrow \{0..255\}, \quad (13)$$

где D_{ND} и D_{DN} – масштабированные оценки нормы разности и разность норм; \rightarrow – оператор отображения множеств.

Для вычисления масштабированных оценок D_{ND} (12) и D_{DN} (13) с учетом формул (6), (7), предлагается ряд алгоритмов, описываемых формулами, представленными в табл. 1, имеющих различную вычислительную сложность.

Оценка эффективности норменных алгоритмов сегментации

Для оценки эффективности сегментации с применением разработанных алгоритмов использован тестовый набор из 3000 цветных фотографических изображений размером 1440x900 пикселей. В состав тестового набора включены фотографии техники, людей, животных, природных и антропогенных ландшафтов различного масштаба. Изображения имеют разные уровни яркости и контрастности, а также различаются по детализации и четкости изображений.

В табл. 2 для каждого алгоритма приводится оценочное среднее время расчета разности норм и нормы разности цветов соседних пикселей (4- связность) изображения из тестового набора (при полной загрузке выделенного ядра на CPU Intel Core 2 2ГГц).

Таблица 1. **Формулы сравнения светов соседних пикселей**

Тип	Норма	Формула вычисления
D_{DN}	$\ C\ _1$	$D_{DN1} = \text{round} \left\lfloor \frac{(C_{1,R} + C_{1,G} + C_{1,B}) - (C_{2,R} + C_{2,G} + C_{2,B})}{3} \right\rfloor$
		$D_{DN1\text{int}} = \left\lfloor (C_{1,R} + C_{1,G} + C_{1,B}) - (C_{2,R} + C_{2,G} + C_{2,B}) \right\rfloor \text{div}3$
D_{DN}	$\ C\ _2$	$D_{DN2} = \text{round} \left\lfloor 3^{-0,5} \left(\sqrt{C_{1,R}^2 + C_{1,G}^2 + C_{1,B}^2} - \sqrt{C_{2,R}^2 + C_{2,G}^2 + C_{2,B}^2} \right) \right\rfloor$
D_{DN}	$\ C\ _\infty$	$D_{DN\infty} = \left \max C_{1,R}, C_{1,G}, C_{1,B} - \max C_{2,R}, C_{2,G}, C_{2,B} \right $
D_{DN}	GST	$D_{DNGST} = \text{round} \left(0,3 C_{1,R} - C_{2,R} + 0,59 C_{1,G} - C_{2,G} + 0,11 C_{1,B} - C_{2,B} \right)$
D_{ND}	$\ C\ _1$	$D_{ND1} = \text{round} \left(\frac{ C_{1,R} - C_{2,R} + C_{1,G} - C_{2,G} + C_{1,B} - C_{2,B} }{3} \right)$
		$D_{ND1\text{int}} = C_{1,R} - C_{2,R} + C_{1,G} - C_{2,G} + C_{1,B} - C_{2,B} \text{div}3$
D_{ND}	$\ C\ _2$	$D_{DN2} = \text{round} \left(\sqrt{\frac{(C_{1,R} - C_{2,R})^2 + (C_{1,G} - C_{2,G})^2 + (C_{1,B} - C_{2,B})^2}{3}} \right)$
D_{ND}	$\ C\ _\infty$	$D_{ND\infty} = \max C_{1,R} - C_{2,R} , C_{1,G} - C_{2,G} , C_{1,B} - C_{2,B} $
D_{ND}	GST	$D_{NDGST} = \text{round} \left(0,3 C_{1,R} - C_{2,R} + 0,59 C_{1,G} - C_{2,G} + 0,11 C_{1,B} - C_{2,B} \right)$

Таблица 2. **Среднее время расчета алгоритмов**

Тип	D_{DN}	D_{DN}	D_{DN}	D_{DN}	D_{DN}	D_{ND}	D_{ND}	D_{ND}	D_{ND}	D_{ND}
Норма	$\ C\ _1$	$\ C\ _1$	$\ C\ _2$	$\ C\ _\infty$	GST	$\ C\ _1$	$\ C\ _1$	$\ C\ _2$	$\ C\ _\infty$	GST
Формула	D_{DN1}	$D_{DN1\text{int}}$	D_{DN2}	$D_{DN\infty}$	D_{DNGST}	D_{ND1}	$D_{ND1\text{int}}$	D_{ND2}	$D_{ND\infty}$	D_{NDGST}
Время (мс)	46	40	121	32	78	58	52	87	41	78

Для тестового набора изображений были построены гистограммы разности норм и норм разности соседних пикселей, а также гистограммы для традиционного преобразования (2). Полученные гистограммы имеют одинаковую (экспоненциальную) форму для большинства фотографических изображений. Для отдельного изображения гистограммы D_{DN1} , D_{DN2} , $D_{DN\infty}$, D_{ND1} , D_{ND2} , $D_{ND\infty}$, D_{DNGST} , D_{NDGST} практически совпадают между собой. Следовательно, также практически эквивалентно количество пикселей, детектируемых как внутренние или граничные для однородных областей. Оно не зависит от применяемого типа сравнения и нормы, и совпадает с результатами использования формулы (2).

Предложенные нормы опробованы для нескольких классических методов сегментации (гистограммного, слияния-разделения, водораздела) [1, 2] и метода локальных гистограмм [6]. Каждая из норм показала свою пригодность для использования при сегментации фотографических изображений (рис. 1). Визуальные и автоматические оценки [7, 8, 9] качества сегментации набора изображений не выявили явного преимущества одной или нескольких норм и способа сравнения пикселей.

Исследование показало, что время сегментации для конкретного метода зависит от количества операций вычисления норм (табл. 3–5).

Таблица 3. Относительное время сегментации с использованием промежуточного преобразования цветного изображения в полутоновое

Формула	C_{GST}	C_{GS1}	C_{GS1int}	C_{GS2}	$C_{GS\infty}$
Гистограммный метод	100	98	98	103	97
Метод локальных гистограмм	100	100	99	101	99
Метод слияния-разделения (4- связность)	100	98	97	103	98
Метод слияния-разделения (8- связность)	100	99	99	101	99
Метод водораздела (4- связность)	100	99	98	102	98
Метод водораздела (8- связность)	100	99	99	101	99

Таблица 4. Относительное время сегментации с использованием нормы разности цвета пикселей

Формула	D_{NDGST}	D_{DN1}	D_{DN1int}	D_{DN2}	$D_{DN\infty}$
Гистограммный метод	100	96	96	105	95
Метод локальных гистограмм	100	87	86	116	83
Метод слияния-разделения (4- связность)	100	93	91	110	89
Метод слияния-разделения (8- связность)	100	89	88	114	85
Метод водораздела (4- связность)	100	95	94	106	94
Метод водораздела (8- связность)	100	92	90	111	88

Таблица 5. Относительное время сегментации с использованием разности норм цвета пикселей

Формула	D_{DNGST}	D_{DN1}	D_{DN1int}	D_{DN2}	$D_{DN\infty}$
Гистограммный метод	100	98	97	102	96
Метод локальных гистограмм	100	93	90	101	86
Метод слияния-разделения (4- связность)	100	95	94	102	92
Метод слияния-разделения (8- связность)	100	93	92	100	88
Метод водораздела (4- связность)	100	97	96	100	93
Метод водораздела (8- связность)	100	95	93	101	90

Анализ показывает, что наименее чувствительны к выбору нормы методы, которые используют предварительное преобразование изображения в полутоновое и осуществляют однократный расчет нормы для каждого пикселя. В противоположность им, последовательные методы [1, 2, 4], оперирующие с цветными изображениями, более чувствительны к выбору нормы, т.к. осуществляют вычисление различия между соседними пикселями. Для структурных методов при использовании 8- связности вычислительные затраты на вычисление норм примерно в 2 раза выше чем при использовании 4- связности. При использовании итерационных методов, когда осуществляется вычисление норм на каждой итерации для целого изображения или его значительной части, наблюдается наибольшая чувствительность к выбору нормы.

Из табл. 3 – 5 видно, что для сегментации цветного изображения гистограммным методом с промежуточным преобразованием в полутоновое изображение выигрыш от использования метрики C_{GS2} по сравнению с метрикой $C_{GS\infty}$ составляет 6%. Для сегментации методом слияния-разделения с применением 8- связности выигрыш от использования метрики D_{DN2} по сравнению с метрикой $D_{DN\infty}$ составляет 15%. Для сегментации методом локальных гистограмм выигрыш от использования традиционной метрики D_{NDGST} по сравнению с метрикой $D_{ND\infty}$ составляет 17%.

В случае использовании традиционного преобразования изображения в полутоновое, при снижении контраста и яркости отмечается снижение качества сегментации участков голубого цвета (небо, поверхность воды), а для p -норм качество сегментации снижается равномерно для всего изображения.

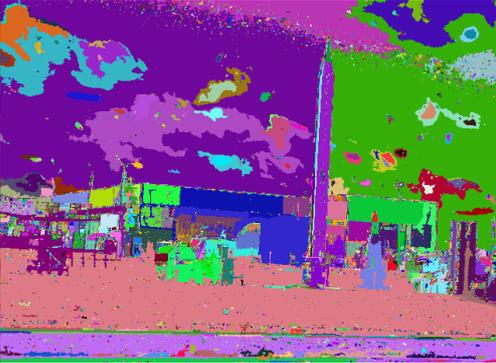
Норма	Полутоновое изображение	Результат сегментации
$\ c\ _1$		
$\ c\ _2$		
$\ c\ _\infty$		
C_{GST}		

Рис. 1. Полутоновые изображения и результаты сегментации гистограммным методом для различных норм цветового пространства

Выводы

Предложены норменные алгоритмы вычисления оценки разности норм и оценки норм разности для эффективной сегментации цветных изображений. Суть алгоритмов состоит в преобразовании цветного изображения в полутоновое, использующем норменные метрики цветовых векторов для ускорения обработки пикселей. Произведена визуальная и автоматическая оценка качества и скорости сегментации с использованием норменных алгоритмов. Показано,

что разработанные норменные алгоритмы обеспечивают выигрыш в скорости сегментации до 17% по сравнению с алгоритмами, основанными на традиционном цветовом преобразовании.

QUICK SEGMENTATION OF COLOR IMAGES BASED ON NORM CALCULATING ALGORITHMS OF COLOR SPACE METRICS

K.A. VOLKOV

Abstract

The application of p -norms for color vector to reduce the computational complexity of color image segmentation was considered. A number of algorithms for calculating of color space metrics, based on the norms with different computational complexity, were offered. The essence of the algorithms is to expedite the processing of pixels by the use of norm metrics of color vectors in the implementation of a specific color conversion of color images to grayscale. Experimental data of the computational cost and quality of segmentation for each of the algorithms was adduced.

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М., 2006.
2. Сойфера В.А. Методы компьютерной обработки изображений. М., 2003.
3. Ивэнс Р.М. Введение в теорию цвета. М., 1964.
4. Treméau A., Borel N. // A region Growing and merging algorithm to color segmentation, Pattern Recognition. 1997. Vol. 30. P. 1191.
5. Ohlander R., Price K., Reddy D.R. // Picture Segmentation Using A Recursive Region Splitting Method, Computer Graphics and Image Processing. 1978. Vol. 8. P. 313.
6. Fakher M.M., Volkov K.A., Tsviatkou V.YU. // Half tone multiple-perspective Segmentation of panoramic images on the basis of progressive threshold processing. Second Information Technology Conference. Under the title of Information Technology: Application & Horizons. University of Technology. Computer Engineering & Information Technology Department. IRAQ. 2010. P. 173.
7. Старовойтов В.В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. Минск, 1997.
8. Borsotti M., Campadelli P., Schettini R. // Quantitative evaluation of color image segmentation results. 1998. Vol. 19. P. 741–48.
9. Zhang Y.J. // A review of recent evaluation methods for image segmentation. Signal Processing and its Applications, Sixth International, Symposium. 2001. Vol. 11. P.148–151.