

М.Г.КУЗЬМИНА¹, Э.А.МАНЬКИН²

¹ Институт прикладной математики РАН, Москва

E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru

² Российский научный центр «Курчатовский Институт»

E-mail: edmany@isssph.kiae.ru

ОСЦИЛЛЯТОРНАЯ СЕТЬ ДЛЯ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ: НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

Аннотация

Предпринято дальнейшее развитие модели осцилляторной сети для динамической обработки яркостных и текстурных изображений.

В целях повышения точности сегментации и упрощения метода управления кластерной синхронизацией сети построены и частично воплощены в кодах следующие модификации модели:

- 1) новая версия управления динамикой сетевого осциллятора;
- 2) новый метод последовательной фрагментации изображения.

Проведена первая серия экспериментов по сегментации яркостных изображений для выяснения предполагаемых достоинств новой осцилляторной динамики.

¹ **M.G.KUZMINA, E.A.MANYKIN²**

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow

E-mail: kuzmina@spp.keldysh.ru

² Russian Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow

E-mail: edmany@isssph.kiae.ru

OSCILLATORY NETWORK FOR IMAGE SEGMENTATION: FURTHER DEVELOPMENT

Abstract

Further development of oscillatory network model for dynamical image segmentation has been fulfilled. The following model modifications have been introduced, aimed at higher segmentation accuracy and more simple method of network clusterized synchronization control:

- 1) new version of single oscillator dynamics control;
- 2) new method of sequential image fragment selection. The initial series of experiments on

brightness image segmentation has been carried out to test the expected advantages of new oscillator dynamics.

Введение. Развиваемый нейроморфный динамический метод сегментации изображений обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными вычислительными методами компьютерного зрения. В основном, это особенности, свойственные функционированию зрительной системы мозга: параллельный и распределенный способ обработки информации, “автоматизм” срабатывания, способность к самонастройке. Кроме того, информативным и удобным является использованный способ визуализации результатов сегментации. Принципиально метод допускает развитие до аналогового метода обработки изображений, работающего в реальном времени, и тем самым, при должной разработке, может представлять интерес для тех проблем биоробототехники, где требуется активная искусственная зрительная система (см., например, [1,2]).

Динамическая сегментация изображений в нашем подходе осуществляется осцилляторной сетью, локализованной на плоскости в узлах двумерной решетки, согласованной с пиксельным массивом изображения (полное число осцилляторов сети совпадает с числом пикселей). Сегментация (разложение изображения на совокупность фрагментов по некоторой заранее заданной шкале яркостей) состоит из двух фаз: 1) преднастройки сети по предъявленному изображению и 2) процесса последовательного выделения всех фрагментов изображения. Фаза преднастройки состоит в настройке параметров внутренней динамики каждого сетевого осциллятора, нелинейно зависящих от двух характеристик соответствующего осциллятору пикселя - средней яркости пикселя и ориентации отвечающего пикселю элементарного направленного сегмента. После преднастройки каждый осциллятор может находиться в одном из двух динамических режимов: либо режиме автоколебаний с амплитудой, зависящей от яркости пикселя (активное состояние), либо в устойчивом равновесии (пассивное состояние). Фаза последовательной сегментации требует M шагов, где M – число фрагментов изображения. Это M процессов релаксации осцилляторной сети в состояние синхронизации при различных конфигурациях сетевых динамических связей, самоорганизованным образом возникающих в сети в соответствии с правилом сетевого связывания. При этом на каждом шаге в сети добавляется новый синхронизованный кластер осцилляторов,

соответствующий некоторому фрагменту сегментируемого изображения. Синхронизованные кластеры, поочередно возникающие в сети, соответствуют фрагментам изображения постепенно убывающей яркости, и в конечном счете вся осцилляторная сеть оказывается синхронизованной и разложенной на совокупность внутренне синхронизованных, но взаимно десинхронизованных кластеров, соответствующую полному набору фрагментов изображения. Такая кластерная синхронизация достигается простым методом управления сетевым связыванием, а именно, постепенным усилением общей силы сетевого взаимодействия, начиная со столь слабой, при которой вся сеть полностью десинхронизована. Таким образом, фаза сегментации требует некоторого “внутреннего” времени, которое в дальнейшем (в случае работы с движущимися изображениями) должно быть согласовано с реальным временем (путем подходящего соотношения между внутрисетевыми временными характеристиками, такими как собственные частоты осцилляторов, и характерными параметрами изменения изображения). В настоящей работе построена новая версия внутренней осцилляторной динамики с усовершенствованным видом настройки (управления) локальными характеристиками изображения. Кроме того, развит новый метод последовательного выделения фрагментов изображения в фазе сегментации.

Новая версия управляемой динамики сетевого осциллятора.

Прежде всего отметим, что настройку внутренней динамики сетевого осциллятора можно рассматривать как управление аттракторами его динамической системы. Сама же фаза последовательной сегментации, состоящая из M шагов перестройки архитектуры связей и последующей релаксации сети в M различных состояний синхронизации, может быть интерпретирована как процесс управления системой аттракторов динамической системы осцилляторной сети. Как в случае настройки динамики изолированного сетевого осциллятора, так и в случае перестройки связей в сети мы имеем дело с прямым управлением аттракторами при помощи деформации функции «потенциальной энергии», сопровождающейся перестройкой ее локальных минимумов. Легче всего это видно на примере динамики одного осциллятора.

Состояние осциллятора определяется парой действительных переменных (u_1, u_2) , и система ОДУ, управляющая динамикой, записывается в форме одного уравнения для комплексной переменной $u = u_1 + i u_2$

$$du / dt = (\rho_0^2 + i\omega - |u - c|^2)(u - c) + g(I), \quad (1)$$

где функция $g(I)$, определяющая зависимость динамики от яркости пикселя, ранее была построена в виде: [3-6]

$$g(I) = 1 - H(I - h_0), \quad H(x) = 1 / (1 + \exp(-2\nu x)). \quad (2)$$

При таком выборе управляющей функции $g(I)$ достигалось следующее изменение динамического поведения осциллятора в зависимости от яркости: а) при $I > h_0$ уравнение (1) имеет предельный цикл, размер которого ρ монотонно возрастает с возрастанием I ($0 \leq \rho \leq \rho_0$) (т.е. осциллятор демонстрирует автоколебания, амплитуда которых тем больше, чем больше яркость пикселя); б) при $I \leq h_0$ происходит бифуркация предельного цикла в устойчивый фокус (т.е. осциллятор демонстрирует быстро затухающие колебания).

Недостаток управления (2) состоит в том, что при качественно удовлетворительном отклике динамики осциллятора на изменение яркости отсутствует возможность регулировать чувствительность зависимости амплитуды колебаний от яркости (при управлении (2) зависимость $\rho(I)$ определяется некоторой фиксированной монотонной функцией, а ρ_0 является предельным значением для радиуса предельного цикла и амплитуды). Таким образом, задача состояла в построении нового управления осцилляторной динамикой, удовлетворяющего следующим требованиям: 1) изменение размера предельного цикла в зависимости от I происходит согласно заданной монотонной функции $\rho(I)$; 2) сохраняется бифуркация предельного цикла в устойчивый фокус при некотором пороговом значении $I = h$.

Для построения требуемого управления прежде всего необходимо выяснить, какие возможности изменения аттракторов системы (1) заключены в управлении простейшего типа, определяемого $g(I) \equiv a$, где a – действительная константа.

При $g \equiv -a$ уравнение (1) удобно записать в виде системы уравнений для переменных $r = |u|$ и $\theta = \arg(u)$ ($u = r \exp(i\theta)$):

$$dr / dt = r(\rho_0^2 - r^2) - a, \quad d\theta / dt = \omega \quad (3)$$

Как видно из (3), уравнения для r и θ независимы, и аттракторы системы (3) полностью определяются точками равновесия уравнения для переменной r , которые вычисляются из уравнения

$$r(\rho_0^2 - r^2) - a = 0. \quad (4)$$

Легко убедиться, что при $a = 0$ множество аттракторов системы (3) исчерпывается неустойчивым фокусом $r = 0$ и устойчивым предельным циклом радиуса $r = \rho_0$. При $0 < a < a^*$, у системы (3) имеются три аттрактора: устойчивый фокус $r = 0$, устойчивый предельный цикл радиуса ρ_1 , $\rho_1 < \rho_0$ и неустойчивый предельный цикл радиуса ρ_2 , $0 < \rho_2 < \rho_1$. При $a = a^*$ оба предельных цикла, слившись, уничтожаются, и у системы остается единственный аттрактор – устойчивый фокус $r = 0$.

Опираясь на эти свойства системы (3), можно построить ДУ для r -компоненты системы (3) в виде

$$dr / dt = r(\rho^2(I) - r^2) + g(I), \quad (5)$$

где

$$g(I) = -\beta[1 - T(I - h)], \quad T(x) = 0.5(th(\alpha x) + |th(\alpha x)|). \quad (6)$$

В уравнении (5) ρ – радиус предельного цикла осциллятора, свободный параметр (и, в частности, теперь он может быть задан в виде любой монотонно возрастающей функции $\rho(I)$). Постоянная β в (6) точно вычисляется ($\beta = \beta(\rho)$), а постоянная σ удовлетворяет условию $\sigma \gg 1$. Теперь мы имеем следующее поведение предельного цикла системы (3):
 а) при изменении I вне малой окрестности h , предельный цикл системы (3) есть окружность произвольно задаваемого радиуса $\rho(I)$;
 б) при $I > h$, $I \approx h$ происходит бифуркация предельного цикла в устойчивый фокус.

Тем самым, желаемое управление построено. Переходя теперь от переменных (r, θ) назад к переменной $u = r \exp(i\theta)$, получаем искомую версию осцилляторной динамики с нужным управлением:

$$du / dt = (\rho^2 + i\omega - |u - \rho(1 + i)|^2)(u - \rho(1 + i)) - g(I)[u - \rho(1 + i)] / |u - \rho(1 + i)| \quad (7)$$

где функция $g(I)$ определена формулой (6).

Параметрическая зависимость аттракторов динамической системы (7) от яркости пикселя приведена на рис. 1.

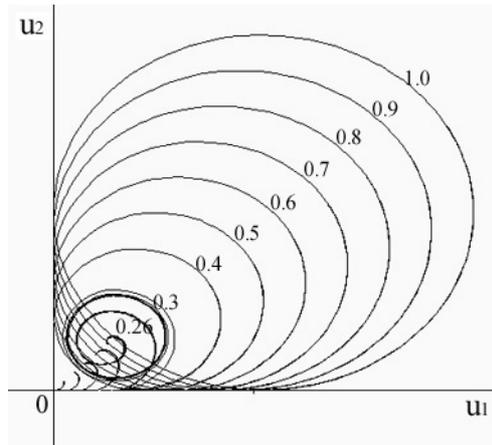


Рис. 1. Аттракторы динамической системы (7) при различных I .
(Порог $h = 0.2$; предельный цикл бифурцирует в фокус при $I \approx 0.26$.)

Другое удобство новой динамики состоит в том, что построенное управление не влияет на собственную частоту осциллятора ω . Поэтому частота ω , являясь свободным параметром, также может быть задана в виде некоторой функции от яркости. Как показывают первые вычислительные эксперименты по сегментации яркостных изображений, возможность задавать зависящие от яркости собственные частоты осцилляторов расширяет возможности метода.

Новый алгоритм последовательной фрагментации. Помимо построения новой версии осцилляторной динамики, позволяющей использовать, в зависимости от задачи, более или менее чувствительную зависимость амплитуды колебаний сетевого осциллятора от яркости, было также построено новое правило сетевого связывания, обладающее двумя полезными свойствами: а) связывание происходит в строгом соответствии со шкалой яркостей, определяющей пиксельное разложение изображения; б) оно рекуррентно перестраивается в процессе последовательной фрагментации.

Формула для правила сетевого связывания модели имеет вид:

$$W_{jj'mm'}(u, u') = P_{jj'mm'}(\rho, \rho') Q_{jj'mm'}(s, s') D_{jj'mm'}(|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|), \quad (8)$$

где сомножитель $P(\rho, \rho')$, нелинейно зависящий от произведения амплитуд ρ и ρ' , обеспечивает достаточно сильную связь осцилляторов с близкими энергиями колебаний, но практически обращается в нуль, если хоть один из осцилляторов взаимодействующей пары находится в состоянии низкой активности (амплитуда колебаний мала) [3-6]. Для повышения точности сегментации нужен более чувствительный к вариациям яркости принцип связывания, который позволял бы точнее диагностировать границы сегментов изображения. Это условие и определяет требования к новому $P(\rho, \rho')$.

Пусть задана шкала яркостей $\{I^{(l)}\}$, $I^{(1)} > I^{(2)} > \dots > I^{(L)}$. Требуется построить сомножитель $P(\rho, \rho')$ в формуле сетевого связывания (8), обеспечивающий следующие свойства сетевого связывания:

- 1) осциллятор с амплитудой колебаний $\rho(I)$, соответствующей яркости $I \in \{I^{(l)}\}$, $I \geq h^*$, где h^* - заданный (текущий) порог, должен быть связан со всеми осцилляторами, у которых амплитуды $\rho(I')$ также определены яркостями I' , превышающими h^* ($I' \in \{I^{(l)}\}$, $I' \geq h^*$);
- 2) этот осциллятор не должен быть связан с теми осцилляторами, у которых амплитуды $\rho''(I'')$ определены подпороговыми яркостями ($I'' \in \{I^{(l)}\}$, $I'' < h^*$).

В настоящее время построен вариант метода последовательной фрагментации яркостных изображений, для которого сомножитель $P(\rho, \rho')$, удовлетворяющий условиям 1), 2), определен рекуррентно.

- На первом шаге полагаем:
- 1) $I = I^{(1)}$, $h^* = I^{(2)}$, $h^{**} = [I^{(2)} / I^{(1)}] I^{(2)}$
 - 2) $P^*(\rho, \rho') = T(\sigma x)$, $x = \rho \rho' - h^{**}$,
 $T(x) = 0.5(thx + |thx|)$, $\sigma \gg 1$.

Как можно убедиться, $P^*(\rho, \rho') \neq 0$ ($P^* \approx 1$) только для тех осцилляторов, для которых $I \in [I^{(2)}, I^{(1)}]$ и $I' \in [I^{(2)}, I^{(1)}]$, т.е. на первом шаге связаны (и будут синхронизованы) только осцилляторы, соответствующие первому, наиболее яркому фрагменту изображения.

Далее, для того, чтобы процедуру можно было рекуррентно повторить (и в конечном счете осуществить последовательную фрагментацию изображения), нужно оперировать с двумя состояниями осцилляторной сети - рабочим и текущим. После сегментации первого кластера он запоминается в текущем состоянии, а в рабочем состоянии производится "погашение" его осцилляторов (заменой ρ в их динамической

системе значением $\rho = 0$). Затем сдвигаемся на один шаг вниз по шкале яркостей и вычисляем $P^*(\rho, \rho')$ на следующем шаге. В сети синхронизируется следующий кластер. Вся процедура повторяется M раз, где M – число уровней яркости в шкале $\{I^{(l)}\}$ (M – число фрагментов изображения).

Некоторые результаты по сегментации яркостных изображений.

Новая версия осцилляторной динамики была протестирована в первой серии экспериментов по сегментации яркостных изображений. Как и ожидалось, она позволяет с гораздо большей точностью сегментировать изображения со слабыми градиентами яркости, чем это было возможно в рамках модели с первоначальной версией динамики. Кроме того, включение зависимости собственных частот от яркости придает динамическому методу сегментации существенно большую гибкость. Варьируя функцию распределения собственных частот осцилляторов $\omega = \omega(I)$, мы имеем возможность изменять соотношение между частотами синхронизированных кластеров, что помогает при сегментации трудно различимых фрагментов изображения.

Заключительные замечания. Еще предстоит реализация в кодах нового рекуррентного метода последовательной фрагментации. Однако, есть надежды, что он, в сочетании с новыми возможностями осцилляторной динамики, приведет к упрощению и уточнению развиваемого динамического метода обработки изображений.

Список литературы

1. T.Kato, D.Floreano, An evolutionary active-vision system. Proc. Of the 2001 Congress on evolutionary comp. Korea; IEEE Press, 2001.
2. D. Floreano, Co-evolution of active vision and feature selection in natural and artificial behavioral systems. Invited talk at IPCAT'2003, Sept. 8-11, Lausanne, Switzerland.
3. М.Г.Кузьмина, Э.А. Манькин, И.И.Сурина, "Осцилляторная сеть с управляемой синхронизацией и динамический метод сегментации изображений". Доклад на 6-ой всероссийской научно-технической конференции "Нейроинформатика 2004", январь 2004, Москва; Сборник научных трудов, часть 1, с. 29-37.
4. М.Г.Кузьмина, Э.А. Манькин, И.И.Сурина, "Осцилляторная сеть с самоорганизованными динамическими связями для сегментации изображений", "Нейрокомпьютеры", № 4, с. 34-55, 2004.
5. M.G.Kuzmina, E.A.Manykin, I.I.Surina, "Oscillatory network with self-organized dynamical connections for synchronization-based image segmentation", BioSystems, v.76, no. 1-3, pp. 43-53, 2004.
6. M.G.Kuzmina, E.A.Manykin, "Biologically motivated oscillatory network model for dynamical image segmentation". Proc. of BICS'2004 (Biologically Inspired Cognitive Systems) August 29 - Sept. 1, 2004, Stirling, Scotland, UK.