

Simulasi Pembentukan Formasi Pola Spasial Untuk Robot Koloni dengan Turing Morphogenetic Function

Tony, Freddy Kurniawan

Fakultas Teknologi Informasi Universitas Tarumanagara
Jl. Letjen S. Parman No. 1 Grogol – Jakarta, (021) 5676260 / (021) 56941924
e-mail: tony.b@fti.untar.ac.id

Abstrak

Pada penelitian ini, penulis melakukan simulasi pembentukan formasi pola spasial untuk sejumlah robot koloni dengan menggunakan metode Turing morphogenetic function. Simulasi dikembangkan dengan menggunakan Microsoft Robotics Developer Studio 2008. Pola formasi yang dibentuk adalah formasi pola segitiga pada sembilan buah robot Lego Mindstorms NXT. Mula-mula robot akan membentuk garis lurus, kemudian berputar membentuk lingkaran, dan akhirnya membentuk formasi pola segitiga.

Kata kunci: formasi pola spasial, robot koloni, Turing morphogenetic function

Abstract

In this research, the authors simulate the spatial pattern formation for a number of robot colonies using the Turing morphogenetic function. Simulation is developed using Microsoft Robotics Developer Studio 2008. Pattern formation is a formation which formed a triangle pattern on the nine pieces of Lego Mindstorms NXT robot. At first robots will form a straight line, then spun in a circle, and eventually formed a triangle pattern formation.

Keywords: spatial pattern formation, robot colonies, Turing morphogenetic function

1. Pendahuluan

Robot dapat didefinisikan dari dua sisi pandang, yaitu sebuah instrumen buatan yang bersifat virtual ataupun mekanikal [1]. Dari sudut pandang virtual, robot merupakan instrumen yang berbentuk perangkat lunak, tetapi memiliki kemampuan untuk melakukan proses seolah-olah diperintahkan oleh robot itu sendiri. Secara mekanikal, robot merupakan sebuah mesin-elektronik yang penampilan atau pergerakannya juga seolah-olah dilakukan sesuai keinginan instrumen tersebut. Karakteristik umum sebuah instrumen dikatakan sebagai robot yang disepakati oleh mayoritas para pakar dan masyarakat yaitu instrumen tersebut dapat bergerak ke segala arah, memiliki tangan mekanis, mampu merasakan (memanipulasi) kondisi lingkungan sekitarnya, dan memiliki kecerdasan yang menyerupai manusia atau sejumlah hewan tertentu [1].

Perkembangan robot yang melakukan pergerakan sepenuhnya tanpa kendali dari pihak lain (bersifat autonomous) mulai terjadi pada abad 20. Salah satu perkembangan teknologi robot yang dapat digunakan untuk sejumlah tujuan yang berguna adalah swarm robots. Penciptaan sekelompok robot kecil ini terinspirasi oleh koloni serangga seperti semut atau lebah, dan penerapannya terutama ditujukan untuk membantu kegiatan seperti pencarian segala sesuatu yang tersembunyi, pembersihan, dan pengawasan terhadap aktivitas seseorang atau kelompok tertentu (memata-matai) [1]. Keuntungan utama dari swarm robots adalah kekuatan robot memperbesar peluang keberhasilan dalam menjalankan tugas, dibandingkan jika menggunakan sebuah robot besar [2]. Jika biasanya sebuah robot besar dapat mengalami kegagalan dalam menjalankan tugas, swarm robots sebaliknya dapat terus beroperasi walaupun ada beberapa robot yang mengalami kegagalan, hal ini disebabkan adanya sinkronisasi tingkah laku yang dihasilkan melalui sistem kerja sama dari robot-robot dalam kelompoknya [2]. Kemampuan ini tentunya membuat swarm robots sesuai untuk diterapkan misalnya di penjelajahan luar angkasa, dimana kegagalan pelaksanaan tugas menyebabkan kerugian yang besar [1]. Sejumlah

penelitian banyak dilakukan untuk mengembangkan swarm robots, baik dari sisi arsitektur [2][3] dan kepintaran [4][5].

Berkaitan dengan cara swarm robots melakukan tugasnya secara kelompok, terdapat sebuah proses yang menjadi kunci utama dari sistem kerja sama robot tersebut yaitu pembentukan formasi. Pembentukan formasi merupakan salah satu proses yang terjadi pada saat robot-robot tersebut secara mandiri memposisikan diri di lokasi spasial yang berbeda untuk membentuk sebuah pola (posisi global) tertentu. Pembentukan formasi yang bersifat mandiri dan dilakukan tanpa kendali dari manusia (autonomous) merupakan salah satu dari teknologi kunci pengembangan sistem kerja sama dari robot tersebut.

Telah banyak penelitian yang mengajukan pembentukan formasi pola spasial untuk sekelompok robot, tapi beberapa diantaranya membutuhkan posisi global yaitu posisi dari setiap robot dalam kelompoknya [6][7][8][9]. Teknik ini membutuhkan sebuah sistem pendeteksian yang canggih dan jika robot-robot yang digunakan berukuran kecil, yang biasanya jenis robot kecil paling cocok untuk jenis swarm robots, tentulah teknik ini tidak praktis. Sejumlah penelitian lain [10][11][12][13][14] mengusulkan pendekatan dimana perubahan konfigurasi dalam koloni robot dikendalikan oleh salah satu robot yang berperan sebagai pemimpin. Cara ini memiliki kelemahan dari sisi kekuatan dari koloni robot, karena jika robot pemimpin mengalami kegagalan, maka proses pembentukan formasi pun gagal untuk dilaksanakan.

Oleh karena itu, teknik dimana setiap robot tidak perlu mengetahui posisi semua robot lainnya (posisi global) dan cukup menggunakan informasi lokal yang dimiliki untuk membentuk formasi secara keseluruhan, tentunya akan sangat menarik dalam kasus ini. Ikemoto et.al. [15] mengusulkan sebuah algoritma pembentukan formasi pola spasial secara perlahan dengan mengadopsi teknik tersebut dan menerapkan pada sekelompok robot homogen atau selanjutnya disebut sebagai koloni robot.

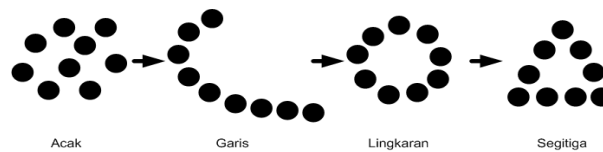
Pembentukan pola dari sebuah koloni robot merupakan proses dimana setiap robot dengan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak yang sama mengatur organisasi mereka berdasarkan tugas yang diberikan dan perubahan di lingkungan sekitar. Target utama dari sistem robot seperti ini adalah adanya kemampuan dari setiap robot untuk tetap bekerja dengan melakukan perubahan pada konfigurasinya sendiri atau perannya berdasarkan tugas yang diberikan dan lingkungan yang dihadapi. Oleh karena itu, sistem koloni robot yang dapat dikonfigurasi ulang merupakan sistem yang sangat sesuai untuk mencapai target utama tersebut.

Homogenitas dari robot-robot pada sebuah koloni menjadi keuntungan sendiri dari sisi tingginya kemampuan dan produktivitas mereka. Selain itu, mekanisme penentuan dan pengaturan tugas melalui negosiasi internal lebih dibutuhkan pada sistem robot homogen. Ikemoto et.al. [15] menekankan pada spesifikasi rancangan koloni robot yang sederhana, sehingga informasi yang dapat diukur oleh robot dibatasi pada informasi posisi lokal dan sedikit pertukaran sinyal antar robot tetangganya. Ikemoto mengusulkan sebuah algoritma pembentukan formasi spasial secara perlahan berdasarkan Turing Morphogenetic function. Penerapan teknik ini berhasil meningkatkan kompleksitas pergerakan sebuah koloni robot dari formasi garis lurus ke formasi lingkaran, dan kemudian terakhir membentuk formasi poligon yaitu segitiga, segiempat, dan heksagon.

Pembentukan formasi, digabungkan dengan kemampuan untuk mendeteksi perubahan kondisi lingkungan sekitar robot, dapat diterapkan untuk membantu proses seperti pemadaman kebakaran, pencarian dan penyelamatan korban bencana alam, penelusuran medan peperangan, eksplorasi luar angkasa, dan penambangan bawah laut, yang cukup berbahaya jika ditangani oleh manusia secara langsung. Bentuk formasi untuk berbagai kasus tersebut tentu saja akan sangat ditentukan oleh keadaan fisik dari lingkungan sekitarnya, dan tentu saja formasi lingkaran, segitiga, segi empat, atau heksagon tidak selalu tepat untuk kondisi yang dihadapi. Selain membantu manusia untuk situasi dan kondisi yang berbahaya, pembentukan formasi dapat dijadikan dasar untuk pengembangan sistem permainan sepak bola oleh sekelompok robot. Berbagai bentuk pemanfaatan ini tentulah sangat menarik dan menjadi sebuah tantangan tersendiri untuk lebih mengembangkan konsep pembentukan formasi pola spasial yang diusulkan oleh Ikemoto et.al. [15], agar dapat membentuk formasi yang lebih bervariasi sehingga dapat diterapkan di berbagai situasi dan kondisi.

Pembentukan formasi pola spasial bukanlah bidang baru dalam dunia robotika. Telah banyak penelitian dilakukan untuk mengusulkan berbagai macam teknik pembentukan formasi tersebut. Salah satu teknik yang sederhana tetapi memiliki kekuatan dan efektif adalah teknik pembentukan formasi spasial secara perlahan yang diusulkan oleh Ikemoto et.al.

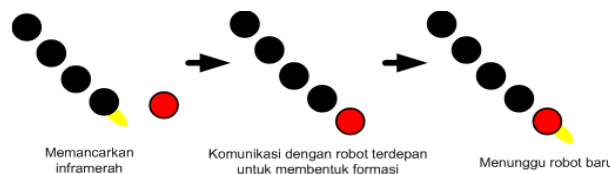
Formasi yang kompleks sebenarnya dapat dibentuk oleh sekelompok robot yang memiliki aturan yang sederhana dengan cara mendasarkan pembentukan formasi tersebut hanya pada interaksi loka, dan tidak membutuhkan informasi secara keseluruhan dan aturan-aturan yang kompleks [15]. Cara ini mengadopsi tingkah laku lebah yang membuat sarangnya. Setiap lebah menambahkan sel-sel ke sarangnya dan tindakan mereka tersebut didasarkan pada interaksi lokal. Ikemoto et.al. [15] mempertimbangkan konsep sederhana tersebut dan mengusulkan sebuah teknik pembentukan formasi pola spasial secara perlahan. Gambar 1 memperlihatkan contoh tiga formasi pola spasial, yaitu garis lurus, lingkaran dan poligon (segitiga), yang mereka bentuk dengan teknik yang diusulkan.



Gambar 1 Formasi Pola secara Perlahan

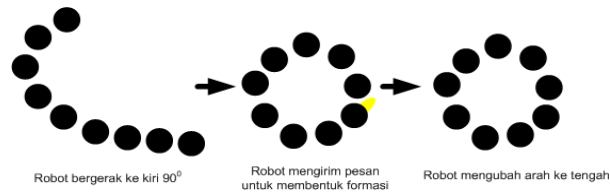
Ikemoto et.al. [15] menggunakan sejumlah robot buatan Fuji Heavy Industries Ltd. Setiap robot dapat bergerak secara autonomous dan memiliki 16 sensor infrared jarak sedang, 8 sensor infrared jarak dekat, 2 actuators, dan 1 microcontroller. Penggunaan sensor infrared ini membantu pengaturan formasi terutama untuk formasi garis lurus dan lingkaran, dimana pembentukan formasi tidak didasarkan pada perhitungan matematika, tetapi lebih pada pengaturan posisi sensor dari setiap robot yang harus saling berhadapan sehingga terjalin komunikasi antara satu robot dengan dua robot tetangganya.

Gambar 2 mengilustrasikan formasi garis lurus, dimana pada awalnya setiap robot yang memancarkan sinar infrared bergerak secara random. Jika sebuah robot yang dapat mendeteksi sinyal infrared yang dipancarkan oleh robot lain, maka robot tersebut bergerak mengikutinya. Robot yang mengikuti menjaga kecepatan pergerakan dan jarak dengan robot yang diikuti untuk menjaga kekuatan sinyal infrared. Jika sebuah robot baru bergabung, maka robot tersebut mengirim sinyal ke robot yang diikutinya untuk diteruskan ke robot selanjutnya sampai ke robot paling depan. Robot yang berada di posisi paling depan dapat mengetahui jumlah robot yang bergabung pada formasi garis lurus dengan cara menghitung pesan.



Gambar 2 Formasi Pola Garis Lurus

Gambar 3 mengilustrasikan formasi lingkaran. Dapat dilihat dari posisi formasi garis lurus, formasi lingkaran dapat dibentuk oleh robot yang berada di posisi depan dengan cara bergerak pada arah derajat tertentu. Setiap robot pada jalur garis lurus mengikuti robot yang di depannya, tetap menjaga kecepatan pergerakan dan jarak untuk mempertahankan intensitas sinyal infrared yang diterima dari robot di depannya. Radius pembentukan lingkaran tergantung pada jumlah robot, sehingga pada saat robot terdepan mendeteksi robot terakhir pada formasi garis lurus, robot terdepan mengirimkan pesan ke semua robot untuk berbelok 90° ke arah kiri.



Gambar 3 Formasi Pola Lingkaran

Untuk membentuk formasi poligon, Ikemoto mengadopsi konsep perbedaan sel biologi dengan menggunakan Morphogenetic function yang diusulkan oleh Turing [16]. Konsep Turing Morphogenetic function akan dijelaskan lebih detail pada bagian selanjutnya.

2. Metode Turing Morphogenetic Function

Dalam pembentukan formasi pola spasial, Ikemoto et.al. [15] tidak mempertimbangkan konsep lokasi global dari setiap robot dalam kelompoknya, melainkan mempertimbangkan interaksi lokal, dalam hal ini pertukaran sejumlah nilai pengganti koordinat posisi dari robot tersebut. Oleh karena itu, mereka menerapkan Turing Morphogenetic function yang merupakan model penggambaran proses perbedaan sel-sel biologis yang didasarkan pada reaksi dan difusi antara faktor activator (u) dan inhibitor (v), seperti diperlihatkan pada persamaan (1) dan (2).

$$\frac{\partial u}{\partial t} = (au - bv) + D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \tag{1}$$

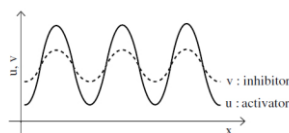
$$\frac{\partial v}{\partial t} = (cu - dv) + D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \tag{2}$$

Pada persamaan (1) maupun persamaan (2), bagian pertama yaitu (au – bv) dan (cu – dv) merupakan fungsi yang terdiri u dan v yang mengekspresikan reaksi. Bagian $D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ dan $D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ mengekspresikan difusi setiap faktor yang saling berinteraksi dengan asumsi sebagai berikut:

- Activator melakukan propagasi secara otomatis
- Inhibitor menghambat propagasi dari activator
- Activator menghasilkan inhibitor
- Setiap faktor dihasilkan secara konstan di sebuah sel

$$k_c = \left\{ \frac{-ad + bc}{D_u D_v} \right\}^{1/4} \tag{3}$$

dimana a, b, c, dan d adalah koefisien reaksi positif, sedangkan D_u dan D_v adalah koefisien difusi positif. Ikemoto et.al. [15] mengusulkan persamaan (3) dan konsep kestabilan gelombang untuk menentukan nilai a, b, c, d, D_u , dan D_v . Konsep kestabilan gelombang disini dapat dijelaskan bahwa nilai-nilai activator atau inhibitor pada interval tertentu harus membentuk gelombang yang sempurna seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Bentuk Gelombang Turing Morphogenetic function [15]

Lebih lanjut, Gambar 4 menjelaskan fluktuasi gradien konsentrasi spasial dari activator dan inhibitor, dimana propagasi kedua faktor berada di tingkat yang nilainya

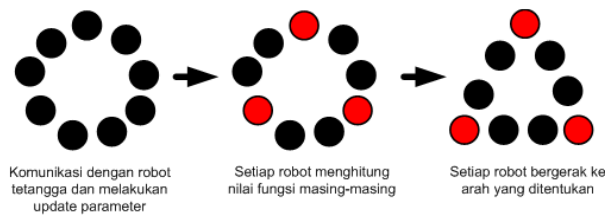
ditentukan oleh koefisien a dan b. Pada saat yang bersamaan pula propagasi inhibitor menghambat activator pada tingkat yang nilainya ditentukan oleh koefisien b dan d. Titik-titik lokalisasi dari setiap activator di generate pada interval yang sama dan tergantung pada koefisien difusi. Jika nilai D_v lebih besar dari D_u , nilai konsentrasi activator secara lokal meningkat karena dalam hal ini kecepatan dari difusi spasial inhibitor lebih besar dari yang dimiliki oleh activator. Gambar 4 memperlihatkan visualisasi grafik dari persamaan (1) dan (2) yang telah disetkan dengan koefisien yang sesuai. Terlihat pada Gambar 4a, gelombang dengan garis lurus menunjukkan nilai-nilai konsentrasi spasial dari activator, sedangkan gelombang dengan garis terputus-putus merupakan nilai-nilai konsentrasi spasial dari inhibitor.

Dalam tulisannya, Ikemoto et.al. [15] hanya menggunakan nilai konsentrasi spasial dari activator sebagai index dari function differentiation untuk pembentukan formasi poligon, yaitu dalam kasus ini, pembentukan sudut ditugaskan kepada setiap robot yang memiliki nilai maksimum konsentrasi spasial dari activator. Setiap robot secara otomatis dapat mengenali bahwa posisinya terletak di titik maksimum dengan cara membandingkan nilai konsentrasinya sendiri dengan nilai konsentrasi kedua robot tetangga yang terhubung langsung dengan dirinya. Untuk mendukung proses perbandingan tersebut, maka persamaan (1) dan (2) ditransformasikan menjadi persamaan (4) dan (5) berikut ini:

$$\Delta u_i = (au_i - bv_i) + \frac{D_u}{N^2} \cdot (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}) \quad (4)$$

$$\Delta v_i = (av_i - dv_i) + \frac{D_v}{N^2} \cdot (v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}) \quad (5)$$

dimana N adalah jumlah robot, $i=1,2,\dots,N$, dan, u_i dan v_i adalah nilai activator dan inhibitor robot ke-i.



Gambar 5 Pembentukan Formasi Segitiga

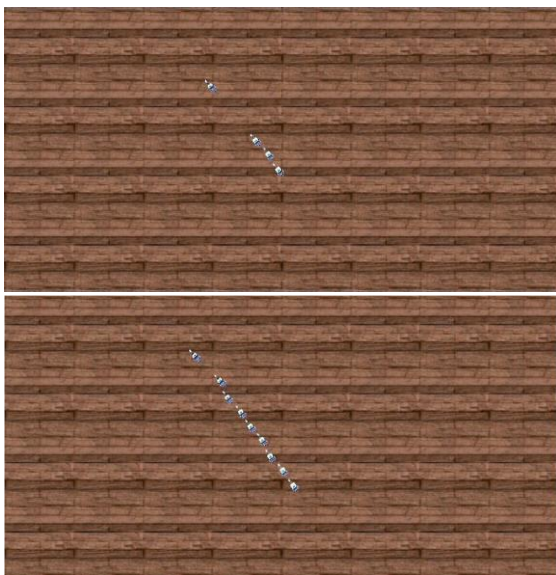
Pada Gambar 5, setiap robot saling mengkomunikasikan nilai-nilai faktor activator dan inhibitor dengan kedua tetangganya. Setiap robot yang menerima nilai faktor dari robot tetangga, selanjutnya melakukan proses update terhadap nilai faktornya sendiri menggunakan persamaan (3) dan (4). Setelah beberapa kali pengiriman, setiap robot mengirimkan pesan ke semua robot untuk menghentikan proses update. Setelah pesan diterima, setiap robot selanjutnya bergerak masuk atau keluar dari lingkaran berdasarkan nilai activator-nya (u). Jika sebuah robot memiliki nilai u yang lebih besar dibandingkan kedua robot tetangga langsungnya, maka robot tersebut berfungsi sebagai sudut dan bergerak ke luar lingkaran. Sebaliknya, robot tersebut sebagai garis dan bergerak masuk ke lingkaran. Ilustrasi pembentukan poligon segitiga dapat dilihat pada Gambar 5.

3. Percobaan, Hasil, dan Analisis

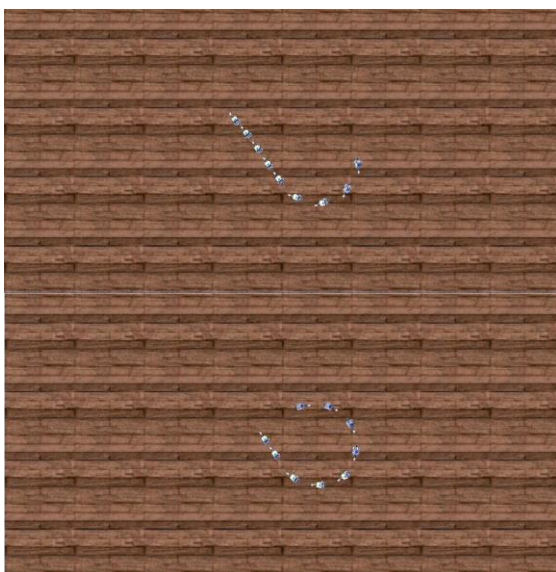
Dengan menggunakan Turing morphogenic function yang ditransformasikan oleh Ikemoto et.al, penulis melakukan simulasi pergerakan formasi pola spasial untuk 9 robot. Program simulasi dibuat dengan menggunakan Microsoft Robotics Developer Studio 2008 R3 dan Microsoft Visual C# 2008 Express Edition. Simulasi tersebut menggunakan robot Lego Mindstorms NXT. Adapun pola formasi yang dibentuk adalah segitiga. Proses pembentukan formasi segitiga dapat dilihat pada Gambar 6 (a) - (h).

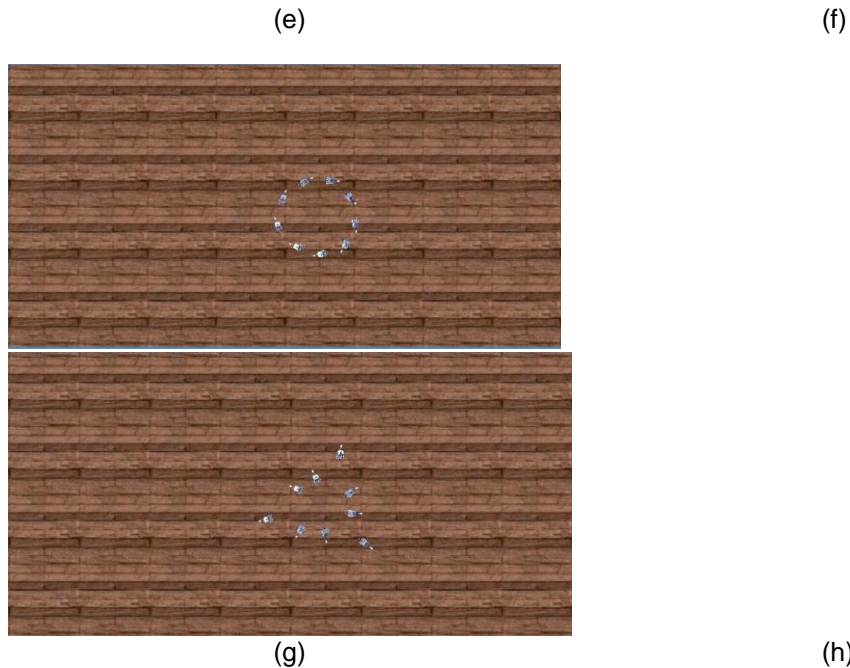


(a) (b)



(c) (d)





Gambar 6 Simulasi pembentukan formasi pola segitiga untuk 9 robot

Proses pembentukan formasi pola segitiga dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pembentukan garis lurus:
 1. Sebuah robot telah berada dalam area dan bergerak dengan kecepatan yang sangat lambat.
 2. Robot lain akan mengejar robot tersebut. Ketika posisi robot pengejar sudah mendekati robot yang dikejar, robot pengejar akan memperlambat kecepatannya hingga sama dengan kecepatan robot yang dikejar.
 3. Akan muncul robot baru yang menjadi robot pengejar berikutnya. Robot baru akan terus muncul selama jumlah robot yang telah ada belum mencapai jumlah robot yang diinginkan. Semua robot tersebut berada dalam satu garis lurus.
2. Pembentukan lingkaran:
 1. Setelah jumlah robot mencapai jumlah yang diinginkan, semua robot akan berhenti bergerak dan berusaha membentuk formasi berbentuk lingkaran.
 2. Setiap robot akan bergantian melakukan perputaran dan gerakan maju sampai semua robot membentuk formasi lingkaran.
 3. Pada saat melakukan perputaran, robot yang paling depan akan menentukan sudut putar. Sementara robot yang lain akan berputar hingga robot mengarah pada robot yang berada di depan. Perputaran robot dilakukan berlawanan arah jarum jam (CCW / counter clockwise). Besar nilai sudut putar untuk robot paling depan = $360^\circ/\text{jumlah robot}$.
 4. Pada saat melakukan gerakan maju, robot terdepan akan selalu bergerak sejauh jarak tertentu. Sementara robot lainnya akan bergerak ke posisi robot yang berada di depan. Atau dengan kata lain, robot tersebut akan mengisi posisi robot yang berada di depan.
 5. Setelah robot membentuk formasi lingkaran, semua robot akan berputar 90° ke pusat lingkaran.
3. Pembentukan formasi:
 1. Pada tahap ini, program simulasi akan melakukan perhitungan dengan menggunakan Turing morphogenic function.
 2. Iterasi akan dilakukan sampai 100 kali. Nilai activator akan menjadi nilai yang diperhitungkan untuk menentukan edge.
 3. Robot yang memiliki nilai activator (u) yang lebih besar dari robot tetangga akan menjadi edge dan bergerak mundur ke belakang. Sementara robot yang lain tidak

bergerak atau diam. Pada Gambar 6 (h) ada tiga robot yang menjadi edge sehingga membentuk formasi segitiga.

Adapun pengaturan (setting) nilai parameter yang digunakan berdasarkan Ikemoto et.al dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Setting nilai parameter menurut Ikemoto et.al untuk membentuk formasi pola

Formasi Pola	Parameter					
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	D_u / N^2	D_v / N^2
Segitiga (<i>triangle</i>)	0,52	0,60	0,60	0,73	0,03	0,05

4. Kesimpulan

Dengan menerapkan persamaan Turing morphogenetic function, penulis membentuk formasi pola spasial pada sejumlah robot koloni dengan menggunakan program simulasi Microsoft Robotics Developer Studio. Adapun formasi pola yang dibentuk adalah pola segitiga untuk 9 robot. Kumpulan robot mula-mula membentuk garis lurus, kemudian berputar membentuk lingkaran, dan akhirnya membentuk formasi pola segitiga. Untuk selanjutnya, penulis akan mencoba membentuk formasi pola segiempat dan formasi poligon.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung oleh Lembaga Penelitian & Publikasi Ilmiah (LPPI) Universitas Tarumanagara melalui program Hibah Internal 2011.

Referensi

[1] Wikipedia, Robot, <http://en.wikipedia.org/wiki/Robot>, akses 1 Februari 2009.

[2] Kunkel, T., Hardware Architecture of a Swarm of Robots, Master Thesis, Department of Electrical Engineering, University of Wyoming, December 2006, http://www.cs.uwyo.edu/~wspears/maxelbot/Tom_Final_Writeup.pdf, akses 22 Maret 2009.

[3] Hawick, K.A., et.al, An Architecture for Swarm Robots, Technical Report DHPC-121, <http://www.dhpc.adelaide.edu.au/reports/121/dhpc-121.pdf>, akses 22 Maret 2009.

[4] Rigatos, G.G., Multi-Robot Motion Planning Using Swarm Intelligence, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 5, No. 2, 2008.

[5] Spears, W.M., Spears, D.F., An Overview of Physicomimetics, <http://stinet.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA478575&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf>, akses 22 Maret 2009.

[6] H. Bojinov, A. Casal, T. Hogg, Emergent Structures in Modular Self-Reconfigurable Robots, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 2, 2000, pp. 1734–1741.

[7] N. Inou, H. Kobayashi, M. Koseki, Development of Pneumatic Cellular Robots Forming A Mechanical Structure, Proceedings of International Conference on Control Automation, Robotics And Vision (ICARCV), (CD-ROM, Paper ID 1457), 2002, pp. 63–68.

[8] H. Yamaguchi, T. Arai, G. Beni, A Distributed Control Scheme for Multiple Robotic Vehicles to Make Group Formations, Robotics and Autonomous Systems Vol. 36, 2001, pp. 125–147.

[9] Feddema, J., Lewis, C., Klarer, P., Control of Multiple Robotic Sentry Vehicles, Proceedings of SPIE Vol. 3693, Unmanned Ground Vehicle Technology, Orlando, 1999.

[10] Stoy, K., Shen, W.M., Will, P., How to Make a Self-Reconfigurable Robot Run, AAMAS Bologna, Italy, 2002, <http://www.isi.edu/robots/prl/stoy2002how-to-make-a-self-reconfigurable-robot-run.pdf>, akses 22 Maret 2009.

[11] Young, B.J., Lawton, J.R., Beard, R.W., Feedback Control for Robot Formation Maneuvers, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.45.9827>, akses 22 Maret 2009.

[12] A. Castano, A. Behar, P.M. Will, The Conro Modules for Reconfigurable Robots, ASME Transactions on Mechatronics Vol. 7, No. 4, 2002, pp. 403–409.

[13] Z. Butler, R. Fitch, D. Rus, Distributed Control for Unit-Compressible Robots: Goalrecognition, Locomotion, and Splitting, ASME Transactions on Mechatronics Vol. 7, No. 4, 2002, pp. 418–430.

[14] M. Yim, et.al, Connecting and Disconnecting for Chain Self-Reconfiguration with Polybot, ASME Transactions on Mechatronics Vol. 7, No. 4, 2002, pp. 442-451. Y. Ikemoto, et.al, Gradual Spatial Pattern Formation of Homogeneous Robot Group, International Journal of Information Sciences (ELSEVIER), 2004, pp. 431 – 445.