

## بهینه‌سازی وزن‌های پیوندی در یک شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی چهار سلولی به‌منظور تولید گام‌های حرکتی دوپایی

سحر فرشباغ رشیدی<sup>1</sup>، سید محمد رضا سید نورانی<sup>2\*</sup>، مریم شعاران<sup>2</sup>

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- استادیار، مهندسی مکاترونیک، دانشگاه تبریز، تبریز

\*تبریز، کدپستی 5166614761، smrs.noorani@tabrizu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 مهر 1395

پذیرش: 03 آبان 1395

ارائه در سایت: 13 آذر 1395

کلید واژگان:

مولد الگوی مرکزی

مدل شبکه‌ی چهار سلولی

سیگنال ریتمیک

نوسان‌گر مورس - لکار

پیوند انتشاری

### چکیده

تنظیم الگوی حرکتی ربات مطابق با شرایط مسیر یکی از زمینه‌های مورد توجه در رباتیک می‌باشد، زیرا موجب افزایش توانایی ربات در عبور از محیط‌های ناشناخته می‌شود. برای این منظور می‌توان از سازگار تولید الگوهای حرکتی در انسان و حیوانات، موسوم به «مولد الگوی مرکزی» الهام گرفت. این الگوهای حرکتی را گام و تعویض بین الگوهای حرکتی را گذر گام می‌گویند. تا کنون مدل‌های مختلفی برای مدلسازی عملکرد مولدهای الگوی مرکزی ارائه شده و از آنها برای تولید مسیر در ربات‌های سیار مختلفی نیز استفاده شده است. در مقاله‌ی حاضر، یک شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی موسوم به «مدل چهار سلولی» مطالعه می‌شود که برای تولید سیگنال‌های ریتمیک مفصل قوزک پا در سازگار حرکتی دوپایی طراحی شده است. این مدل از چهار سلول یکسان جفت‌شده تشکیل می‌شود که دینامیک داخلی آن‌ها از معادلات غیرخطی مورس-لکار تبعیت می‌کند و پیوند بین سلول‌ها از نوع انتشاری است. تولید گام‌های مختلف به تنظیم اختلاف فازهای مناسب بین سیگنال‌های ریتمیک تولید شده‌ی سلول‌ها ربط دارد، که به نوبه‌ی خود با تنظیم وزن‌های پیوندی میان سلول‌ها حاصل می‌شود. در این مقاله، از الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب برای یافتن وزن‌های پیوندی بهینه جهت دستیابی به اختلاف فازهای مطلوب برای گام‌های اولیه‌ی راه‌رفتن، دویدن، جهش دوپا و پریدن دوپا استفاده می‌شود. همچنین، برخی گام‌های ثانویه، به‌ویژه گام راه رفتن آرام، با دوشاخگی حاصل از شکست تقارن در شبکه‌ی مولد گام‌های اولیه به‌دست می‌آید. در مرجع [28] امکان تولید گام راه رفتن آرام توسط شبکه چهار سلولی پیش‌بینی شده است، ولی موفق به تولید آن نشده بودند.

## Optimization of coupling weights in a 4-cell central pattern generator network for bipedal locomotion gait generation

Sahar Farshbaf Rashidi<sup>1</sup>, Mohammad-reza Sayyed Noorani<sup>2\*</sup>, Maryam Shoaran<sup>2</sup>

1- Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Department of Mechatronics Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\*P.O.B. 5166614761 Tabriz, Iran, smrs.noorani@tabrizu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 06 October 2016

Accepted 24 October 2016

Available Online 03 December 2016

Keywords:

Central Pattern Generator (CPG)

4-cell network model

Morris-Lecar oscillator

diffusive coupling

### ABSTRACT

Locomotion regulation of a robot according to path conditions is one of the main interests in the robotics, because it enables the robot to move in unknown environments. This can be realized using inspiration from the human and animals' bio-mechanism in generating various motion patterns called central pattern generator (CPG). These motion patterns are called "gaits" and changing between the motion patterns is called "gait transition". Many models have been proposed to model CPGs and are used for trajectory generating of various mobile robots. In this paper, a type of CPG network called 4-cell CPG model is studied to generate the rhythmic signals of the ankle joints in a bipedal locomotion gaits. This model is composed of four coupled identical cells whose internal dynamics is described by the Morris-Lecar nonlinear differential equations and the couplings between the cells follow the diffusive type. The generation of various locomotion gaits depends on the adjustment of the phase differences between rhythmic signals produced by the cells. The phase differences, in turn, are obtained via properly adjusting the coupling weights between the cells. Here, we exploit a non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to find the best set of coupling weights for maximally approaching the desired phase differences of the primary bipedal gaits of walk, run, two-legged jump, and two-legged hop. Also, some secondary bipedal gaits, especially one that is called "hesitation walk", are obtained by symmetry breaking bifurcations of the primary gaits. The "hesitation walk" has already been predicted in [28], however the authors could not generate it.

### 1- مقدمه

Please cite this article using:

S. Farshbaf Rashidi, M.-R. Sayyed Noorani, M. Shoaran, Optimization of coupling weights in a 4-cell central pattern generator network for bipedal locomotion gait generation, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 144-152, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به طور مشخص، هر واحد مولد شامل دو گروه از نورون‌های جفت‌شده است که پیوندهای مهار دارند. سیگنال‌های ریتمیک تولید شده، توسط اعصاب به یک جفت ماهیچه فرستاده می‌شوند که با عملکرد مهار متقابل خود موجب باز و بسته شدن مفصل و دوران استخوان حول آن می‌شود.

واژه مولد الگوی مرکزی برای اولین بار توسط ویلسون، زمانی که در حال مطالعه بر روی الگوی حرکتی پرواز ملخ بود مطرح شد [3]. او نشان داد که بازخورهای حسی مرتبط با حرکت، برای ایجاد الگوهای حرکتی عادی ضروری نیستند، این یافته گواه بر وجود یک مولد الگوی مرکزی برای تولید حرکت‌های پروازی در ملخ بود [4]. پس از آن، مشاهده‌های مشابهی توسط سایر پژوهش‌گران انجام گرفت. گرینر نشان داد که سلول‌های عصبی واحد مولد الگوی مرکزی در نخاع مهره‌داران قرار دارد. در واقع، او نشان داد که گربه در حالی که ارتباط بین مغز و نخاع آن قطع شده بود، می‌تواند بر روی تسمه نقاله حرکت کند. پس از این کار، گرینر و کوهن با مطالعه سیستم حرکتی مارماهی دریافتند که تحریک الکتریکی ناحیه‌ای از ساقه‌ی مغز به نام ناحیه‌ی مژنیسفالیک حرکتی<sup>10</sup> می‌تواند موجب آغاز فعالیت مولد الگوی مرکزی در تولید حرکت و یا تغییر سرعت آن شود [1,5].

نظریه‌ی تولید مرکزی سیگنال‌های عصبی حرکتی توجه پژوهش‌گران را به ارائه‌ی مدل‌های ریاضی برای توصیف آن معطوف کرد. از مدل‌های مهم می‌توان به هاچکین-هاکسلی<sup>11</sup>، فیتزهاگ-ناگومو<sup>12</sup>، موریس-لکار<sup>13</sup> و ماتسوکا<sup>14</sup> اشاره کرد. لازم به ذکر است که این مدل‌ها، مدل‌های عصب‌پایه هستند و به مدل‌سازی فعالیت نرون عصبی برای تولید سیگنال‌های ریتمیک می‌پردازند. با این حال در کاربردهای مهندسی، مولد الگوی مرکزی به‌عنوان تولیدکننده‌ی مسیرهای مفصلی مرجع در نظر گرفته می‌شود که وظیفه‌ی آن تولید سیگنال‌های نوسانی به‌عنوان مرجع جابجایی‌های تناوبی مفاصل ربات در اجرای حرکت می‌باشد، و الزامی به استفاده از مدل‌های عصب‌پایه نیست. لازم به ذکر است که توسعه‌ی مدل‌های مولد الگوی مرکزی دست کم به دو دلیل دارای اهمیت است؛ اول آنکه با شبیه‌سازی رفتار سیستم توسط مدل‌ها به یافته‌های بیشتری در دانش زیست‌شناسی خواهیم رسید، و دوم، به‌کارگیری این مدل‌ها در کاربردهای مهندسی مانند مسیریابی در ربات‌ها، به‌ویژه ربات‌های پادار [6]، یک روش کارا است. در کاربردهای توانبخشی نیز از مدل مولدهای الگوی مرکزی برای هم‌گام‌سازی حرکت بین فرد ناتوان و ربات پوششی کمک‌حرکتی استفاده شده است [7-8].

## 1-2- استفاده از مدل‌های مولد الگوی مرکزی برای تولید گام در ربات‌ها

از منظر مهندسی رباتیک، مولد الگوی مرکزی شبکه‌ای از نوسان‌گرهای به هم جفت‌شده است که هر نوسان‌گر مولد یک مسیر مرجع برای یک مفصل از زنجیره‌ی حرکتی ربات می‌باشد. سیگنال‌های خروجی از همه‌ی نوسان‌گرها بسامد یکسانی دارند، ولی هر کدام از آن‌ها می‌تواند با دیگری اختلاف فاز داشته باشد. در واقع، ترتیبی از اختلاف فازها می‌تواند الگوی حرکتی خاصی را تولید کند. بنابراین، تولید یک گام مطلوب، مثلاً راه رفتن، با تنظیم درست اختلاف فازها بین حرکت‌های تناوبی مفاصل سیستم حرکتی حاصل می‌شود. تنظیم این اختلاف فازها در حرکت مفاصل که وابسته به الگوی ریتمیک

در دهه‌های اخیر، بررسی الگوهای حرکتی موجودات با هدف پیاده‌سازی آنها روی سازکار حرکتی ربات‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران بوده است. انسان و بسیاری از حیوانات توانایی تولید الگوهای حرکتی گوناگون را دارند که هر الگوی حرکتی را گام<sup>1</sup> می‌گویند. همچنین آن‌ها توانایی تعویض الگو از گامی به گام دیگر را دارند که به آن گذر گام<sup>2</sup> می‌گویند. در حقیقت جانوران با امکان تولید گام‌های گوناگون در شرایط مختلف، برای مثال راه رفتن در شرایط طبیعی، دويدن در هنگام عجله و یا پریدن از روی موانع، توانایی تطبیق با محیط‌های گوناگون را پیدا می‌کنند. بر این اساس، گرایش به طراحی روش‌های کنترلی جدید جهت تولید الگوهای حرکتی ربات‌های پادار و همچنین گذر بین گام‌ها در صورت لزوم، با الهام از آنچه که در جانوران روی می‌دهد، افزایش یافته است. یکی از راه‌کارهای ایجاد الگوهای حرکتی و گذر بین آن‌ها در ربات‌های پادار، پیاده‌سازی مدلی الهام گرفته شده از شبکه‌های عصبی زیست‌شناختی به نام مولدهای الگوی مرکزی می‌باشد.

## 1-1- پیشینه‌ی عصب‌شناختی و توسعه‌ی مدل‌های مولد الگوی مرکزی

در مهره‌داران، سلول‌های موسوم به مولد الگوی مرکزی در نخاع قرار دارند و وظیفه‌ی تبدیل سیگنال‌های دریافتی از مراکز کنترل سطح بالا مانند مغز، برای فعال‌سازی سیگنال‌های ارسالی به ماهیچه‌ها برای ایجاد گام‌های حرکتی مناسب را بر عهده دارند. سیگنال‌های ارسالی از مغز برای فعال کردن شبکه می‌باشند و خود نوسانی نیستند. در واقع، وظیفه‌ی تولید سیگنال‌های ریتمیک عصبی<sup>3</sup> بر عهده‌ی واحد مولد الگوی مرکزی است که موجب تحریک نوسانی ماهیچه‌ها، و دوران استخوان‌ها حول مفاصل و تحقق یک گام حرکتی می‌شود. همچنین، برای تولید این سیگنال‌های ریتمیک، نیازی به بازخورهای حسی و حرکتی از دستگاه استخوانی-ماهیچه‌ای نیست. این بدین معنی است که این سیگنال‌ها به‌صورت مرکزی در واحد تولیدکننده‌ی الگو ایجاد می‌شوند. با این وجود، اطلاعات بازخوری از محیط می‌تواند خروجی‌های مولد الگوی مرکزی را با شرایط محیطی منطبق کند و موجب پایداری بیشتر گام شود [1].

نظریه تولید سیگنال‌های ریتمیک حرکتی به‌وسیله‌ی واحدی که در مغز جای نگرفته است، اولین بار توسط بارون در 1911 با انجام آزمایشی روی گربه‌ای که مخچه‌ی آن خارج شده بود و روی تسمه نقاله به حرکت واداشته شده بود، مطرح شد [1,2]. در این مطالعه، گربه با اینکه فاقد مخچه بود توانایی راه رفتن روی تسمه نقاله را داشت. همچنین، گذر به گام‌های یورتمه<sup>4</sup> و تاخت<sup>5</sup> با افزایش آرام سرعت تسمه مشاهده شد. این مشاهده‌ها نشان داد که واحد تولید سیگنال‌های حرکتی در سطح بالایی دستگاه عصبی مانند مخ و مخچه قرار ندارد و باید به احتمال در مرکز عصبی نخاعی قرار گرفته باشد. بارون مدلی برای بیان چگونگی تولید سیگنال‌های عصبی محرک ماهیچه‌ها نیز ارائه داد، که با نام مدل نیمه مرکز<sup>6</sup> شناخته شد. این مدل بر اساس قانون مهار متقابل<sup>7</sup> ارائه شده بود. در مدل بارون، واحد تولیدکننده‌ی الگو سیگنال‌های فرمانی به ماهیچه‌های خم‌کننده<sup>8</sup> و بازکننده<sup>9</sup> را تولید می‌کند.

1 gait  
2 gait transition  
3 nervous rhythmic signals  
4 trot  
5 gallop  
6 half-center  
7 reciprocal inhibition  
8 flexor  
9 extensor

<sup>10</sup> Mesencephalic Locomotor Region (MLR)

<sup>11</sup> Hodgkin-Huxley

<sup>12</sup> FitzHugh-Nagumo

<sup>13</sup> Morris-Lecar

<sup>14</sup> Matsuoka

[23]. همچنین لیوریا و همکاران از الگوریتم تکاملی برای جستجوی مجموعه پارامترهای بهینه مدل مولد الگوی مرکزی برای تولید گام راه‌روی پایدار در ربات انسان نما استفاده کردند [24].

وقتی که تولید بیش از یک گام از شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی مورد انتظار باشد، تنظیم پارامترهای آن دشوارتر می‌شود. مثلاً انسان می‌تواند گام‌های گوناگونی از قبیل راه رفتن، دویدن، پرش کردن و دیگر گام‌ها را تولید کند. توجه به برخی ویژگی‌ها در اجرای گام‌های حرکتی مانند تقارن در حرکت اندام‌ها و فعالیت ماهیچه‌ها، می‌تواند به طراحی شبکه‌ای با تعداد پارامترهای کمتر کمک کند.

#### 4-1- تولید گام‌های دویایی با روش مدل مولد الگوی مرکزی چهار سلولی

در سال‌های اخیر، پینتو و گلابیتسکی یک مدل چهار سلولی برای شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی ارائه دادند و توسط آن سیگنال‌های ریتمیک مرتبط با گام‌های دویایی را بررسی کردند [25]. آنها یازده الگوی حرکتی ممکن از مدل مولد الگوی مرکزی چهار سلولی را پیش‌بینی و آنها را به دو گروه اولیه و ثانویه تقسیم کردند. این تقسیم‌بندی بر اساس شکل موج سیگنال‌های تولیدی توسط سلول‌ها بود. هر سلول سیگنال تحریک یکی از ماهیچه‌های خم‌کننده و بازکننده مفصل قوزک پا را برای پای چپ و راست تولید می‌کرد. در این مدل چهار سلولی که توسط پینتو و همکاران پیشنهاد شده بود، توجه به تقارن در حرکت اندام‌ها اساس تنظیم پارامترهایی بود که وزن پیوند بین سلول‌ها را تعیین می‌کردند. برای مثال در راه رفتن و دویدن، پاهای راست و چپ نیم دور خارج از فاز هستند، در صورتی که در جهش دویا و پرش دویا، پاهای راست و چپ هم فاز هستند. از سوی دیگر، اگر فعالیت ماهیچه‌های خم‌کننده و بازکننده قوزک پا را بررسی کنیم درمی‌یابیم که در میان آنها نیز الگوهای فاز متقارنی وجود دارد. برای مثال، در دویدن هر دو ماهیچه‌ی خم‌کننده و بازکننده قوزک هم فازند، در حالی که در راه رفتن آنها نیم دور خارج از فاز هستند. پژوهش‌گرانی چون کالینز، بونو، اسوارت، گلابیتسکی و پینتو بر تقارن حرکت اندام‌ها در اجرای گام‌های حرکتی تمرکز کردند و به اعمال آن در طراحی شبکه‌های مولد الگوی مرکزی، مانند مدل چهار سلولی، پرداختند. [25-28]

پینتو و گلابیتسکی با مدل چهار سلولی توانستند سیگنال‌های ریتمیک مربوط به چهار گام اولیه، راه رفتن<sup>4</sup>، دویدن<sup>5</sup>، جهش دویا<sup>6</sup> و پرش دویا<sup>7</sup>، و نیز چهار گام از شش گام ثانویه، جست زدن<sup>8</sup>، تاخت رفتن<sup>9</sup>، پرش نامتقارن<sup>10</sup> و پرش تک‌پا<sup>11</sup> را تولید کنند. آنها بعد از این کار یک گام ثانویه دیگر را پیش‌بینی کردند و آن را راه رفتن آرام<sup>12</sup> نامیدند. پس از آن، پینتو و همکاران گذر از گام‌های اولیه به ثانویه را در مورد مولد الگوی مرکزی چهار سلولی بررسی کردند [27]. در واقع، گذر بین گام‌ها نتیجه‌ی دوشاخه‌گی‌هایی بود که از شکستن تقارن بین پیوندهای میان نوسان‌گرها به‌دست می‌آمد. همچنین مشخص شد که گذر بین گام‌ها مستقل از مدل می‌باشد، یعنی به نوع مدل دینامیک داخلی نوسان‌گرها یا نوع پیوند میان آنها بستگی ندارد. در این راستا، پینتو و همکاران گذر بین گام‌ها را بر روی دو مدل نوسان‌گر یعنی

سیگنال‌های عصبی محرک ماهیچه است، خود با تنظیم وزن‌های پیوندی میان نوسان‌گرهای مولد آن سیگنال‌های عصبی به‌دست می‌آید. البته در مدل‌های ارائه شده برای شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی یافتن وزن‌های مناسب برای تولید سیگنال‌های ریتمیک متناظر با یک گام مطلوب کار دشواری است. با این حال برخی از پژوهش‌گران موفق شدند با طراحی معماری‌های مختلف برای شبکه‌های مولد الگوی مرکزی، که متشکل از تعدادی نوسان‌گرهای جفت‌شده بودند، گام‌های حرکتی متنوعی در ربات‌های جانورنما تولید کنند. از آن جمله می‌توان به ربات‌های پادار مانند دویا [9-10] و چهار پا [11-13]، و یا ربات‌های بی‌پا مانند ربات ماهی [14] و ربات مار [15-16] اشاره کرد. برای نمونه به برخی از پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر که موضوع تولید گام‌های حرکتی در ربات‌های پادار توسط شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی را مورد توجه قرار داده‌اند، اشاره می‌شود.

وو و همکاران، یک مدل مولد الگوی مرکزی متشکل از نوسان‌گرهای غیرخطی هاف با بسامد ذاتی تطبیقی را برای تولید گام‌های حرکتی چهارپایی در یک ربات چهارپا ارائه دادند. آنها توسط این مدل گذر هموار از گام قدم به گام یورتمه را اجرا کردند. آنها ادعا کردند که در این روش پیشنهاد شده اختلاف فاز بین نوسان‌گرها به طور دلخواه تنظیم می‌شود [17].

لیو و همکاران، با استفاده از مدل مولد الگوی مرکزی یک کنترل تطبیقی را با هدف حرکت ربات چهارپای آی‌بو<sup>1</sup> و ربات دویای ناؤ<sup>2</sup> روی سطوح تخت و شیب‌دار پیاده‌سازی کردند [18-19]. در روش آنها تولید مسیر برای نقاطی از ربات که در فضای کاری تعریف می‌شدند، به‌طور روی خط، انجام می‌گرفت. این کار سبب کاهش تعداد نوسان‌گرها نسبت به تعداد مفاصل می‌شد که به موجب آن پارامترهای تنظیمی نوسان‌گرها نیز کاهش می‌یافت.

کریستیانو و همکاران، شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی دو لایه‌ای را برای کنترل حرکت ربات ناؤ ارائه دادند. شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی ارائه شده بر اساس معماری پایه و پیرو بود. بدنه‌ی اصلی به چند زنجیره که نماینده‌ی دست‌ها و پاها بودند متصل بود. در سر هر زنجیره یک نوسان‌گر ماتسوکا قرار می‌گرفت، و نوسان‌گرهایی که به ازای هر مفصل زیر یک زنجیره در نظر گرفته شده بودند، تنها در پیوند بین خود و نوسان‌گر سر زنجیره بودند. تمامی نوسان‌گرهای سرزنجیره‌ای نیز خود به یک نوسان‌گر مرکزی متصل می‌شدند. این معماری در مدل شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی سبب کاهش تعداد پیوندها می‌شد. علاوه بر این، از الگوریتم ژنتیک برای جستجوی پارامترهای بهینه در شبکه‌ی طراحی شده استفاده شد [20]. همچنین، کریستیانو و همکاران، از یک مدل مولد الگوی مرکزی با نوسان‌گرهای ماتسوکا برای راه‌رفتن تطبیقی ربات ناؤ روی سطح شیب‌دار استفاده کردند. در این پژوهش هر نوسان‌گر موقعیت زاویه‌ای یک مفصل از ربات را طرح‌ریزی می‌کرد [21].

#### 3-1- روش‌های بهینه برای ایجاد شبکه‌های مولد الگوی مرکزی

همانگونه که لیو و چن در [22] اشاره کرده‌اند، تنظیم پارامترهای شبکه مولد الگوی مرکزی برای تولید گام‌های حرکتی مطلوب کار دشواری است. علاوه بر مراجع فوق، بسیاری از پژوهش‌گران برای حل این مسئله، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جستجو محور استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه، کیم و همکاران از الگوریتم توده ذرات<sup>3</sup> برای تولید گام راه‌رفتن در ربات دویا استفاده کردند

<sup>4</sup> walk

<sup>5</sup> run

<sup>6</sup> two-legged jump

<sup>7</sup> two-legged hop

<sup>8</sup> skip

<sup>9</sup> gallop

<sup>10</sup> asymmetric hop

<sup>11</sup> one-legged hop

<sup>12</sup> hesitation walk

<sup>1</sup> AIBO

<sup>2</sup> NAO

<sup>3</sup> Particle swarm optimization

مقدار وزنی هر کدام متمایز از دیگری است. اگرچه برابری مقادیر وزنی اتصال‌های دهنده و گیرنده در یک پیوند دو طرفه برای تولید گام‌های اولیه الزامی است، ولی این برابری در تولید گام‌های ثانویه الزامی نیست. از این رو نماد  $w_{ij}$  برای هر یک از وزن‌های دوطرفه‌ی یک پیوند به‌کار می‌رود که در آن  $i$  و  $j$  به ترتیب شماره‌ی سلول‌های دهنده و گیرنده هستند.

اگر شبکه‌ی چهار سلولی شامل هر سه نوع تقارن افقی، عمودی و قطری بین پیوندهای دوطرفه‌ی خود باشد، می‌تواند هر چهار گام اولیه‌ی راه رفتن، دویدن، جهش دوپا و پرش دوپا را تولید کند. گام راه رفتن تقارن قطری، گام دویدن تقارن افقی، گام جهش دوپا تقارن عمودی و گام پرش دوپا تقارن در همه جهات را نیاز دارد.

در این مدل، سلول‌های قرار گرفته در هر یک از ستون‌های چپ و راست در واقع متناظر با ماهیچه‌های خم‌کننده و بازکننده در قوزک هر پا هستند که با عمل مهار متقابل موجب دوران مفصل می‌شوند. در واقع این ساختار با الهام از دستگاه استخوانی-ماهیچه‌ای بدن طراحی شده است، که در آنجا حرکات تناوبی هر مفصل توسط دو گروه از ماهیچه‌ها، یعنی خم و بازکننده، صورت می‌گیرد. با توجه به این موضوع می‌توان نوع تقارن و میزان اختلاف‌افاز انتظاری بین سیگنال‌های تولید شده توسط سلول‌ها را تعیین کرد.

چنان‌که در شکل 2 نشان داده شده است، در راه رفتن و دویدن هر دو پای چپ و راست نیم دور خارج از فاز هستند. در مقابل، در گام‌های جهش و پرش دوپا حرکت پاهای چپ و راست هم‌فاز است، و بنابراین هر دو پا هم‌زمان و یک‌شکل حرکت می‌کنند، طوری‌که محل قرار گرفتن هر دو پا در شروع و پایان حرکت در یک خط می‌باشد. به‌علاوه، در گام جهش دوپا مدت زمان برخورد پا با زمین طولانی‌تر از گام پرش دوپا است. همچنین، در راه رفتن و جهش دوپا فعالیت ماهیچه‌های خم‌کننده و بازکننده‌ی هر پا به اندازه‌ی نیم دور خارج از فاز است، زیرا در این گام‌ها به هنگام حرکت به چرخش مفصل قوزک نیاز است. در مقابل، در دویدن و پرش دوپا نیاز است در هر پا ماهیچه‌های خم و بازکننده هم فاز باشند، زیرا به هنگام انجام حرکت نیاز به قفل (بی دوران) بودن مفصل قوزک می‌باشد [28].

برای تولید گام‌های ثانویه برخی از ارتباط‌های تقارنی بین پیوندهای سلولی در مدل شبکه‌ی چهار سلولی شکسته می‌شود و به این ترتیب شکل موج سیگنال‌های تولیدی الزاماً بین همه‌ی سلول‌ها یکسان نخواهد بود. به عنوان نمونه، گام تاخت رفتن با شکستن تقارن افقی از گام راه رفتن ایجاد می‌شود. در گام جدید ماهیچه‌های پای چپ سیگنال‌هایی با شکل موج متفاوت از آنهایی که به ماهیچه‌های پای راست فرستاده می‌شوند دریافت می‌کند.

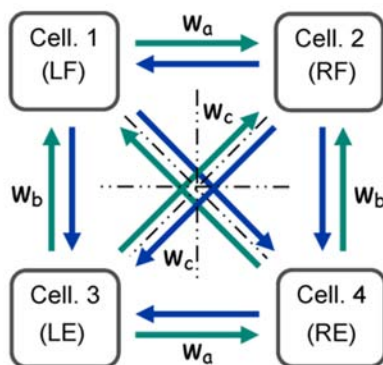


Fig. 1 The 4-cell model of CPG network for bipedal gait generation  
شکل 1 مدل چهار سلولی شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی برای تولید گام دوطایی

موریس- لکار و ویلسون-کوان و با دو نوع پیوند سیناپسی<sup>1</sup> و انتشاری<sup>2</sup> میان نوسان‌گرها بررسی کردند [28].

### 1-5- نوآوری پژوهش حاضر

در این مقاله روش پینتو و همکاران [28] در تولید و گذر بین گام‌های دوطایی با استفاده از مدل مولد الگوی مرکزی چهار سلولی ادامه داده می‌شود. به‌ویژه، از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به جای روش تنظیم دستی برای جستجوی مجموعه‌ای بهینه از وزن‌های پیوند برای تولید گام‌های اولیه استفاده می‌شود. با این ابزار می‌توان به صورت بهینه اختلاف فاز میان سیگنال‌های ریتمیک تولید شده توسط مدل مولد الگوی مرکزی چهار سلولی را برای گام‌های اولیه به‌دست آورد. همچنین برخی گام‌های ثانویه با دوشاخگی حاصل از شکستن تقارن شبکه به‌دست می‌آیند. در این مقاله توانسته‌ایم سیگنال‌های ریتمیک مربوط به گام ثانویه‌ی راه رفتن آرام را با گذر از گام اولیه‌ی جهش دوپا تولید کنیم. این گام توسط پینتو و همکاران به عنوان حلی از مدل چهار سلولی پیش‌بینی شده بود، ولی آن‌ها اعلام کردند که قادر به یافتن پارامتر گذر و تولید سیگنال‌های ریتمیک آن نشده‌اند [28].

### 2- مدل شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی چهار سلولی

مدل شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی چهار سلولی برای تولید گام‌های دوطایی، اولین بار توسط گلابیتسکی و همکاران [26] معرفی شد و در سال‌های بعد مطالعات بیشتری توسط پینتو و گلابیتسکی روی این مدل صورت گرفت [25]. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است این مدل از چهار سلول خم‌کننده چپ<sup>3</sup>، خم‌کننده راست<sup>4</sup>، بازکننده چپ<sup>5</sup> و بازکننده راست<sup>6</sup> تشکیل شده است، که در آن هر سلول با سلول‌های مجاور خود با سه پیوند دو طرفه، در جهات افقی (بین جفت‌های 1-2 و 3-4)، عمودی (بین جفت‌های 1-3 و 2-4) و قطری (بین جفت‌های 1-4 و 2-3) به هم متصل می‌شود. همچنین، قدرت هر پیوند توسط مقدار وزن‌ها تنظیم می‌شود.

سیگنال‌های ریتمیک برای ارسال به ماهیچه‌های خم‌کننده و بازکننده مفصل قوزک پای چپ و راست، در واقع خروجی نوسان‌گرها خواهد بود. وزن‌های پیوندی بین نوسان‌گرها توسط سه مقدار  $w_a$ ،  $w_b$  و  $w_c$  نشان داده شده است. این مدل مولد الگوی مرکزی می‌تواند چهار گام اولیه را تولید کند. برای هر گام حداقل یک نوع تقارن در مقداردهی وزن پیوندها رعایت می‌شود. این تقارن در پیوندها سبب یکسانی متناظر در شکل سیگنال‌های ریتمیک تولید شده توسط نوسان‌گرها می‌شود، که این امر با تقارن حرکت در مفاصل حین اجرای یک گام قابل توضیح است. بنابراین اگر همه‌ی نوسان‌گرها سیگنال‌هایی را با شکل موج یکسان تولید کنند، چه هم‌فاز و چه خارج فاز، آنگاه گام تولید شده توسط آن‌ها را گام اولیه می‌نامیم. در غیر این صورت آن را گام ثانویه می‌گوییم.

اگر یک ساختار متقارن برای شبکه مورد نظر باشد، برابری مقدار وزن‌های دو طرفه‌ی یک پیوند الزامی است. به عبارت دیگر، مدل دارای ساختار متقارن است اگر دو جفت از سلول‌ها با پیوندهای یکسان به هم متصل شده باشند. در شکل 1 پیکان‌های نماینده‌ی پیوندهای دوطرفه با دو رنگ متمایز ترسیم شده است تا نشان‌دهنده‌ی آن باشد که در حالت کلی

<sup>1</sup> synaptic  
<sup>2</sup> diffusive  
<sup>3</sup> Left Flexor(LF)  
<sup>4</sup> Right Flexor(RF)  
<sup>5</sup> Left Extensor(LE)  
<sup>6</sup> Right Extensor(RE)

### 3- دینامیک غیرخطی نوسان گر مورس - لکار

دینامیک‌های مختلفی برای مدل‌سازی رفتار نوسانی مولدهای الگوی مرکزی ارائه شده است [2]. دینامیک غیرخطی نوسان گر مورس - لکار یکی از آن‌ها است که به دلیل ساده و نزدیک بودن آن به مدل بیولوژیکی، در این مطالعه مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل رفتار ریتمیک سلول‌های مولد الگو را با معادلات غیرخطی زیر توصیف می‌کند:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= f_1(u, v) = -\varphi \tau(v)(n(v) - u) \\ \dot{v} &= f_2(u, v) = -m(v) \cdot g_{Ca}(v - V_{Ca}) \\ &\quad - u \cdot g_K(v - V_K) - g_L(v - V_L) \\ &\quad + I_{app} \end{aligned} \quad (1)$$

که در معادله بالا،  $v$  اختلاف پتانسیل غشای سلولی نورون‌ها،  $I_{app}$  مقدار جریان محرک عبوری از سلول، و مقادیر  $g_{Ca}(v - V_{Ca})$ ،  $g_K(v - V_K)$  و  $g_L(v - V_L)$  نماینده سهم مجاری یونی می‌باشند که اختلاف پتانسیل غشای سلولی را تنظیم می‌کنند. به‌علاوه، توابع  $m(v)$ ،  $n(v)$  و  $\tau(v)$  طبق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} m(v) &= \frac{1}{2} \left( 1 + \tanh \left( \frac{v - V_1}{V_2} \right) \right) \\ n(v) &= \frac{1}{2} \left( 1 + \tanh \left( \frac{v - V_3}{V_4} \right) \right) \\ \tau(v) &= \frac{1}{2} \left( 1 + \cosh \left( \frac{v - V_3}{2V_4} \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

که در اینجا ثابت‌های  $V_1$  تا  $V_4$  برای مقیاس‌بندی کمیت  $v$  تعریف شده‌اند. مقادیر عددی ثابت‌ها که در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است در جدول 1 داده شده است [28].

معادله (1) دینامیک داخلی یک سلول منزوی در شبکه‌ی مولد الگو را توصیف می‌کند، و البته خروجی نهایی هر سلول تحت تأثیر پیوندهای آن با دیگر سلول‌های موجود در شبکه شکل می‌گیرد. بنابراین در مدل‌سازی شبکه می‌باید مدل پیوندهای بین سلولی را نیز تعیین کنیم. در ادبیات فن دو مدل برای پیوندهای بین سلولی معرفی شده است، مدل سیناپسی و مدل انتشاری. در این مقاله شبکه را با پیوندهای انتشاری مورد مطالعه قرار می‌دهیم [28]. مدل پیوند انتشاری به صورت زیر تعریف می‌شود:

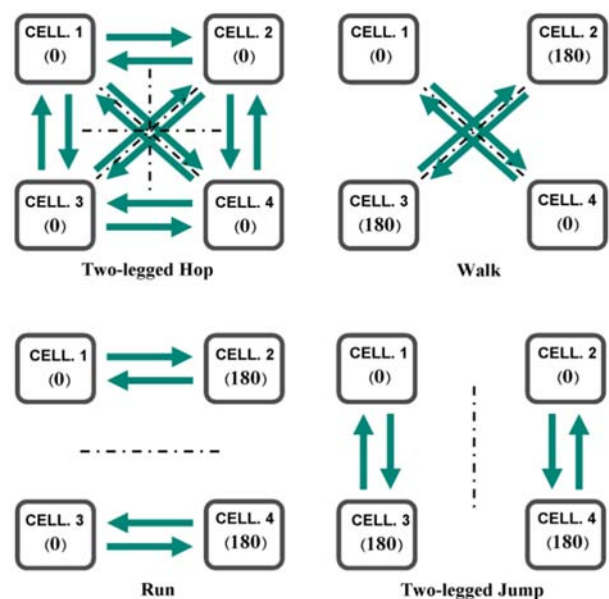


Fig. 2 The symmetrical phase relations in primary gaits.

شکل 2 ارتباط‌های تقارنی فاز در گام‌های اولیه

$$h(y_m, y_n) = y_n - y_m \quad (3)$$

که در آن،  $y_m$  و  $y_n$  به ترتیب نماینده خروجی سلول‌های دهنده و گیرنده می‌باشد. به این ترتیب، مدل شبکه‌ی چهار سلولی مولد الگوی مرکزی مطابق رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= F(y_1, y_2, y_3, y_4) = f_2(u_1, y_1) - w_{21}^a h(y_2, y_1) - \\ &\quad w_{31}^b h(y_3, y_1) - w_{41}^c h(y_4, y_1) \\ \dot{y}_2 &= F(y_2, y_1, y_4, y_3) = f_2(u_2, y_2) - w_{12}^a h(y_1, y_2) - \\ &\quad w_{42}^b h(y_4, y_2) - w_{32}^c h(y_3, y_2) \\ \dot{y}_3 &= F(y_3, y_4, y_1, y_2) = f_2(u_3, y_3) - w_{43}^a h(y_4, y_3) - \\ &\quad w_{13}^b h(y_1, y_3) - w_{23}^c h(y_2, y_3) \\ \dot{y}_4 &= F(y_4, y_3, y_2, y_1) = f_2(u_4, y_4) - w_{34}^a h(y_3, y_4) - \\ &\quad w_{24}^b h(y_2, y_4) - w_{14}^c h(y_1, y_4) \end{aligned} \quad (4)$$

که در اینجا  $y_i$  خروجی سلول  $i$  ام می‌باشد. قابل ذکر است که  $y_i$  و  $u_i$  متغیرهای حالت دینامیک داخلی نوسان‌گرها هستند. بنابراین، دینامیک متغیر حالت دوم طبق رابطه‌ی (1) عبارت خواهد بود از:

$$\dot{u}_i = f_1(u_i, y_i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

### 4- بهینه‌یابی مقادیر وزن‌های پیوندی برای تولید گام‌های اولیه

برای تولید گام‌های دوپایی اولیه، می‌بایست وزن‌های پیوندی بین سلول‌های شبکه‌ی چهار سلولی طوری تنظیم شود که در حد امکان اختلاف فاز بین سیگنال‌های ریتمیک تولید شده توسط سلول‌ها مطابق با مقادیر مطلوب نشان داده شده در شکل 2 باشد. برای این منظور یک مسئله‌ی بهینه‌سازی برای یافتن وزن‌های پیوندی تعریف می‌کنیم. بنا به آنچه ذکر شد، برای هر گام اولیه سه تابع هدف تعریف می‌شود که هر یک اختلاف فاز بین سلول اول و یکی دیگر از سلول‌های شبکه را محاسبه می‌کند. روشن است که اگر اختلاف فاز بین سلول اول با دیگر سلول‌ها معین شود، اختلاف فاز بین سلول‌های دیگر نیز معین خواهد شد. توابع هدف برای هر گام به صورت زیر تعریف می‌شود:

برای گام راه رفتن:

$$\begin{aligned} z_1 &= |\Delta_\phi(y_1, y_2) - 180|; \quad z_2 = |\Delta_\phi(y_1, y_3) - 180|; \\ z_3 &= |\Delta_\phi(y_1, y_4) - 0.00| \end{aligned} \quad (6)$$

برای گام دوپیدن:

$$\begin{aligned} z_1 &= |\Delta_\phi(y_1, y_2) - 0.00|; \quad z_2 = |\Delta_\phi(y_1, y_3) - 180|; \\ z_3 &= |\Delta_\phi(y_1, y_4) - 180| \end{aligned} \quad (7)$$

برای گام جهش دوپا:

$$\begin{aligned} z_1 &= |\Delta_\phi(y_1, y_2) - 180|; \quad z_2 = |\Delta_\phi(y_1, y_3) - 0.00|; \\ z_3 &= |\Delta_\phi(y_1, y_4) - 180| \end{aligned} \quad (8)$$

برای گام پرش دوپا:

$$\begin{aligned} z_1 &= |\Delta_\phi(y_1, y_2) - 180|; \quad z_2 = |\Delta_\phi(y_1, y_3) - 0.00|; \\ z_3 &= |\Delta_\phi(y_1, y_4) - 180| \end{aligned} \quad (9)$$

که در این روابط  $z$  نماینده‌ی تابع هدف بوده و  $\Delta_\phi(\dots)$  اختلاف فاز میان سلول‌ها را اندازه می‌گیرد.

برای حل این مسئله از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب استفاده می‌شود. این الگوریتم توسط دب و همکاران [29] معرفی شده است. وزن‌های پیوندی  $w_a$ ،  $w_b$  و  $w_c$  به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشند. باید به این نکته توجه کرد که به منظور تولید گام‌های اولیه همه‌ی تقارن‌ها در پیوندهای بین سلولی باید برقرار شود و بنابراین هر پیوند دوطرفه شامل تنها یک مقدار وزنی برای هر دو مسیر دهنده و گیرنده خواهد بود.

متغیرهای بهینه‌سازی در قالب کروموزم‌های دودویی رمز می‌شوند. آنگاه یک جمعیت اولیه تولید می‌شود، و طی فرآیندهای انتخاب، برش و جهش جمعیت جدید دیگری که اعضای آن بیشترین مقدار شباهت را داشته‌اند

**جدول 1** مقادیر پارامترهای نامتغیر در دینامیک داخلی سلول‌ها با مدل موریس - لکار

**Table 1** Values of invariant parameters of the cells' internal dynamics according to Morris – Lecar model

$g_{Ca}$ (mmho/cm <sup>2</sup> )	$g_K$ (mmho/cm <sup>2</sup> )	$g_L$ (mmho/cm <sup>2</sup> )	
0.9	2.00	0.5	
$V_{Ca}$ (mV)	$V_K$ (mV)	$V_L$ (mV)	
1.00	-0.7	-0.5	
$V_1$ (mV)	$V_2$ (mV)	$V_3$ (mV)	$V_4$ (mV)
0.01	0.15	0.10	0.15

**جدول 2** مقادیر پارامترهای متغیر در دینامیک سلول‌ها و وزن‌های بهینه‌ی پیوندها

**Table 2** Values of variant parameters of the cells' internal dynamics and optimal weights of the couplings

وزن‌های بهینه‌ی پیوندها ( $w_a$ $w_b$ $w_c$ )	پارامترهای دینامیک سلول ( $I_{app}$ $\varphi$ )	نوع گام
(0.390 -0.681 0.489)	(0.229 0.254)	راه رفتن
(-0.936 1.000 0.652)	(0.290 0.394)	دویدن
(0.982 -0.013 -0.221)	(0.279 0.194)	جهش دوپا
(0.362 0.328 -0.016)	(0.279 0.294)	پرش دوپا

**جدول 3** مقادیر اولیه‌ی متغیرهای حالت دینامیک سلول‌ها در تولید گام‌های اولیه

**Table 2** Initial values of the state variables of the cells' dynamics for generating the primary gaits

مقادیر اولیه‌ی متغیر $v$	مقادیر اولیه‌ی متغیر $u$	نوع گام
(0.280 0.277) (-0.197 0.159)	(-0.197 0.159) (0.280 0.277)	راه رفتن
(-0.304 0.163) (-0.304 0.163)	(0.169 0.229) (0.169 0.229)	دویدن
(-0.046 0.398) (0.327 0.253)	(-0.046 0.398) (0.327 0.253)	جهش دوپا
(-0.059 0.225) (-0.059 0.225)	(-0.059 0.225) (-0.059 0.225)	پرش دوپا

تولید شده توسط شبکه پس از طی دوره‌ی گذرا و رسیدن به حالت پایا شرایط تقارنی مورد انتظار را برآورده می‌کنند. در شکل‌های 3 تا 6 این سیگنال‌های ریتمیک در یک بازه‌ی زمانی پس از پایایی به‌ترتیب برای هر یک از گام‌های راه رفتن، دویدن، جهش دوپا و پرش دوپا نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر یک از گام‌های اولیه سیگنال‌های ریتمیک خروجی همه‌ی سلول‌ها شکل موج یکسانی دارند. به‌علاوه اختلاف فاز میان سلول‌ها نیز همان‌گونه که در هر گام مورد انتظار بود، مطابق شکل 2، حاصل شده است. برای نمونه، سیگنال‌های ریتمیک مولد گام پرش دوپا همگی هم‌فاز هستند.

سیگنال‌های ریتمیک مولد گام‌های ثانویه در نتیجه‌ی دوشاخگی حاصل از شکستن یکی از تقارن‌های موجود در شبکه‌ی چهار سلولی مولد گام‌های اولیه به وجود می‌آیند. نقص در تقارن پیوندهای بین سلولی شبکه سبب می‌شود شکل موج یکسانی از همه‌ی سلول‌ها حاصل نشود. با این حال می‌توانیم برخی اختلاف فازهای مشخصی را بین سیگنال‌های هم‌شکل انتظار داشته باشیم که متناظر با یک گام حرکتی دوطایی باشد. پینتو و گلابیتسکی [25] در مورد پاسخ‌های ریتمیکی که ممکن است توسط شبکه‌ی چهار سلولی تولید شود مطالعه کردند و پیش‌بینی کردند این شبکه می‌تواند 11 نوع پاسخ ریتمیک متناظر با الگوهای حرکتی دوطایی تولید کند. 4 پاسخ ریتمیک ممکن، دارای سیگنال‌های سلولی با شکل موج یکسان هستند که متناظر با گام‌های اولیه می‌باشند. 1 پاسخ ممکن نیز وجود دارد که در آن هر سلول یک شکل موج متفاوت تولید می‌کند که متناظر با هیچ گام حرکتی نخواهد بود. سیگنال‌های

نسل بعدی را می‌سازد. در الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب دو مفهوم «رتبه‌بندی» و «فاصله‌ی ازدحام» تعریف می‌شود تا یک مسئله‌ی چند هدفه را به‌سمت پاسخ بهینه‌ی آن هدایت کند. در این الگوریتم کروموزم‌ها بر اساس رابطه‌ی غالب و مغلوب رتبه‌بندی می‌شوند. در این رابطه، کروموزم  $X$  بر  $Y$  غلبه می‌کند، اگر  $X$  از هیچ نظر بدتر از  $Y$  نباشد و حداقل از یک نظر بهتر از  $Y$  باشد. در هر مقایسه، اگر کروموزم  $X$  بر کروموزم  $Y$  غلبه کند، کروموزم  $Y$  به مجموعه غالب  $X$  اضافه و به شمارنده‌ی مغلوب  $Y$  یک واحد اضافه می‌شود. حال کروموزم‌هایی که شمارنده‌ی مغلوب آنها صفر باشد، یعنی آنهایی که در رقابت با سایر کروموزم‌ها هیچ‌گاه مغلوب نشده‌اند، رتبه‌ی 1 کسب می‌کنند و یک «جبهه‌ی پرتو» از رتبه‌ی 1 را تشکیل می‌دهند. رتبه‌بندی‌های بعدی با حذف کروموزم‌های حائز رتبه‌ی 1 از مجموعه‌ی غالب سایر کروموزم‌ها و کاستن یک واحد از شمارنده‌ی مغلوب آنها انجام می‌شود. آنگاه کروموزم‌هایی که شمارنده‌ی مغلوب آنها صفر باشد، رتبه‌ی 2 گرفته و یک جبهه‌ی پرتوی جدید تشکیل می‌دهند؛ و این روند تا آخرین کروموزم نامغلوب ادامه می‌یابد. به‌طور خلاصه می‌توان گفت که در این روش به‌جای ارزیابی مقدار واقعی توابع هدف به ازای یک جواب، از میان جواب‌های موجود در جمعیت که همه با کروموزم‌ها رمز شده‌اند، آن جواب بر اساس رتبه‌ی آن که در فرآیند رتبه‌بندی کسب می‌کند ارزیابی می‌شود؛ و به این صورت جبهه‌های پرتوی بهینه تشکیل می‌شوند [30].

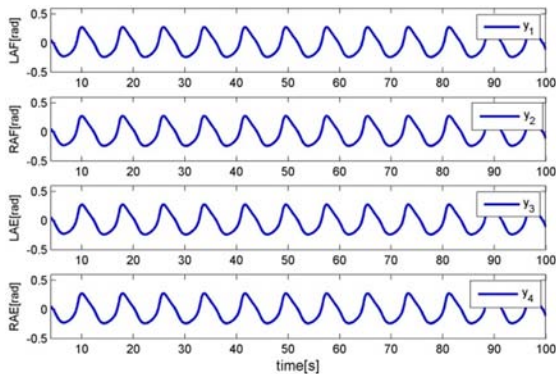
پس از تشکیل تمام جبهه‌های پرتوی ممکن، فاصله‌ی ازدحامی هر یک از کروموزم‌های متعلق به یک جبهه محاسبه می‌گردد. برای این منظور در هر جبهه‌ی پرتو، و به ازای هر کروموزم، فاصله‌ی آن از دو کروموزم کناری خود محاسبه شده و به عنوان فاصله ازدحامی آن کروموزم ذخیره می‌شود. به‌علاوه آنهایی که در ابتدا و انتهای هر بازه قرار می‌گیرند دارای فاصله‌ی ازدحامی بی‌نهایت خواهند بود. محاسبه‌ی فاصله‌ی ازدحامی به انتخاب هر چه بهتر شایسته‌ترین کروموزم (جواب) کمک می‌کند. به این ترتیب جواب بهینه، اولاً متعلق به جبهه‌ی پرتویی با کمترین رتبه است، که شایسته‌ترین جواب‌ها آنجا قرار دارند، و ثانیاً فاصله‌ی ازدحامی آن کمتر از بقیه است، زیرا تمرکز جواب‌ها که با فاصله‌ی ازدحامی کمتر آنها ارزیابی می‌شود، نشان دهنده‌ی نزدیکی به شرایط بهینه است، و این بخت بیشتری برای بقای آنها ایجاد خواهد کرد. در اجرای این الگوریتم از عمل‌گر برش دو نقطه‌ای استفاده خواهد شد و نرخ برش و جهش به‌ترتیب برابر 0.8 و 0.03 منظور می‌شود.

## 5- ارائه‌ی نتایج و بحث

ابتدا در نرم‌افزار متلب به مدلسازی شبکه‌ی چهار سلولی مولد الگوی مرکزی که هر سلول آن با دینامیک غیرخطی موریس - لکار تحول کند و پیوندهای بین سلولی تابع قانون انتشاری باشند، پرداختیم. برخی پارامترهای مربوط به دینامیک داخلی سلول در تولید هر چهار گام اولیه (و نیز گام‌های ثانویه) بدون تغییر مقادیر آنها در جدول 1 فهرست شده‌اند. مقادیر سایر پارامترهایی که در تولید هر گام به طور مجزا مقداردهی شدند، به همراه مقادیر بهینه‌ی وزن‌های پیوندی برای تولید آن گام که با بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب به‌دست آمد، نیز در جدول 2 فهرست شده‌اند. مقادیر اولیه‌ی متغیرهای حالت سلول که در حل عددی دستگاه معادلات حاصل از مدلسازی شبکه استفاده شدند، به تفکیک هر یک از گام‌های اولیه، در جدول 3 داده شده است.

شرایط تقارنی متناظر با هر یک از گام‌های اولیه در مقداردهی اولیه به متغیرهای حالت رعایت نشده است، ولی با این حال سیگنال‌های ریتمیک





**Fig. 6** The 4-cell network output rhythmic signals for 2-legged hop  
 شکل 6 سیگنال‌های ریتمیک خروجی از شبکه‌ی چهارسلولی برای پرش دوپا

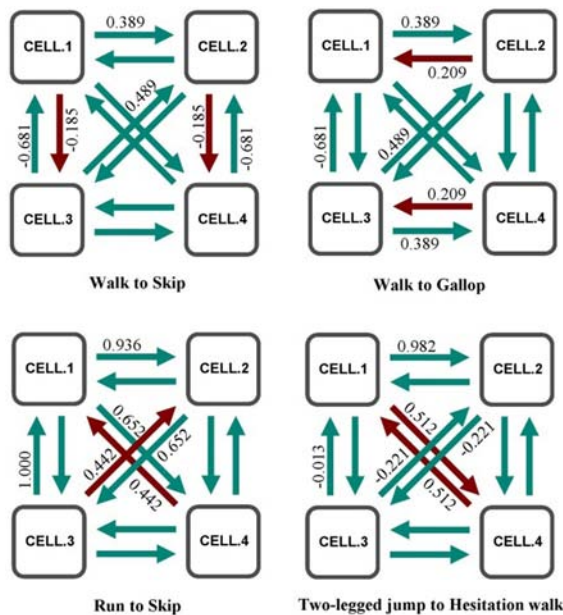
در بیان این روابط  $y_1(t)$  و  $y_2(t)$  نماینده‌ی دو شکل موج متفاوت تولید شده توسط سلول‌های شبکه است. نیم‌دور خارج از فاز بودن یک سیگنال نیز با انتقال زمان از  $t$  به  $t + 0.5$  مشخص شده است.

در مقاله‌ی حاضر توانسته‌ایم توسط شبکه‌ی چهار سلولی با دینامیک داخل سلولی مدل موریس- لکار و پیوند بین سلولی نوع انتشاری موفق به تولید سیگنال‌های ریتمیک مولد سه گام ثانویه شویم، شکل 7. گام‌های جست‌زدن، تاخت‌رفتن و راه‌رفتن آرام توسط شبکه‌ی مفروض به دست آمدند.

**جدول 4** روابط اختلاف فاز بین سیگنال‌های سلولی مولد گام‌های ثانویه

**Table 4** Relations of phase difference between the cell's signals generating the secondary gaits

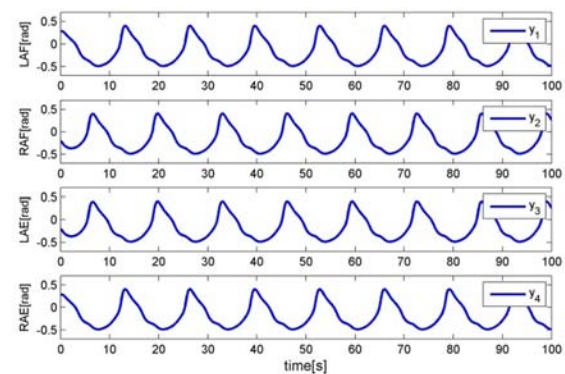
نام گام	پای چپ (LAF, LAE)	پای راست (RAF, RAE)
جست زدن	$(y_1(t), y_2(t))$	$(y_1(t + 0.5), y_2(t + 0.5))$
تاخت رفتن	$(y_1(t), y_1(t + 0.5))$	$(y_2(t), y_2(t + 0.5))$
راه رفتن آرام	$(y_1(t), y_2(t + 0.5))$	$(y_2(t), y_1(t + 0.5))$
پرش نامتقارن	$(y_1(t), y_2(t))$	$(y_2(t), y_1(t))$
پرش تک‌پا	$(y_1(t), y_1(t))$	$(y_2(t), y_2(t))$



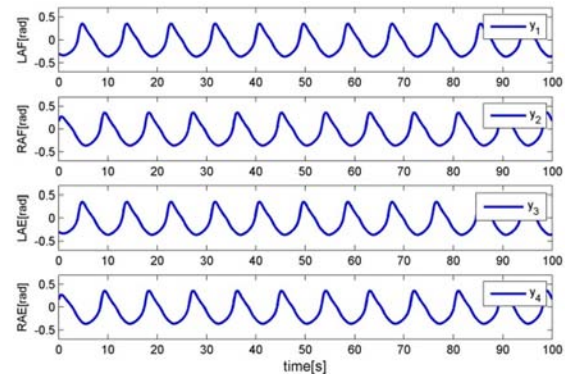
**Fig. 7** Couplings symmetry breaking via varying some weight values of the couplings between cells in order to gait transition

شکل 7 شکستن تقارن پیوندی با تغییر برخی مقادیر وزنی پیوندهای بین سلولی جهت گذر از یک گام اولیه به یک گام ثانویه

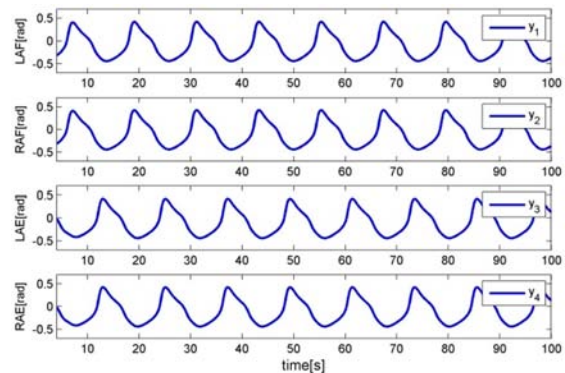
متناظر با 6 پاسخ ریتمیک دیگری که می‌توانند توسط شبکه‌ی چهار سلولی تولید شوند، دارای دو شکل موج متفاوت می‌باشند. بسته به آنکه کدام یک از جفت سلول‌ها دارای شکل موج یکسانی هستند و نیز چه اختلاف فازی بین سیگنال‌های هم‌شکل آنها وجود دارد، 5 گام حرکتی دوطایی به این 5 پاسخ از 6 پاسخ پیش‌بینی شده نسبت داده شده است که عبارتند از: جست زدن، تاخت رفتن، راه رفتن آرام، پرش نامتقارن و پرش تک‌پا. برای تولید این گام‌ها می‌باید برخی وزن‌های پیوندی را با سعی و خطا تغییر دهیم و تلاش کنیم تا یک رابطه‌ی مطلوب بین اختلاف فاز سیگنال‌های ریتمیک با شکل موج واحد، مطابق با آنچه برای یک گام مفروض تعریف شده است، حاصل شود. روابط مطلوب اختلاف فاز بین سیگنال‌های سلولی مولد گام‌های ثانویه، مطابق آنچه در مرجع [25] عنوان شده است، در جدول 4 مشاهده می‌شود.



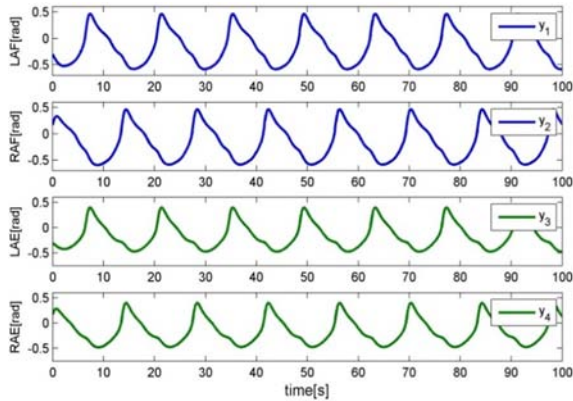
**Fig.3** The 4-cell network output rhythmic signals for walk  
 شکل 3 سیگنال‌های ریتمیک خروجی از شبکه‌ی چهارسلولی برای راه رفتن



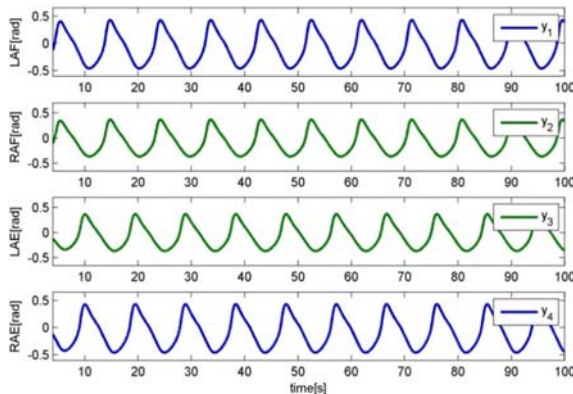
**Fig. 4** The 4-cell network output rhythmic signals for run  
 شکل 4 سیگنال‌های ریتمیک خروجی از شبکه‌ی چهارسلولی برای دویدن



**Fig. 5** The 4-cell network output rhythmic signals for 2-legged jump  
 شکل 5 سیگنال‌های ریتمیک خروجی از شبکه‌ی چهارسلولی برای جهش دوپا



**Fig. 10** Rhythmic signals obtained by gait transition from run to skip  
 شکل 10 سیگنال‌های ریتمیک حاصل از گذر گام از دویدن به جست زدن



**Fig. 11** Rhythmic signals obtained by gait transition from two-legged jump to hesitation walk  
 شکل 11 سیگنال‌های ریتمیک حاصل از گذر گام از جهش دوپا به راه رفتن آرام

برای توضیح آنکه شکستن تقارن‌های پیوندی چگونه موجب از بین رفتن تقارن در الگوی پاسخ‌های ریتمیک شبکه‌ی چهار سلولی می‌شود، برای نمونه، به سیگنال‌های مولد جست زدن که به موجب گذر از گام اولیه‌ی راه رفتن حاصل شد، توجه می‌کنیم. با توجه به شکل 8 درمی‌یابیم جفت سلول‌هایی که نسبت به خط تقارن عمودی در شبکه روبروی هم قرار می‌گیرند دارای شکل موج یکسان هستند و تنها یک اختلاف فاز نیم دور تناوبی با هم دارند. ولی آنهایی که نسبت به خطوط تقارن افقی یا قطری در شبکه روبرو هستند از اساس شکل موج متفاوت دارند و هیچ‌گاه انطباق آنها ممکن نخواهد بود.

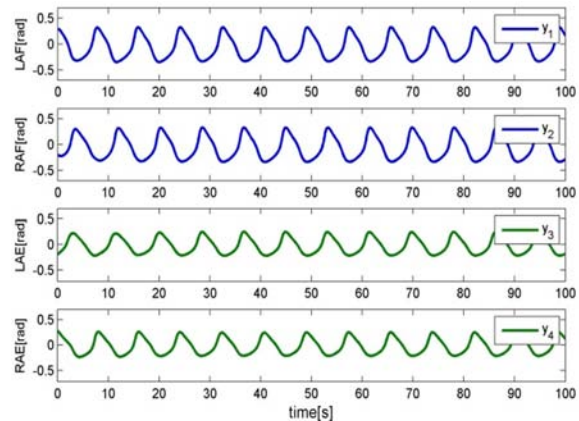
با این توضیح می‌توان دو نوع توصیف تقارنی برای سیگنال‌های ریتمیک تولید شده توسط سلول‌های شبکه ارائه داد. نوع اول، تقارن مکانی-زمانی است که در آنجا یک جفت سلول متقارن نسبت به خط تقارن مفروض سیگنال‌هایی تولید می‌کنند که هم دارای شکل موج یکسان هستند (مکانی) و هم دارای فاز برابر (زمانی). بنابراین این نوع از تقارن تنها در گام‌های اولیه امکان وقوع خواهد داشت. نوع دوم، تقارن مکانی است که در آنجا یک جفت سلول متقارن نسبت به خط تقارن مفروض سیگنال‌هایی تولید می‌کنند که تنها دارای شکل موج یکسان هستند. پس اگر یک جفت سلول تقارن مکانی داشته باشند با یک انتقال زمانی می‌توان سیگنال‌های خروجی آنها را بر هم منطبق کرد. می‌توان گفت تمامی گام‌های اولیه دارای تمام تقارن‌های مکانی در هر سه جهت افقی، عمودی و قطری هستند.

چند قاعده‌ی زیر جهت نمادگذاری تقارن‌های موجود در گام‌های دوطایی تعریف می‌شوند [25]:

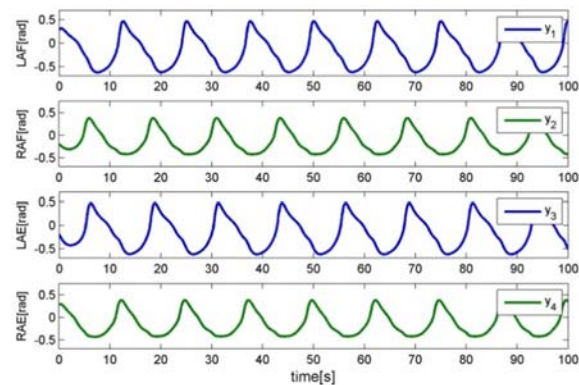
گام جست زدن با گذر از گام اولیه‌ی راه رفتن با شکستن تقارن پیوندی در جهت عمودی، و نیز با گذر از گام اولیه‌ی دویدن با شکستن تقارن پیوندی در جهت قطری حاصل شده است. گام تاخت رفتن تنها با گذر از گام اولیه‌ی راه رفتن با شکست تقارن پیوندی در جهت افقی حاصل شد. بنا به پیش‌بینی مرجع [25] تولید گام تاخت رفتن با شکستن تقارن افقی در گام اولیه‌ی جهش دوپا نیز امکان‌پذیر خواهد بود، که در این پژوهش موفق به آن نشدیم. به‌علاوه، گام‌های ثانویه‌ی پرش نامتقارن و پرش تک‌پا نیز توسط شبکه‌ی چهار سلولی طراحی شده در این مقاله قابل حصول نبودند.

یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله امکان تولید سیگنال‌های ریتمیک مولد گام ثانویه‌ی راه رفتن آرام می‌باشد که با گذر از گام اولیه‌ی جهش دوپا با شکستن تقارن پیوندی در جهت قطری به‌دست آمد. با این حال، مرجع [25] امکان تولید این گام را با گذر از گام اولیه‌ی دویدن با شکستن تقارن پیوندی در جهت افقی نیز پیش‌بینی می‌کند، که با مدل شبکه‌ی چهار سلولی مفروض در این مقاله حاصل نشد.

آن سیگنال‌های ریتمیک مولد گام‌های ثانویه که در این مطالعه موفق به تولید آنها در نتیجه‌ی شکستن تقارن پیوندی در شبکه‌ی چهار سلولی متقارن و ایجاد گذر در گام‌های اولیه شدیم به‌ترتیب در شکل‌های 8 تا 11 نشان داده شده است. رنگ‌های آبی و سبز به جهت تأکید بر وجود دو شکل موج متفاوت استفاده شده است. همچنین روابط اختلاف فاز بین سیگنال‌های تولید شده توسط سلول‌های متناظر با گروه‌های ماهیچه‌ای خم‌کننده و بازکننده‌ی قوزک پاهای چپ و راست از روابط داده شده در جدول 4 تبعیت می‌کند.



**Fig.8** Rhythmic signals obtained by gait transition from walk to skip  
 شکل 8 سیگنال‌های ریتمیک حاصل از گذر گام از راه رفتن به جست زدن



**Fig. 9** Rhythmic signals obtained by gait transition from walk to gallop  
 شکل 9 سیگنال‌های ریتمیک حاصل از گذر گام از راه رفتن به تاخت رفتن



جدول 5 تقارن‌های موجود در پاسخ‌های ریتمیک مولد گام‌های دویابی

Table 5 Symmetries in the rhythmic signals generating bipedal gaits

H	K	پاسخ‌های ریتمیک سلولی	نام گام
D	$\rho$ - $\tau$	$(y_1(t), y_1(t+0.5), y_1(t+0.5), y_1(t))$	راه رفتن
D	$\tau$	$(y_1(t), y_1(t+0.5), y_1(t), y_1(t+0.5))$	دویدن
D	$\rho$	$(y_1(t), y_1(t), y_1(t+0.5), y_1(t+0.5))$	جهش دویا
D	D	$(y_1(t), y_1(t), y_1(t), y_1(t))$	پرش دویا
$\rho$	I	$(y_1(t), y_1(t+0.5), y_2(t), y_2(t+0.5))$	جست زدن
$\tau$	I	$(y_1(t), y_2(t), y_1(t+0.5), y_2(t+0.5))$	تاخت رفتن
$\rho$ - $\tau$	I	$(y_1(t), y_2(t), y_2(t+0.5), y_1(t+0.5))$	راه رفتن آرام

1) تقارن مکانی - زمانی در هر جهتی را با نماد K نشان دهیم.

2) تقارن مکانی در هر جهتی را با نماد H نشان دهیم.

3) تقارن در جهت عمودی را با نماد  $\rho$ ، در جهت افقی را با نماد  $\tau$ ، و

در جهت قطری را با نماد  $\rho$ - $\tau$  با نشان دهیم.

4) وجود تقارن در تمام جهات را با D و عدم تقارن در تمام جهات را با I نشان دهیم.

به این صورت شرایط تقارنی شبکه که منجر به تولید پاسخ‌های ریتمیک مولد گام‌های دویابی می‌شود، و با تئوری ارائه شده توسط پینتو و گلابیتسکی [25] موسوم به H/K پیش‌بینی شده است، با قواعد نمادگذاری تعریف شده، در جدول 5 فهرست می‌شوند.

## 6- نتیجه گیری

در این مقاله، مدل شبکه‌ی مولد الگوی مرکزی چهار سلولی، الهام گرفته شده از علوم زیستی، با دینامیک سلولی مبتنی بر نوسان گر غیرخطی موریس - لکار و پیوندهای بین سلولی نوع انتشاری، به‌منظور تولید الگوهای ریتمیک متناظر با گام‌های دویابی ارائه شد. خروجی این مدل شامل چهار سیگنال ریتمیک بود که به‌عنوان پیام‌های عصبی برای تحریک ماهیچه‌های خم و بازکننده‌ی مفاصل قوزک پاهای چپ و راست تولید می‌شدند. گام‌های دویابی بر اساس شکل موج سیگنال‌های ریتمیک تولیدی سلول‌ها به دو دسته‌ی اولیه و ثانویه تقسیم شدند. در مرحله‌ی اول یک مساله‌ی بهینه‌سازی برای یافتن وزن‌های پیوندی بهینه، که باعث تولید اختلاف فاز مطلوب بین سیگنال‌های سلولی می‌گردد، طراحی شد. با حل این مساله با استفاده از یک الگوریتم ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب چهار گام اولیه‌ی ممکن تولید شدند. در مرحله‌ی دوم برخی وزن‌های پیوندی به روش سعی و خطا تغییر داده شد تا با دوشاخگی حاصل از شکستن تقارن امکان گذر گام به یک گام ثانویه فراهم آید. به این صورت سه گام ثانوی جست زدن (با گذر گام از دویدن و نیز راه رفتن)، تاخت رفتن (با گذر از راه رفتن) و مهم‌تر از آنها «راه رفتن آرام» (با گذر از جهش دویا) تولید شدند. شایان ذکر است که در پژوهش‌های قبلی امکان تولید گام راه رفتن آرام با گذر از هیچ گام اولیه‌ای میسر نشده بود [28].

## 7- مراجع

movements, *Current biology*, Vol. 11, No. 23, pp. R986-R996, 2001.

[5] P. A. Guertin, The mammalian central pattern generator for locomotion, *Brain Research Reviews*, Vol. 62, No. 1, pp. 45-56, 2009.

[6] S. Aoi, Y. Egi, R. Sugimoto, T. Yamashita, S. Fujiki, K. Tsuchiya, Functional roles of phase resetting in the gait transition of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion, *Robotics, IEEE Transactions on*, Vol. 28, No. 6, pp. 1244-1259, 2012.

[7] G. Aguirre-Ollinger, Exoskeleton control for lower-extremity assistance based on adaptive frequency oscillators: Adaptation of muscle activation and movement frequency, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, Vol. 229, No. 1, pp. 52-68, 2015.

[8] X. Zhang, M. Hashimoto, Evaluation on interaction ability of a walking robotic suit with synchronization based control, in *Proceedings of Robotics and Biomimetics, IEEE*, pp. 265-270, 2010.

[9] G. Taga, A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion, *Biological cybernetics*, Vol. 73, No. 2, pp. 97-111, 1995.

[10] G. Endo, J. Morimoto, T. Matsubara, J. Nakanishi, G. Cheng, Learning CPG-based biped locomotion with a policy gradient method: Application to a humanoid robot, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 27, No. 2, pp. 213-228, 2008.

[11] J. J. Collins, S. A. Richmond, Hard-wired central pattern generators for quadrupedal locomotion, *Biological Cybernetics*, Vol. 71, No. 5, pp. 375-385, 1994.

[12] Y. Fukuoka, H. Kimura, A. H. Cohen, Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22, No. 3-4, pp. 187-202, 2003.

[13] J. Buchli, A. J. Ijspeert, Self-organized adaptive legged locomotion in a compliant quadruped robot, *Autonomous Robots*, Vol. 25, No. 4, pp. 331-347, 2008.

[14] A. Crespi, D. Lachat, A. Pasquier, A. J. Ijspeert, Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator, *Autonomous Robots*, Vol. 25, No. 1-2, pp. 3-13, 2008.

[15] X. Wu, S. Ma, CPG-based control of serpentine locomotion of a snake-like robot, *Mechatronics*, Vol. 20, No. 2, pp. 326-334, 2010.

[16] J.-K. Ryu, N. Y. Chong, B. J. You, H. I. Christensen, Locomotion of snake-like robots using adaptive neural oscillators, *Intelligent Service Robotics*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10, 2010.

[17] X. Wu, L. Teng, W. Chen, G. Ren, Y. Jin, H. Li, CPGs With Continuous Adjustment of Phase Difference for Locomotion Control, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 10, 2013.

[18] C. Liu, Q. Chen, D. Wang, CPG-inspired workspace trajectory generation and adaptive locomotion control for quadruped robots, *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, Vol. 41, No. 3, pp. 867-880, 2011.

[19] C. Liu, D. Wang, Q. Chen, Central pattern generator inspired control for adaptive walking of biped robots, *Systems, Man, and Cybernetics: Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 43, No. 5, pp. 1206-1215, 2013.

[20] J. Cristiano, D. Puig, M. A. García, Locomotion control of a biped robot through a feedback CPG network, *Proceeding of ROBOT2013*, Springer, pp. 527-540, 2013.

[21] J. Cristiano, D. Puig, M. Garcia, Efficient locomotion control of biped robots on unknown sloped surfaces with central pattern generators, *Electronics Letters*, Vol. 51, No. 3, pp. 220-222, 2015.

[22] C. Liu, Q. Chen, Methods Synthesis of Central Pattern Generator Inspired Biped Walking Control, *Proceeding of Chinese Intelligent Automation*, Springer, pp. 371-379, 2015.

[23] J.-J. Kim, J.-W. Lee, J.-J. Lee, Central pattern generator parameter search for a biped walking robot using nonparametric estimation based particle swarm optimization, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 447-457, 2009.

[24] M. Oliveira, V. Matos, C. P. Santos, L. Costa, Multi-objective parameter CPG optimization for gait generation of a biped robot, in *Proceeding of Robotics and Automation, IEEE*, pp. 3130-3135, 2013.

[25] C. M. Pinto, M. Golubitsky, Central pattern generators for bipedal locomotion, *Journal of mathematical biology*, Vol. 53, No. 3, pp. 474-489, 2006.

[26] M. Golubitsky, I. Stewart, P.-L. Buono, J. Collins, A modular network for legged locomotion, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 115, No. 1, pp. 56-72, 1998.

[27] P.-L. Buono, M. Golubitsky, Models of central pattern generators for quadrupedal locomotion I. Primary gaits, *Journal of Mathematical Biology*, Vol. 42, No. 4, pp. 291-326, 2001.

[28] C. M. Pinto, A. P. Santos, Modelling gait transition in two-legged animals, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 16, No. 12, pp. 4625-4631, 2011.

[29] K. Deb, S. Agrawal, A. Pratap, T. Meyarivan, A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI*, Springer, pp. 849-858, 2000.

[30] A. Konak, D. W. Coit, A. E. Smith, Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 91, No. 9, pp. 992-1007, 2006.

[1] A. J. Ijspeert, Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review, *Neural Networks*, Vol. 21, No. 4, pp. 642-653, 2008.

[2] Q. Wu, C. Liu, J. Zhang, Q. Chen, Survey of locomotion control of legged robots inspired by biological concept, *Science in China Series F: Information Sciences*, Vol. 52, No. 10, pp. 1715-1729, 2009.

[3] D. M. Wilson, The central nervous control of flight in a locust, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 38, No. 47, pp. 1-490, 1961.

[4] E. Marder, D. Bucher, Central pattern generators and the control of rhythmic