

Revisão de Métodos de Formação de Swarms Utilizando Morfogênese

André L. Braga*, Ronaldo R. Goldschmidt, Paulo F. F. Rosa
Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80, Praia Vermelha,
Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 222290-290
andre.luiz.braga@ime.eb.br

RESUMO: A Morfogênese é o processo de crescimento dos seres vivos a partir de células individuais. Ela tem sido bastante inspiradora para criação de algoritmos para o controle de coletividade de agentes. A Pesquisa nessa área começou com o primeiro modelo desenvolvido por Alan Turing em 1952 e seguiu diferentes caminhos até hoje. Uma das suas principais funções é como especificar uma formação para um conjunto de agentes de um enxame. Algumas formas são bem simples, como círculos, mas podem ser bastante complexas para uma área indefinida qualquer. Este trabalho apresenta uma revisão sobre os diferentes métodos de aplicação desse paradigma na formação de enxames de agentes, assim como uma perspectiva evolutiva histórica das abordagens.

PALAVRAS-CHAVE: Morfogênese, Enxames Robóticos, Formação de Enxames

ABSTRACT: The Morphogenesis is a living being growth process from individuals cells. It has been very inspirational to create algorithms that control agent's collectives. The research on this area has begun in the first model created by Alan Turing in 1952 and followed different directions until the present. One of the key question is specify any formation to a set of a swarm agents. Some shapes are very simple, such as circles or very complex to a undefined random area. This paper presents a review about diferente applications of this paradigm in the formation of swarm agents, as well as a historical evolutionary perspective of those approaches.

KEYWORDS: Morphogenesis, Robotic Swarms, Shape Formation

1. INTRODUÇÃO

A Morfogênese é um dos mais intrigantes processos biológicos na natureza. Ela descreve como células individuais, sem qualquer informação de posicionamento global, são capazes de se auto-organizar e construir, de forma robusta, uma determinada estrutura. A análise deste processo levanta várias possíveis soluções para controle de coletividade de agentes, tais como robôs terrestres e aéreos.

Além disso, ela pode trazer aos algoritmos as mesmas capacidades biológicas de robustez, precisão e independência de referências posicionais globais, de modo que, a mesma forma pode ser produzida em diferentes escalas transparentemente dependendo do número de agentes disponíveis [43].

Houve várias abordagens aplicando Morfogênese a *Swarm* de robôs desde a sua mais aceita modelagem matemática proposta por Alan Turing em 1952 [81]. Um dos problemas é que o paradigma vem sendo usado com diferentes perspectivas e em alguns casos por mera analogia e não explorando realmente o modelo. Porém, a questão que é menos exposta são os detalhes de como especificar a forma final desejada do *Swarm* e, na maioria das vezes, temos apenas simulações em softwares matemáticos como o MATLAB [51].

A terceira questão que restringe o avanço das pesquisas é a falta de um código aberto flexível e amigável para que se possa simular as múltiplas versões dos algoritmos. A maioria dos projetos foi abandonada ou descontinuada. Por último, não houve muitos

avanços em aplicar morfogênese especificamente em *Swarms* Aéreos Autônomos [53]. As abordagens mais próximas são formações em ambiente aquático [77, 79] ou Nano robótica [21], onde o modelo se adequa à forma mais próxima.

A fim de cobrir todas estas questões que levantamos, nosso primeiro passo será uma revisão histórica profunda de todas as abordagens para fazer uma especificação sólida para a formação de *Swarms* e também uma arquitetura padrão baseada em morfogênese para sistemas robóticos mais complexos.

Na próxima seção, descrevemos os conceitos básicos de morfogênese, como eles têm sido aplicados nas diversas áreas interdisciplinares e, na seção 3 a evolução histórica das suas abordagens em aplicações robóticas. A seção 4 apresenta uma revisão de todos os métodos para definição da formação dos *Swarms* com foco e inspiração no paradigma de morfogênese. Na seção 5 mostramos algumas propostas de arquitetura para o conter a implementação de algoritmos de formação utilizando morfogênese e finalmente, na seção 6 resumimos as contribuições desse trabalho e referências.

2. MORFOGÊNESE

2.1 Conceitos

A Morfogênese é o processo biológico [71, 81] a partir do qual células individuais se reproduzem criando macroestruturas

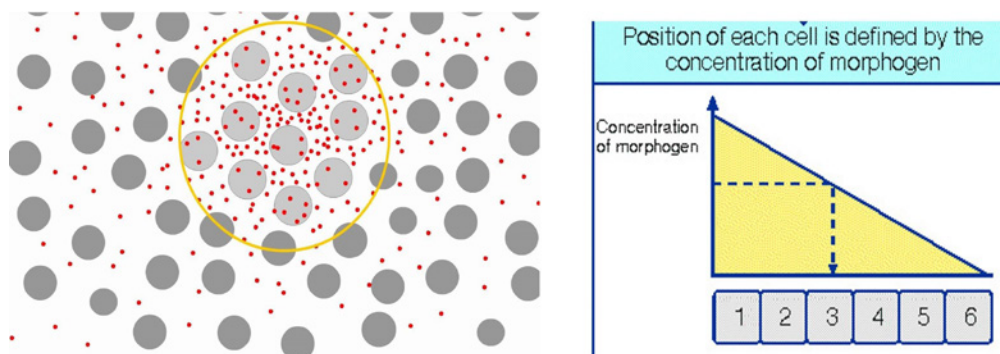


Fig. 1 - Informação posicional dada pelos Morfogêns

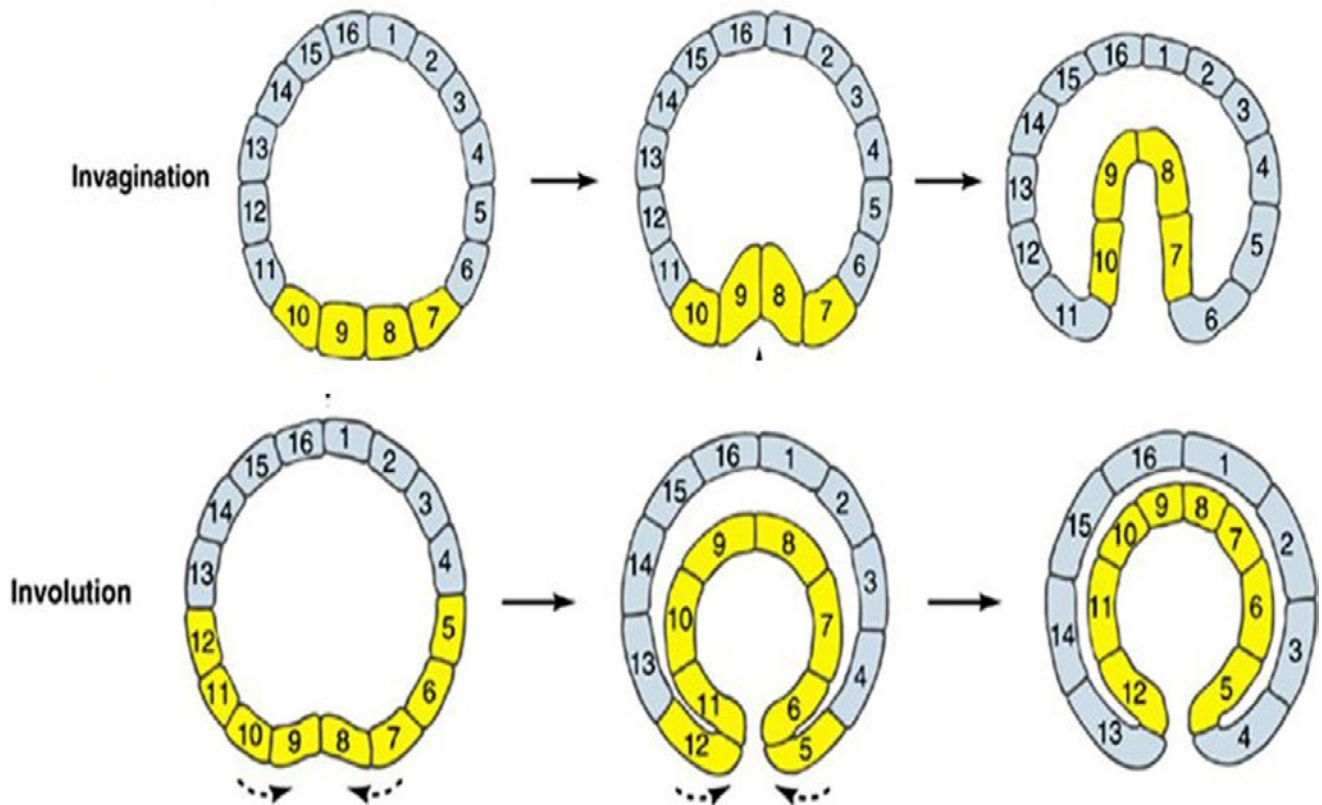


Fig. 2 - Modelo morfogênico posicional

[9] em organismos multicelulares [24] e seres vivos [37]. Desde o primeiro modelo de Turing em 1952, houve muitos estudos tanto para entender este processo quanto para usar seus princípios nas áreas de computação.

A explicação mais usual deste processo [17, 29, 39, 48] (Fig. 1) é a ideia que um certo elemento químico, no caso uma proteína (P), também chamada de *Morfogên*, se propaga a partir de algumas células para sua vizinhança e sua difusão de concentração de P, variando de valor a partir da fonte original, irá se traduzir na informação posicional.

Digamos, por exemplo, que alguma célula inicial tenha a concentração de $P=100$ (Fig. 3) e quando ela passa ao seu vizinho, o valor decresce para 90 e assim por diante. Se olharmos a taxa de declínio de P como o gradiente de P em alguma direção, digamos "X", teremos um sistema de coordenadas relativas totalmente independente do mundo real. Nos sistemas biológicos isto é absolutamente necessário, uma vez que não existe nenhum meio de auto posicionamento global. Esta característica do paradigma é justamente o que nos permite criar algoritmos para *Swarms* capazes de posicionamento autônomo totalmente a parte de referências externas.

A Fig. 2 mostra um exemplo de como um embrião começa sua formação inicial. O código interno definido pelo DNA produz novas células de acordo com a posição relativa especificada pela concentração do seu Morfogên.

Este conceito é útil para o entendimento do princípio básico da morfogênese, ou seja, o posicionamento por gradiente, mas não suficiente se queremos construir um modelo funcional e algoritmos para controle de um *Swarm*.

Se estendermos a ideia de que tipos diferentes de Mor-

fogêns definem cada dimensão espacial, (ex. X), ainda teríamos um problema: Se cada célula não tem orientação espacial global, como ela saberia em que direção propagar cada Morfogên?

Este é o mesmo problema enfrentado por *Swarms* de agentes robóticos sem nenhum sistema de posicionamento global. Na verdade, um sistema de orientação principal de coordenadas deve ser criado. Os sistemas biológicos o criam implicitamente. A interação entre as células, quando propagando os Morfogêns, funciona através de oscilações realimentadas de reação e difusão. Basicamente, a proteína "P" que representa o Morfogên, propaga para sua vizinhança e estimula a criação de outro elemento "G" (que de fato corresponde aos RNAs) e que regula a produção da proteína "P" além da difusão propagada de volta para a célula original e suas vizinhas. A propagação de retorno inibe a continuação da produção e este efeito vai criando um padrão de oscilação de um ponto de vista macro celular que vai decaindo o valor dos Morfogêns em um processo denominado "Modelo de Reação-Difusão" [39].

Até este ponto temos um mecanismo estável que reforça o decaimento consistente do gradiente dos Morfogêns (através do domínio da frequência) com robustez na sua relação com o posicionamento, mas pode-se perceber que em tal modelo a propagação estaria constante em todas as direções, portanto eixos direcionais não seriam criados.

A Fig. 3 mostra como isso ocorre. As "Ondas" de propagação de Morfogêns são naturalmente suscetíveis a pequenas perturbações, já que no universo real, o decaimento do gradiente não são funções discretas. Uma dessas perturbações estimula uma maior propagação em certa direção e a partir dali o mecanismo de reação-

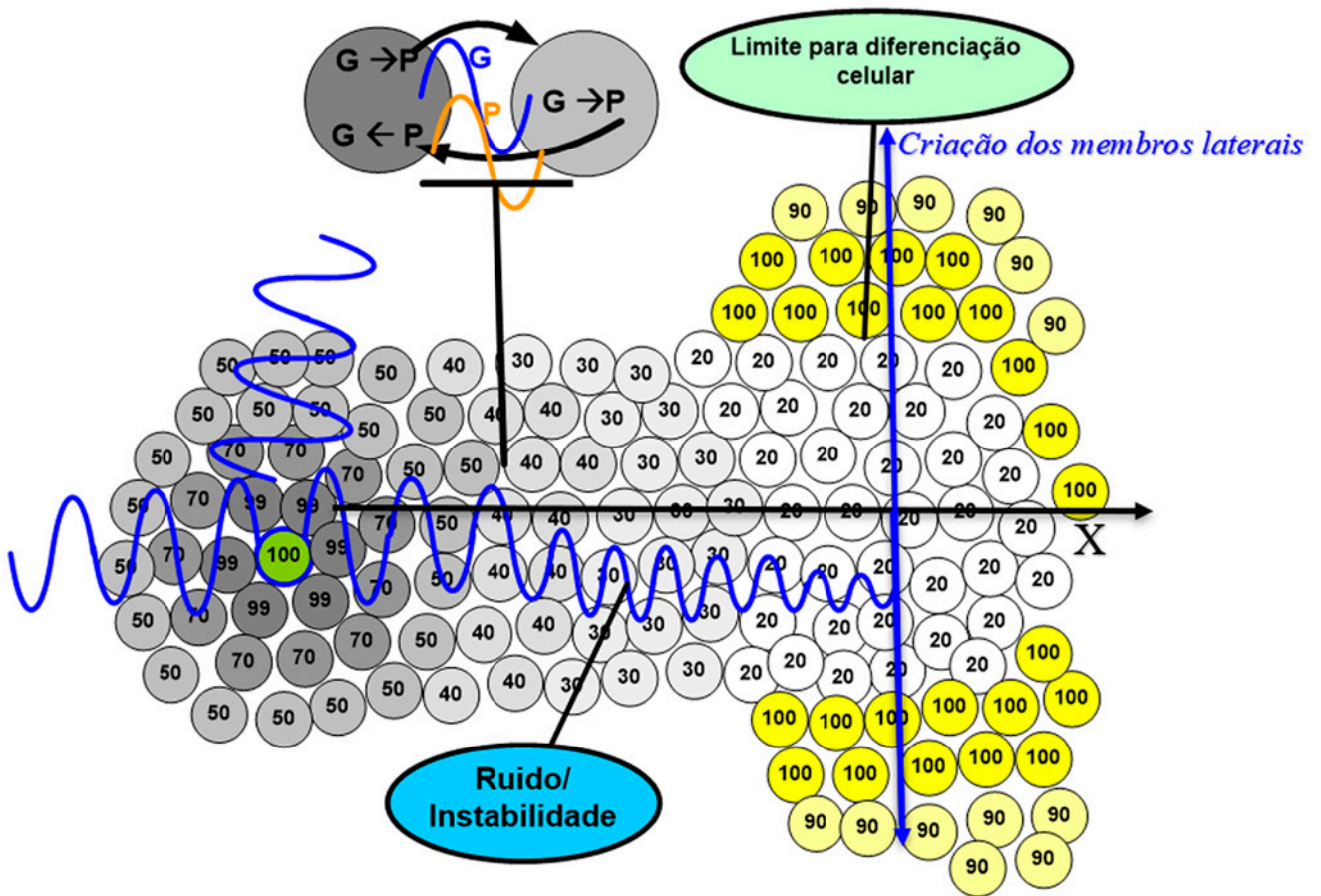


Fig. 3 - Conceito de reação-difusão de Morfogêns

difusão reforça o crescimento do conjunto naquela direção, criando um “eixo” que quebra o crescimento simétrico da “bolha” formando uma estrutura cilíndrica. A partir desse ponto, a diferenciação ou novos tipos de células são criadas além de “tentáculos” em outras direções de acordo com o nível de concentração dos Morfogêns. Na Fig. 3, podemos ver, por exemplo que ao atingir o limite mais baixo na extremidade, as células começam a se propagar ortogonalmente formando membros laterais. Contudo, como pode se observar, com a falta de um sistema global de controle, os membros se formam igualmente em cada lado, o que explica a constante bilateralidade ou simetria da maioria das estruturas biológicas. Podemos ver outros exemplos deste processo explicados em [11, 27, 71].

O modelo matemático e computacional da Morfogênese é bastante similar ao de autômatos celulares multidimensionais [3, 26, 85], onde, no nosso caso, o DNA age como a regra que troca o estado de cada célula dependendo do valor dos Morfogêns de seus vizinhos, neste caso é claro, de forma analógica. Não encontramos estudos nesta direção na área de Engenharia Morfogênica.

As equações (1) e (2) a seguir evoluíram do modelo original de Turing [81] expressando através de um sistema de equações diferenciais o processo oscilatório já descrito. A equação (3), ou seja H_s , expressa a forma desejada do *Swarm* regulando o decaimento do gradiente dos Morfogêns (G e P) de acordo com as coordenadas que eles representam e f_i é uma função sigmoide usada para normalização. Este modelo computacional assume um sistema de coordenadas fornecido o que em reais sistemas biológicos é formado em paralelo com o processo de Morfogênese.

$$\frac{dG_v}{dt} = mP_v - a \frac{\partial H_s(G)}{\partial G_v}, v = x, y, z \dots \quad (1)$$

$$\frac{dP_v}{dt} = -cP_v - kf_l \left(\frac{\partial H_s(G)}{\partial G_v} \right), v = x, y, z \dots \quad (2)$$

$$H_s(G) = H_s(G_x, G_y, G_z, \dots) \quad (3)$$

2.1 Abordagens

Modelos Biológicos – Os fundamentos desta área fornecem uma forte base para modelagem robótica de *Swarms* aéreos dado que sistemas biológicos crescem na maioria em ambientes líquidos onde nenhum sistema de posição global e muito pouca capacidade de sensoriamento e comunicação.

Os modelos computacionais ainda se baseiam nas equações originais de reação e difusão [81] até chegar a implementações mais sólidas em 2012 [25, 71]. Este campo interdisciplinar foca em determinar os detalhes de como a informação posicional [37] se conecta com a topologia das formas criadas [24, 27, 43], diferenciação celular e simetria.

Existem algumas implementações [9] somente criadas com o propósito de revelar os mistérios do processo, mas o que torna o problema mais complexo é que muitos outros mecanismos heterogêneos operam em células reais [3] e muitos modelos tem sido propostos focando em diferentes níveis [42], desde o molecular até tecidos.

Vida Artificial – Os modelos computacionais não só nos ajudam a entender o processo da morfogênese, mas permitem pesquisadores irem um passo à frente e analisar possíveis

novas morfologias através da manipulação dos parâmetros do sistema [11, 34, 68, 74]. Estes modelos podem explicar detalhes da evolução das espécies assim como criar sistemas autoreparáveis.

Robótica – A aplicação do paradigma de morfogênese em robótica se tornou tão popular que em 2011 surge o termo “Robótica Morfogênica” [12, 32, 46] e tem sido explorado em diversas perspectivas desde então [59], as quais nem sempre usam o conceito completo do paradigma, mas partes dele, e até considerado simplesmente quando uma coletividade de agentes robóticos autônomos tem a capacidade de se auto integrar em alguma macro estrutura [54]. Na próxima seção veremos a evolução histórica da morfogênese na robótica.

3. REVISÃO DA ROBÓTICA MORFOGENÉTICA

3.1 Perspectiva Histórica

O modelo matemático da Morfogênese [81] se tornou um paradigma muito interessante para o controle de agentes robóticos. Em 2011, surgiram os primeiros artigos com o nome “Robótica Morfogênica” [32] que mais tarde se consolidou como um campo da engenharia [12, 30]. A **Tabela 1** resume as principais abordagens nessa área, as quais evoluíram em objetivos paralelos. A primeira apenas se inspira em mode-

lagem e conceitos do paradigma, como por exemplo, a ideia de que coletividades de robôs podem construir formas ou mesmo montar macroestruturas através da união de robôs individuais, como blocos de construção. A abordagem destes artigos apresenta algoritmos ou modelos genéricos apenas para casos particulares.

A segunda abordagem usa o gradiente morfogênico como forma de definição de coordenadas e a partir das quais se aplicam algoritmos de geometria computacional conhecidos. As últimas duas abordagens focam no mecanismo de reação-difusão real, mas uma delas aplica a enxame de *Swarms* densos e a outra em agentes coletivos dispersos.

3.2 Direções da Pesquisa

Fundamentos – Apesar do trabalho fundamental em morfogênese ter começado em 1952[81], como observa-se na **Tabela 1**, apenas em Mamei 2004[48], vemos um trabalho mais sólido na aplicação do paradigma em *Swarms*. Ele levanta os seguintes importantes elementos:

- 1) Eleição de Líder – Necessário para definir o ponto de início para o sistema de coordenadas e propagação dos Morfogêns.
- 2) Seleção de Região – Define a região de propagação do Morfogên.

Tabela 1: Perspectiva histórica das abordagens morfogênicas

Ano	Fundamentos	Geometria Computacional	Modelo de SWARM	Rede Regulatória de Genes
1952	(Turing, 1952)			
2004		(Mamei, Vasirani, & Zambonelli, 2004)		(Timothy Taylor, 2004)
2005			(Ostergaard et al., 2005)	(Stewart, Taylor, & Konidaris, 2005)
2007				(Tim Taylor, Ottery, & Hallam, 2007)
2008		(A. O'Grady & Dorigo, 2008)		(Sendhoff, 2008)
2009			(R. O'Grady, Christensen, & Dorigo, 2009)	(Guo, Meng, & Jin, 2009) (Jin, Guo, & Meng, 2009)
2010	(Kondo & Miura, 2010)	(Sayama, 2010)	(Sayama, 2010) (Yeom & Park, 2010)	(Guo, Meng, & Jin, 2010)
2011		(C. Barca & Sekercioglu, 2011)		(Guo, Meng, & Jin, 2011)
2012	(Setty, Cohen, & Harel, 2012)		(Doursat, Sánchez, Dordea, Fourquet, & Kowaliw, 2012)	(Guo, Jin, & Meng, 2012) (Meng & Guo, 2012)
2013	(Eiben et al., 2013)	(J. C. Barca, Lee, & Sekercioglu, 2013)		(Meng, Guo, & Jin, 2013) (Jin & Oh, 2013)
2014			(Ramezan Shirazi, Oh, & Jin, 2014)	(Oh & Jin, 2014a) (Oh & Jin, 2014b)
2015		(Yang, Ding, Jin, & Hao, 2015; Yu & Barca, 2015)		
2016	(Estepa, Erasso, & Avilés S, 2016)		(Jansson et al., 2015) (Oh, Shiraz, & Jin, 2016)	
2017	(Oh, Ramezan Shirazi, Sun, & Jin, 2017)	(Oh et al., 2017)	(Oh et al., 2017)	(Oh et al., 2017)

- 3) Sistema de Coordenadas – É necessário que os Morfogêns se ancorem em pontos de referência, como faróis para estabelecer um sistema ortogonal para cada dimensão de propagação.
- 4) Padronização – Criação de padrões baseados na definição da formação.
- 5) Comunicação – O gradiente dos Morfogêns pode ser usado para transmitir mensagens entre os agentes.
- 6) Morfogêns adaptativos – Os Morfogêns vão mudando ao longo de sua propagação mudando o comportamento dos agentes.

Geometria Computacional – O modo mais simples de especificar a formação de um *Swarm* é combinando algoritmos geométricos conhecidos e suas propriedades. Por exemplo, se desejarmos criar círculos, nós apenas precisamos inserir uma restrição de distância “R” que todos os agentes devem manter de um certo ponto. O primeiro algoritmo usando este paradigma [48] usa a ideia de posições relativas traduzidas para o gradiente dos Morfogêns. A Fig. 4 apresenta um dos vários algoritmos para formações circulares usando tipos diferentes de Morfogêns para focar a densidade do *Swarm* a um certo raio. Outras abordagens basicamente criam funções de manipulação geométrica [54, 55] deixando a especificação da forma para o projetista do sistema, como no trabalho de Barca et al, desde 2011[4–6, 86] pois eles simplesmente movem agentes líderes para os pontos alvos da forma desejada e agentes seguidores preenchem os espaços restantes. Apesar de pragmática, essa abordagem não é tão robusta. Mais tarde, em [84] a captura de alvos e a construção de sistemas de coordenadas através de diagramas de *Voronoi* é incorporada.

```

if particle == BARYCENTER
  injectGradient(CIRCLE)
end if
while(1)
  if getGradient(CIRCLE).value > R
    moveDownhill(CIRCLE)
  end if
end while

```

Fig. 4 - Algoritmo simplificado para criação de círculos [48]

Modelos de Swarm – Esta é uma linha que se aplica a sistemas com alto número de agentes com grande densidade. O paradigma de morfogênese foi originado naturalmente deste tipo de abordagem o que o torna mais adequado para o uso em *Swarms* robóticos [15]. Estes foram os primeiros modelos aplicados a sistemas robóticos subaquáticos [62, 74, 77] e as pesquisas nesta direção vêm utilizando *Swarms* para cooperação e montagem de macroestruturas [55]. A coesão do movimento dos *Swarms* [66] e as técnicas de autômatos celulares [85] são capazes de criar comportamentos autônomos complexos. A variação da densidade do *Swarm*, por exemplo, é capaz de criar uma referência global para todo o sistema [65]. O modelo formal do gradiente de difusão da morfogênese [11] é usado para manter o *Swarm* agregado enquanto se movimenta identificando bordas, desvio de obstáculos e captura de alvos.

A ideia básica é usar os Morfogêns como um “Token” que é passado através do *Swarm* e modificando seu valor dependendo das suas condições de vizinhança, por exemplo, se uma célula não recebe o mesmo “Token” de todos os vizinhos, então isso indicará a borda do *Swarm*. Até o momento, o paradigma só foi aplicado a sistemas robóticos terrestres [28, 60].

Redes Regulatórias de Genes (GRNx) – O conceito fundamental da morfogênese, além de traduzir posição real em gradiente dos Morfogêns, diferente das abordagens de Geometria Computacional, onde temos algoritmos geométricos explícitos, é o mecanismo de reação e difusão dos Morfogêns entre as células que é disparado pelo controle da célula (Ou seus Genes) que cria um sistema oscilatório que move as células ou agentes na direção da forma desejada, a qual é definida pelo gradiente da função que especifica a formação do *Swarm*. A rede que expressa o relacionamento entre os genes e a produção dos Morfogêns de cada célula foi denominada “Rede Regulatória de Genes” (Gene Regulatory Network = GRN) e é amplamente aplicado a *Swarms* [40, 56–58, 74, 79].

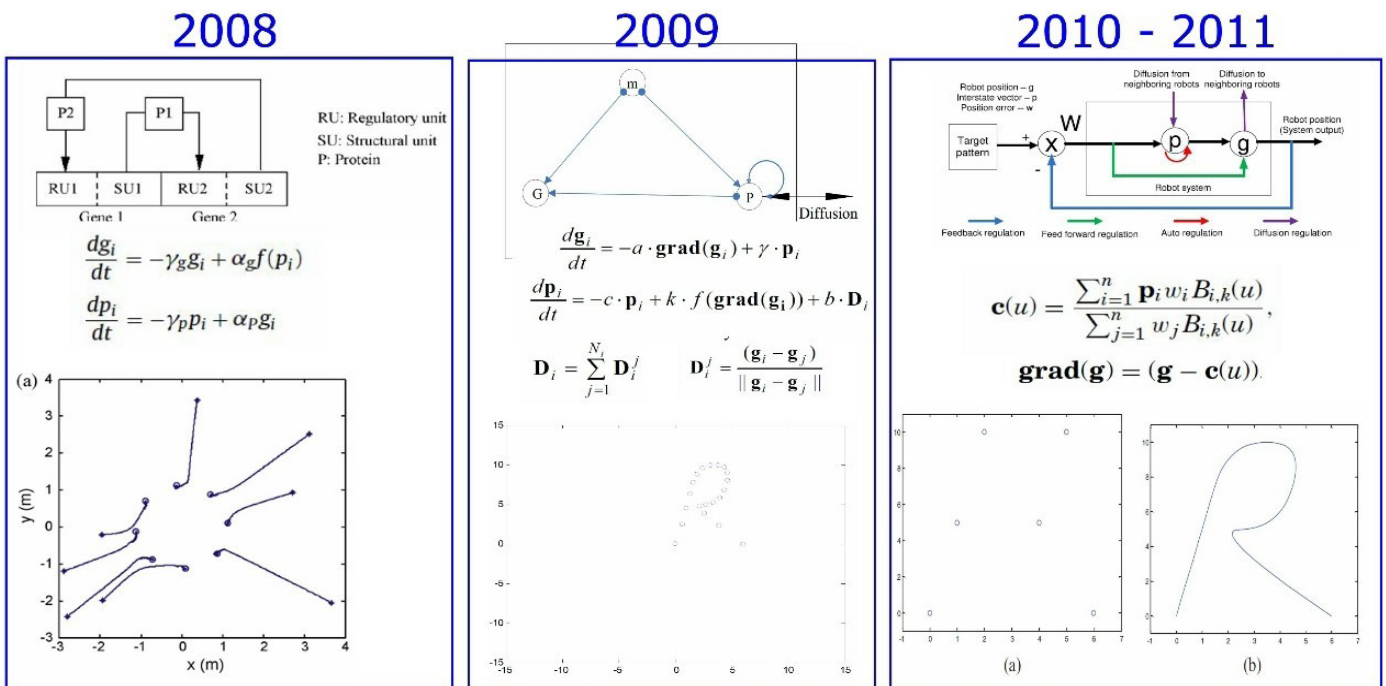


Fig. 5 - Evolução histórica da formulação matemática das abordagens em Redes Regulatória de Genes (1)

Um dos trabalhos mais bem sucedidos na área utiliza CAM¹ em conjunto com o modelo GRN [74, 77, 78], apesar do contato denso e alto número de agentes não ser realmente necessário, o grupo líder nessa área, iniciando em 2008 [74, 77, 78] (Fig. 5), demonstra várias simulações com formas padrão simples, tal como círculos e elipses [33] e outras formas que podem ser expressas em forma analítica.

As formas com formato livre podem ser expressas por uma combinação de múltiplas funções, mas este método não é muito prático e dificulta provas de convergência. A aplicação de NURBS [63] é uma solução para estas questões [17, 19, 20]. Neste modelo, o desvio de obstáculos pode inclusive ser incorporado ao algoritmo diretamente como um fator que aumenta ou diminui a velocidade dependendo da proximidade com outros agentes [18, 31]

Uma outra abordagem utiliza redes (chamadas “*motifs*”) de elementos para criar a função gradiente de reação-difusão. As primeiras tentativas, apenas em simulações, criam formas arbitrárias para se encaixar no ambiente (2012 na Fig. 6) [50] e recebendo informações de alvos a serem capturados pela forma [51]. Esta foi a primeira simulação tridimensional e real implementação em duas dimensões. Os trabalhos seguintes incluíram os dados dos obstáculos como entrada da rede e algoritmos genéticos treinamentos das redes [56, 57]. Esta abordagem cobre a maioria dos problemas, mas não constrói formas específicas, mas arbitrariamente de acordo com as necessidades de captura e desvio de obstáculos. Além disso, ainda não implementada em protótipos aéreos tridimensional [59]

4. MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE FORMA

4.1 Sistemas de Coordenadas

Sistemas de Coordenadas – A autolocalização dos sistemas biológicos se baseia em algumas características im-

plicitas que não existem nos sistemas robóticos em geral. A principal delas é o ambiente de interação físico entre as células. Agentes robóticos [38] não se “tocam”, como células biológicas ou nos modelos de Swarms [11, 19], portanto, este é um mecanismo fundamental que precisa ser simulado para que alguma forma de informação posicional seja inserida no sistema. Os GPSs² consomem muita energia e não funcionam em ambientes fechados.

Existem vários métodos para definir sistemas de coordenadas [10, 17, 19, 20, 35, 80, 83], a maioria deles requer a identificação de pontos de referência [11, 17, 19] dentro do *Swarm* e garantir que eles pertençam ou sejam relacionados à formação do *Swarm*. Eles são submetidos a processos de triangulação [10, 35, 73, 76] que irão definir as coordenadas para todos os agentes dentro de um sistema ortogonal.

4.2 Tipos de Formas

Formatos Geométricos Padrão - Existem várias abordagens para especificação de formatos padrão, como círculos ou linhas retas [5, 10, 69, 86], a mais usual é definir “pontos-alvo” dentro do formato e calcular as trajetórias ótimas até estes pontos [5, 10].

Os métodos mais complexos e gerais podem criar tanto os formatos padrão quanto os formatos livres, mas a um custo computacional mais alto e mais questões a serem observadas, como colisões, por outro lado, há métodos que criam formas através da combinação de um par de funções analíticas e algoritmos bastante simples.

Mamei et. al, 2004 [48] usam a ideia de Morfogên como um “token” que é espalhado pelo *Swarm* para criar círculos, anéis e lóbulos. Barca [4, 5] simplesmente identifica “Pontos Alvo” na formação desejada e move os agentes para estes pontos e os seguidores preenchem os espaços para completar a forma. As formas padrão também podem ser criadas através de “Redes Reguladoras Genéticas” (ou GRN) [18, 31, 33] através da especificação das funções analíticas no modelo GRN como explicaremos melhor adiante.

¹ Cohesion Adhesion Model (Modelo de Coesão-Adesão)

² Global Positioning Systems – Sistemas de Posicionamento Global

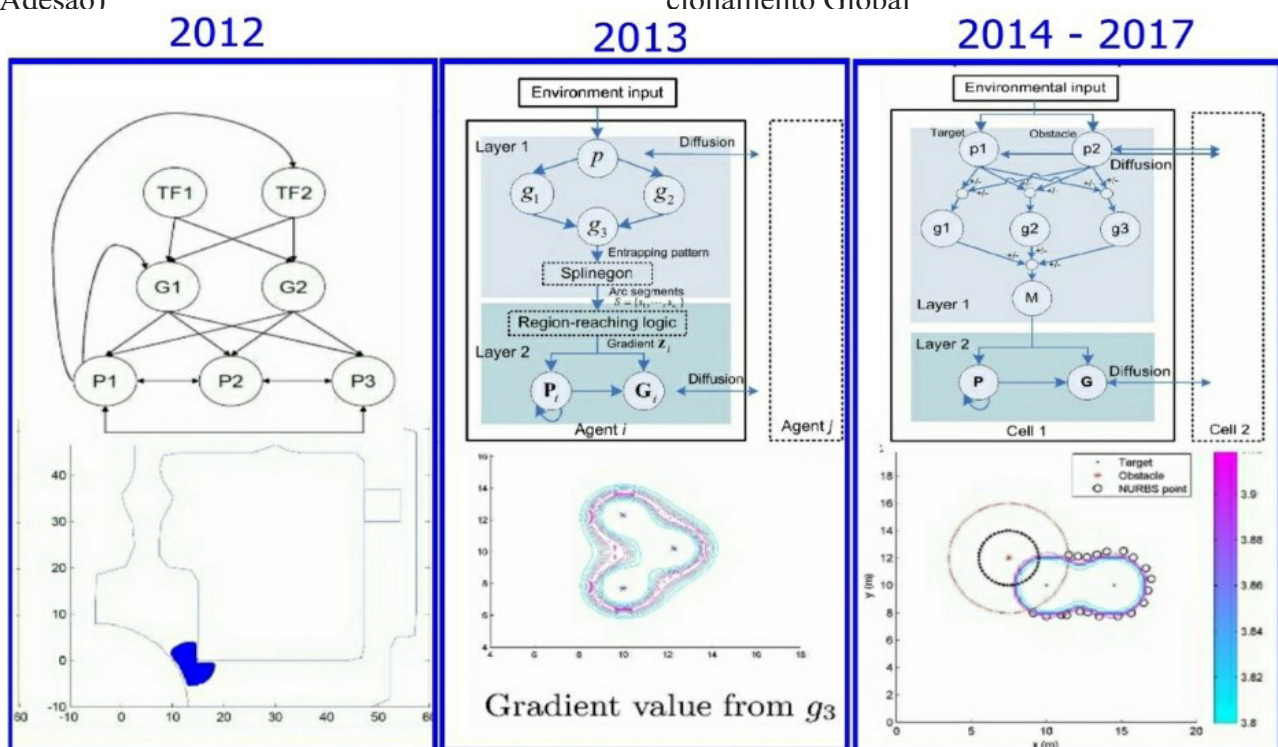


Fig. 6 - Evolução histórica da formulação matemática das abordagens em Redes Regulatória de Genes(2)

Formas Geométricas Não-Padronizadas – Existem algumas soluções especiais para formas não tão comuns, como polígonos através da criação de “lóbulos” como vértices em um *Swarm* [48] (Fig. 7), por outro lado a abordagem através de GRNs se torna simples se pudermos subdividir os polígonos em formas mais básicas [31, 33].

Formas Livres – A primeira das três abordagens mais comuns é definir o formato através de pontos alvo [5] para todos os agentes ou para um líder que será seguido. Isto é bastante simples e de baixo custo computacional, mas não muito eficiente e explora o potencial do *Swarm*. A segunda é basicamente construir um algoritmo geométrico Ad Hoc para a forma desejada [4, 36, 48, 52, 85, 86]. Esta não é uma boa solução geral e pode ser que não exista algoritmo determinístico para uma certa forma livre qualquer. A terceira abordagem exploraria completamente o paradigma de Morfogênese sendo capaz de criar qualquer forma, mesmo os “padrões” adicionando a função gradiente da forma analiticamente [18, 31, 33] ou em partes usando NURBS³[63]. A utilização de NURBS não é mandatória, mas permite simples prova de convergência do algoritmo. O trabalho de Yaochu Jin [17–20, 29, 31–33, 51, 56, 57, 59, 60, 65] tem evoluído basicamente nesta direção por muitos anos, mas não saindo muito dos limites das simulações matemáticas e sem uma explicação clara da reconciliação da implementação do algoritmo com a determinação do sistema de coordenadas.

4.3 Abordagem de Implementação

As GRNs, como mostradas nas equações (1), (2) e (3) e detalhadas no modelo geral em [47] seriam implementadas através dos seguintes passos:

1) Calcular o sistema de coordenadas e atribuir os valores

³ Non-Uniform Rational B-Splines

expressos pelo elemento G_v a cada dimensão do sistema de coordenadas $v = x, y, z, \dots$

- 2) Calcular a velocidade P_v para mover a célula robótica em cada dimensão v de acordo com a equação (4): A velocidade decai a cada iteração por $(1 - c.P_v)$ para cada dimensão, de tal forma que o sistema se estabilize. Da mesma forma a velocidade pode aumentar ou diminuir, dependendo do gradiente da função que representa a forma alvo, ou seja, se a célula está próxima da função definida por $H_s(G)$, o gradiente vai adicionar velocidade (ou diminuir, se em sentido oposto), de tal forma que tende a zero exatamente e na função da forma-alvo. Por fim, o fator $b.D_v t$ é responsável por evitar colisões entre os agentes alterando a velocidade no sentido que se aproxima de outros agentes.

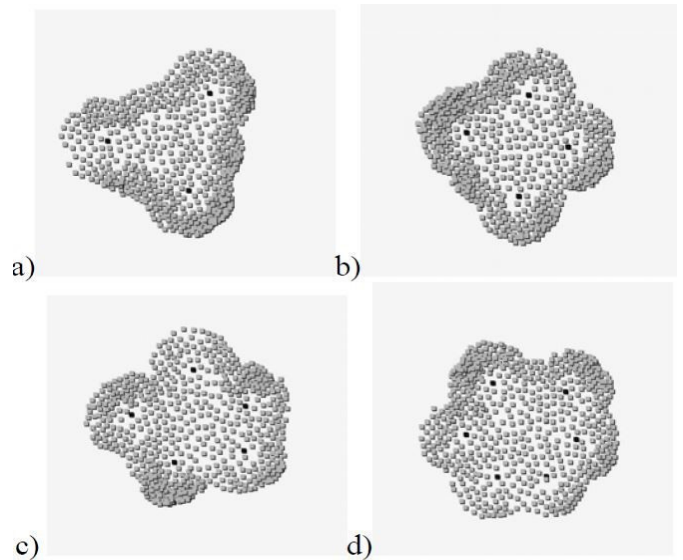


Fig. 7. Formação de polígonos através de lóbulos densos [48]

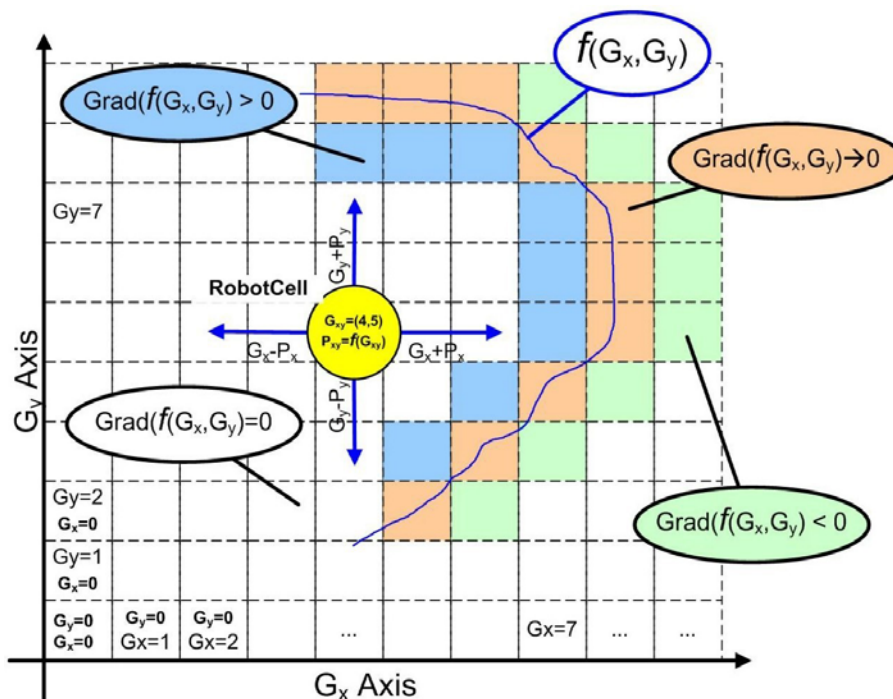


Fig. 8 - Movimento individual de agentes robóticos utilizando Redes Regulatórias de Genes

$$P_v(t+1) = -c.P_v(t) - k.f\left(\frac{\partial H_s(G(t))}{\partial G_v(t)}\right) + b.D_v(t) \quad (4)$$

$$v = x, y, z \dots \quad (5)$$

Uma vez que a velocidade expressa por “P” tenha sido calculada (em passos ou outra unidade que expresse a posição em G_v), ela é adicionada à dimensão correspondente, como na equação (6)

$$G_v(t+1) = m.P_v(t) - a\frac{\partial H_s(G(t))}{\partial G_v(t)} \quad (7)$$

Note que o gradiente também participa no ajuste à posição, sutilmente: Os lugares muito longes da função alvo não geram influência, dado que o gradiente é zero, mas quando chega próximo, ele aumenta, chega ao máximo e volta a zero exatamente sobre a função alvo.

A **Fig. 8** mostra o funcionamento dos passos acima para uma grade bi-dimensional onde cada coordenada sobrepõe a posição relativa expressa por G_v e a velocidade P_v . “Grad($f(G_x, G_y)$)” representa o gradiente da função de forma H_s como mostrada na equação (6)

Formas Orientadas ao Ambiente – Estas formações podem ser padrão ou completamente livres, por exemplo, se um Swarm é requerido a passar entre um corredor estreito, ele irá optar pelo formato “linha reta”. As abordagens simplesmente usando geometria computacional iria detectar o Ambiente e invocar a formação necessária.

Por exemplo, se todo agente tiver um comando de estar a uma certa distância mínima das paredes ou obstáculos [64].

Isso pode ser feito por algoritmos de geometria computacional [5, 21, 69, 86] ou também incluídos no *Swarm* [60, 65, 66] ou algoritmos de GRNs [18, 50, 56, 57], onde o desvio de obstáculos é criado adicionando um fator de distância (Equação (4)), as equações diferenciais de movimento.

Formação Orientada a Tarefas – As técnicas não são diferentes das usadas nas formas orientadas ao ambiente, mas podem depender da tarefa em questão. A tarefa mais usual dos *Swarms* é a vigilância, aonde o objetivo será o maior espalhamento possível para cobrir maior área [1]. Uma das outras é capturar alvos [2, 49], onde as formações são em geral círculos ou elipses em torno do alvo. Algoritmos de geometria computacional, tais como o exemplo [5] são mais comuns neste caso, mas GRNs também podem incorporar tarefas. Em [13], uma estrutura similar as redes neurais são proposta para geração de funções Ad Hoc para capturar alvos e evitar obstáculos ao mesmo tempo.

Estas redes são projetadas por GA⁴. Apesar de muitos problemas poderem ser simplesmente resolvidos por um par de algoritmos padrão, uma investigação mais profunda na construção de formas pode nos fornecer outros avanços em diferentes áreas, tal como autoconstrução e reparo de macroestruturas e possíveis correções de processos biológicos

⁴ Genetic Algorithms (Algoritmos Genéticos)

5. PROPOSTAS DE ARQUITETURA PARA DEFINIÇÃO DE FORMAS EM SWARMS

Existem alguns poucos sistemas desenvolvidos para análise e teste de algoritmos inspirados em morfogênese, porém, há uma falta de sistemas de código aberto e flexível onde se possam testar e desenvolver variações e propostas de algoritmos e com uma GUI⁵ e extensões apropriadas para Swarms Robóticos. METAMorph [74] foi uma plataforma muito interessante, mas teve seu projeto cancelado, como outros [9, 55]. Os sistemas atualmente têm plataformas fechadas e focadas no lado biológico da Morfogênese e vida artificial [11, 76]. Acreditamos que uma plataforma mais adequada para simulações e teste de algoritmos deste paradigma poderia ser uma valorosa contribuição para a área.

6. CONCLUSÕES

A coletividade de agentes é um sistema mais poderoso, robusto e flexível para solucionar tarefas humanas do que agentes individuais. Sendo estes agentes virtuais de software ou agentes físicos robóticos [14], ainda assim, possuem mais vantagens como, por exemplo, a resistência à falhas individuais, distribuição de carga, etc. Um dos grandes desafios destes sistemas é como especificar a formação autônoma de uma coletividade de pequenos agentes. Não existe uma solução ideal única. Algumas cobrem o suficiente para as tarefas em questão e outras não são suficientemente robustas. Como regra geral, o mais eficiente é a combinação de várias técnicas.

Este trabalho apresenta uma revisão do estado da arte de todos estes métodos e sua evolução histórica. O paradigma de morfogênese é um dos mais robustos destes métodos e nós apresentamos uma sólida perspectiva de implementação dos trabalhos publicados até o momento, porém nos parece claro que alguns algoritmos computacionais básicos de formação poderiam ser muito úteis se trabalhassem em conjunto com os de morfogênese, tais quais o de desvio de obstáculos e captura de alvos. Existe uma falta de plataformas abertas padronizadas para avaliação e testes destes algoritmos. Portanto sugerir novas arquiteturas para atender a esta necessidade seria uma importante contribuição para a área.

O estado da arte da implementação de algoritmos de morfogênese não apresenta nenhuma proposta sólida para *Swarm* Aéreos Autônomos. Nós acreditamos que a análise apresentada neste trabalho possa permitir a extrapolação e implementação dos algoritmos para formação de modelos multidimensional de controle e formação de *Swarms*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jose Joaquin Acevedo, Begoña C. Arrue, Ivan Maza, and Anibal Ollero. 2013. Distributed approach for coverage and patrolling missions with a team of heterogeneous aerial robots under communication constraints. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10 (2013), 1–13. <https://doi.org/10.5772/52765>
- [2] Yaniv Altshuler, Vladimir Yanovsky, Israel A. Wagner, and Alfred M. Bruckstein. 2008. Efficient cooperative search of smart targets using UAV Swarms. *Robotica* 26, 04 (2008). <https://doi.org/10.1017/S0263574708004141>

⁵ Graphical User Interface (Interface Gráfica com o Usuário)

- [3] Pascal Ballet, Abdallah Zemirline, Lionel Marcé, Gilles Bernot, Franck Delaplace, Olivier Michel, Jean-marc Delosme, Patrick Amar, Roberto Incitti, Paul Bourguin, Christophe Godin, François Képès, Vic Norris, Janine Guespin, Demarty Camille Ripoll, Université Marne, La Vallée, and Crea Ecole Polytechnique. 2002. Course on Cellular Automata, Reaction -Diffusion and Multiagents Systems for Artificial Cell Modeling
- [4] C Barca and A Sekercioglu. 2011. Generating formations with a template based multi-robot system. In Australasian Conference on Robotics and Automation, Vol. 20. Monash University, Melbourne, Australia, 7–9.
- [5] Jan Carlo Barca, Eugene Eu-Juin Lee, and Y Ahmet Sekercioglu. 2013. Flexible Morphogenesis based Formation Control for Multi-Robot Systems. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)* 2, 1 (2013), 31–38.
- [6] Jan Carlo Barca and Y. Ahmet Sekercioglu. 2013. Swarm robotics reviewed. *Robotica* 31, 03 (2013), 345–359. <https://doi.org/10.1017/S026357471200032X>
- [7] Levent BAYINDIR and Erol SAHIN. 2007. A Review of Studies in Swarm Robotics. *Turk J Elec Engin* 15, 2 (2007), 115–147. <https://doi.org/10.1.1.98.7821>
- [8] Randal W. Beard, Jonathan Lawton, and Fred Y. Hadaegh. 2001. A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 9, 6 (2001), 777–790. <https://doi.org/10.1109/87.960341>
- [9] Arnab Bhattacharyya. 2006. Morphogenesis as an amorphous computation. In *Proceedings of the 3rd conference on Computing frontiers - CF '06*. ACM Press, 53. <https://doi.org/10.1145/1128022.1128032>
- [10] Vy-Long Dang, Binh-Son Le, Trong-Tu Bui, Huu-Thuan Huynh, and Cong-Kha Pham. 2016. A decentralized localization scheme for swarm robotics based on coordinate geometry and distributed gradient descent. *MATEC Web of Conferences* 54 (2016), 02002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165402002>
- [11] René Doursat, Carlos Sánchez, Razvan Dordea, David Fourquet, and Taras Kowaliw. 2012. Embryomorphic Engineering: Emergent Innovation Through Evolutionary Development. In *Morphogenetic Engineering: Toward Programmable Complex System*, René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 275–311.
- [12] René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel. 2013. A review of morphogenetic engineering. *Natural Computing* 12, 4 (2013), 517–535. <https://doi.org/10.1007/s11047-013-9398-1>
- [13] Ricardo A C Estepa, Camilo A H Erasso, and Oscar F Avilés S. 2016. Comparison of Control Methods For Modular Robotic Systems. *International Journal of Applied Engineering Research* 11, 11 (2016).
- [14] Toshio Fukuda and Tsuyoshi Ueyama. 1994. Cellular Robotics and Micro Robotic Systems. Number vol. 10 in *World (Scientific) series in robotics and automated systems*. World Scientific, Singapore ; River Edge, N.J. 267 pages.
- [15] Paolo Gaudiano, Eric Bonabeau, and Ben Sharge. 2005. Evolving behaviors for a swarm of unmanned air vehicles. In *Proceedings - 2005 IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS 2005*, Vol. 2005. IEEE, 327–334. <https://doi.org/10.1109/SIS.2005.1501638>
- [16] Giovanni Gracioli, Antônio Augusto Fröhlich, Rafael Pereira Pires, and Lucas Francisco Wannner. 2011.
- [17] Evaluation of an rssi-based location algorithm for wireless sensor networks. *IEEE Latin America Transactions* 9, 1 (2011), 96–101. <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.5876427>
- [18] Hongliang Guo, Yaochu Jin, and Yan Meng. 2012. A morphogenetic framework for self-organized multirobot pattern formation and boundary coverage. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 7, 1 (2012), 1–23. <https://doi.org/10.1145/2168260.2168275>
- [19] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2009. A cellular mechanism for multi-robot construction via evolutionary multi-objective optimization of a gene regulatory network. *BioSystems* 98, 3 (2009), 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2009.05.003>
- [20] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2010. Analysis of local communication load in shape formation of a distributed morphogenetic swarm robotic system. In *2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI 2010 - 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2010*. IEEE, 1–8
- [21] Hongliang Guo, Yan Meng, and Yaochu Jin. 2011. Swarm robot pattern formation using a morphogenetic multi-cellular based self-organizing algorithm. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 3205–3210. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5979821/>
- [22] Khin Haymar, Saw Hla, Youngsik Choi, and Jong Sou Park. 2008. Obstacle Avoidance Algorithm for Collective Movement in Nanorobots. *Journal of Computer Science* 8, 11 (2008), 302–309.
- [23] Khin Haymar Saw Hla, YoungSik Choi, and Jong Sou Park. 2008. Obstacle Avoidance Algorithm for Collective Movement in Nanorobots. In *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8 (11). 302–309.
- [24] Hyondong Oh, Seungkeun Kim, Hyo-sang Shin, and Antonios Tsourdos. 2015. Coordinated standoff tracking of moving target groups using multiple UAVs. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Systems* 51, 2(2015), 1501–1514
- [25] Dagmar Iber, Zahra Karimaddini, and Erkan Ünal. 2016. Image-based modelling of organogenesis. *Briefings in Bioinformatics* 17, 4 (2016), 616–627. <https://doi.org/10.1093/bib/bbv093>
- [26] Abir U Igamberdiev, Lev V Belousov, and Richard Gordon (Eds.). 2012. Editorial Board. *Biosystems* 109, 3 (2012), CO2. [https://doi.org/10.1016/S0303-2647\(12\)00138-4](https://doi.org/10.1016/S0303-2647(12)00138-4)
- [27] Andrew Ilchinski. 2003. Cellular Automata & A Discrete Universe. Vol. 32. World Scientific, Singapore; River Edge, NJ.
- [28] Valeria V. Isaeva, Nickolay V. Kasyanov, and Eugene V. Presnov. 2012. Topological singularities and symmetry breaking in development. *BioSystems* 109, 3 (2012), 280–298.
- [29] Fredrik Jansson, Matthew Hartley, Martin Hirsch, Ivica Slavkov, Noemí Carranza, Tjelvar S. G. Olsson, Roland M. Dries, Johanna H. Grönqvist, Athanasius F. M. Marée, James Sharpe, Jaap A. Kaandorp, and Verônica A. Grieneisen. 2015. Kilombo: a Kilobot simulator to enable effective research in swarm robotics. *arXiv preprint arXiv:1511.04285 abs/1511.0* (2015). [arXiv:1511.04285](http://arxiv.org/abs/1511.04285)
- [30] Yaochu Jin. 2013. Morphogenetic Multi-Robot Pattern Formation Using Hierarchical Gene Regulatory Networks. In *FOCAS Workshop*. Taomina, Italia.
- [31] Yaochu Jin. 2015. Morphogenetic Robotics Home Page. (2015). <http://www.soft-computing.de/mr.html>
- [32] Yaochu Jin, Hongliang Guo, and Yan Meng. 2009. Robustness analysis and failure recovery of a bio-inspired self-organizing multi-robot system. In *SASO 2009 - 3rd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*. IEEE, 154–164. <https://doi.org/10.1109/SASO.2009.19>
- [33] Yaochu Jin and Yan Meng. 2011. Morphogenetic robotics: An emerging new field in developmental robotics. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews* 41, 2 (2011), 145–160. <https://doi.org/10.1109/TS-MCC.2010.2057424>
- [34] Yaochu Jin and Bernhard Sendhoff. 2008. Evolving in silico bistable and oscillatory dynamics for gene regulatory network motifs. In *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2008*. IEEE, 386–391. <https://doi.org/10.1109/CEC.2008.4630826>
- [35] Michał Joachimczak, Taras Kowaliw, René Doursat, and Borys Wróbel. 2013. Evolutionary design of soft-bodied animats with decentralized control. *Artificial Life and Robotics* 18, 3-4 (2013), 152–160. <https://doi.org/10.1007/s10015-013-0121-1>
- [36] Tobias Kaiser. 2014. Distributed Algorithms for Kilobots: Constructing a Global Coordinate System from Local Information. Bachelor's {Thesis}. Institute for Pervasive Computing, ETH Zurich, Zurich.
- [37] Kar-Han Tan and M.A. Lewis. 1996. Virtual structures for high-precision cooperative mobile robotic control. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IROS '96, Vol. 1. IEEE, 132–139. <https://doi.org/10.1109/IROS.1996.570643>
- [38] Michel Kerszberg and Lewis Wolpert. 2007. Specifying Positional Information in the Embryo: Looking Beyond Morphogens. *Cell* 130, 2 (2007), 205–209. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.06.038>
- [39] Seungkeun Kim, Hyondong Oh, Jinyoung Suk, and Antonios Tsourdos. 2014. Coordinated trajectory planning for efficient communication relay using multiple UAVs. *Control Engineering Practice* 29, 19 (aug 2014), 42–49.
- [40] S. Kondo and T. Miura. 2010. Reaction-Diffusion Model as a Framework for Understanding Biological Pattern Formation. *Science* 329, 5999 (2010), 1616–1620.
- [41] George Konidakis, Tim Taylor, and John Hallam. 2007. HydroGen: Automatically Generating Self-Assembly Code for Hydron

- Units. In *Distributed Autonomous Robotic Systems 6*, Rachid Alami, Raja Chatila, and Hajime Asama (Eds.). Springer Japan, Tokyo, 33–42.
- [43] Jahyoung Koo and Hojung Cha. 2011. Localizing WiFi access points using signal strength. *IEEE Communications Letters* 15, 2 (2011), 187–189.
- [44] Sanjeev Kumar and Peter Bentley. 2003. *On Growth, Form and Computers*. Elsevier, Amsterdam; Boston. 1–444 pages. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-428765-5.X5029-4>
- [45] Michael Levin. 2012. Morphogenetic fields in embryogenesis, regeneration, and cancer: Non-local control of complex patterning. *BioSystems* 109, 3 (2012), 243–261.
- [46] M. Anthony Lewis and Kar-Han Tan. 1997. High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures. *Autonomous Robots* 4, 4 (1997), 387–403.
- [47] Wenguo Liu and Alan F T Winfield. 2010. Autonomous Morphogenesis in Self-assembling Robots Using IR-Based Sensing and Local Communications. In *Swarm Intelligence*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Doug Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Marco Dorigo, Mauro Birattari, Gianni A Di Caro, René Doursat, Andries P Engelbrecht, Dario Floreano, Luca Maria Gambardella, Roderich Groß, Erol Ađahin, Hiroki Sayama, and Thomas Stützle (Eds.). Vol. 6234. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 107–118. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-15461-4>
- [48] Wenguo Liu and A. F. T. Winfield. 2012. Distributed autonomous morphogenesis in a self-assembling robotic system. In *Morphogenetic Engineering: Understanding Complex Systems*, René Doursat, Hiroki Sayama, and Olivier Michel (Eds.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Chapter 4, 89–113. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33902-8_4
- [49] Bruce J. MacLennan. 2014. Coordinating Massive Robot Swarms. *International Journal of Robotics Applications and Technologies* 2, 2 (2014), 1–19. <https://doi.org/10.4018/IJRAT.2014070101>
- [50] Marco Mamei, Matteo Vasirani, and Franco Zambonelli. 2004. Experiments of morphogenesis in swarms of simple mobile robots. *Applied Artificial Intelligence* 18, 9-10 (2004), 903–919.
- [51] Wei Meng, Zhirong He, Rodney Teo, Rong Su, Ahmad Reza Shehabinia, Liyong Lin, and Lihua Xie. 2014. Decentralized control of multi-uavs for target search, tasking and tracking. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* 19, 3 (2014), 10048–10053
- [52] Yan Meng and Hongliang Guo. 2012. Evolving network motifs based morphogenetic approach for self-organizing robotic swarms. In *Proceedings of the fourteenth international conference on Genetic and evolutionary computation conference - GECCO '12*. ACM Press, 137. <https://doi.org/10.1145/2330163.2330183>
- [53] Yan Meng, Hongliang Guo, and Yaochu Jin. 2013. A morphogenetic approach to flexible and robust shape formation for swarm robotic systems. *Robotics and Autonomous Systems* 61, 1 (2013), 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.09.009>
- [54] Iñaki Navarro and Fernando Matia. 2013. A survey of collective movement of mobile robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10, 1 (2013), 73. <https://doi.org/10.5772/54600>
- [55] Nikhil Nigam. 2014. The Multiple Unmanned Air Vehicle Persistent Surveillance Problem: A Review. *Machines* 2, 1 (2014), 13–72. <https://doi.org/10.3390/machines2010013>
- [56] ALCR O’Grady and M Dorigo. 2008. Towards Adaptive Morphogenesis in Self-Assembling Robots. In *Iridia.Ulb.Ac.Be*. 1–4. <http://iridia.ulb.ac.be/>
- [57] Rehan O’Grady, A.L. Christensen, and Marco Dorigo. 2009. SWARMORPH: Multirobot Morphogenesis Using Directional Self-Assembly. *IEEE Transactions on Robotics* 25, 3 (jun 2009), 738–743. <https://doi.org/10.1109/TRO.2008.2012341>
- [58] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2014. Adaptive swarm robot region coverage using gene regulatory networks. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Vol. 8717 LNAI. 197–208. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10401-0_18
- [59] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2014. Evolving hierarchical gene regulatory networks for morphogenetic pattern formation of swarm robots. In *Proceedings of the 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2014*. IEEE, 776–783.
- [60] Hyondong Oh and Yaochu Jin. 2016. Evolving H-GRNs for Morphogenetic Adaptive Pattern Formation of Swarm Robots. In *Evolutionary Computation in Gene Regulatory Network Research*, Hitoshi Iba and Nasimul Noman (Eds.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 327–361.
- [61] Hyondong Oh, Ataollah Ramezan Shirazi, Chaoli Sun, and Yaochu Jin. 2017. Bio-inspired selforganising multi-robot pattern formation: A review. *Robotics and Autonomous Systems* 91 (2017), 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.12.006>
- [62] Hyondong Oh, Ataollah R. Shiraz, and Yaochu Jin. 2016. Morphogen diffusion algorithms for tracking and herding using a swarm of kilobots. *Soft Computing* (2016), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2182-2>
- [63] Hyondong Oh, Dae Yeon Won, Sung Sik Huh, David Hyunchul Shim, Min Jea Tahk, and Antonios Tsourdos. 2011. Indoor UAV control using multi-camera visual feedback. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* 61, 1-4 (2011), 57–84. <https://doi.org/10.1007/s10846-010-9506-8>
- [64] Esben H Ostergaard, David J Christensen, Peter Eggenberger, Tim Taylor, Peter Ottery, and Henrik H Lund. 2005. HYDRA: From Cellular Biology to Shape-Changing Artefacts. In *Artificial Neural Networks: Biological Inspirations*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Doug Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Włodzisław Duch, Janusz Kacprzyk, Erkki Oja, and Sławomir Zadrony (Eds.). ICANN 2005, Vol. 3696. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 275–281.
- [65] Les Piegł and Wayne Tiller. 1996. *The NURBS Book* (2nd ed ed.). Monographs in visual communications, Vol. 28. Springer, Berlin ; New York. 665–666 pages. [https://doi.org/10.1016/0010-4485\(96\)86819-9](https://doi.org/10.1016/0010-4485(96)86819-9) arXiv:arXiv:1011.1669v3
- [66] Rethnaraj Rambabu, Muhammad Rijaluddin Bahiki, and Syaril Azrad Md Ali. 2015. Relative positionbased collision avoidance system for swarming UAVS using multi-sensor fusion. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 10, 21 (2015), 10012–10017.
- [67] Ataollah Ramezan Shirazi, Hyondong Oh, and Yaochu Jin. 2014. Morphogenetic self-organization of collective movement without directional sensing. In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, Michael Mistry, Aleš Leonardis, Mark Witkowski, and Chris Melhuish (Eds.). Vol. 8717 LNAI. Springer International Publishing, Cham, 139–150.
- [68] Hiroki Sayama. 2010. Robust morphogenesis of robotic swarms. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 5, 3 (2010), 43–49. <https://doi.org/10.1109/MCI.2010.937323>
- [69] D.P. Scharf, F.Y. Hadaegh, and S.R. Ploen. 2003. A survey of spacecraft formation flying guidance and control (part 1): guidance. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.*, Vol. 2. IEEE, 1733–1739.
- [70] Lisa Schramm and Bernhard Sendhoff. 2011. An Animat’s Cell Doctrine. In *ECAL 2011: Proceedings of the Eleventh European Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems*, Tom Lenaerts, Mario Giacobini, Hugues Bersini, Paul Bourguine, Marco Dorigo, and René Doursat (Eds.). MIT Press, Cambridge, MA, 739–746.
- [71] Whye Leon Seng, Jan Carlo Barca, and Y. Ahmet Sekercioglu. 2013. Distributed formation control in cluttered environments. In *2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Well-being, AIM 2013*. IEEE, 1387–1392. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584288>
- [72] Ilankaikone Senthoooran, Jan Carlo Barca, and Hoam Chung. 2017. A 3D line alignment method for loop closure and mutual localisation in limited resourced MAVs. In *2016 14th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2016*. IEEE, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2016.7838773>
- [73] Yaki Setty, Irun R. Cohen, and David Harel. 2012. Executable modeling of morphogenesis: A Turing-inspired approach. *Fundamenta Informaticae* 118, 4 (2012), 403–417. <https://doi.org/10.3233/FI-2012-722>
- [74] Pablo Ramon Soria, Andres Felipe Palomino, B.C. Arrue, and Anibal Ollero. 2017. Bluetooth network for micro-uavs for communication network and embedded range only localization. In *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 747–752. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991464>

- [78] William M. Spears, Jerry C. Hamann, Paul M. Maxim, Thomas Kunkel, Rodney Heil, Dimitri Zarzhitsky, Diana F. Spears, and Christer Karlsson. 2007. Where Are You? In *Swarm Robotics*, Erolahin, William M Spears, and Alan F T Winfield (Eds.). Vol. 4433. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 129–143. https://doi.org/10.1007/978-3-540-71541-2_9
- [79] Finlay Stewart, Tim Taylor, and George Konidaris. 2005. META-Morph: Experimenting with Genetic Regulatory Networks for Artificial Development. In *Advances in Artificial Life*, David Hutchison, Takeo Kanade, Josef Kittler, Jon M Kleinberg, Friedemann Mattern, John C Mitchell, Moni Naor, Oscar Nierstrasz, C Pandu Rangan, Bernhard Steffen, Madhu Sudan, Demetri Terzopoulos, Dough Tygar, Moshe Y Vardi, Gerhard Weikum, Mathieu S Capparière, Alex A Freitas, Peter J Bentley, Colin G Johnson, and Jon Timmis (Eds.). Vol. 3630. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 108–117
- [80] Klementyna Szwaykowska, Ira B. Schwartz, Luis Mier-Y-Teran Romero, Christoffer R. Heckman, Dan Mox, and M. Ani Hsieh. 2016. Collective motion patterns of swarms with delay coupling: Theory and experiment. *Physical Review E* 93, 3 (2016). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.93.032307> arXiv:1601.08134
- [81] Simon Tanaka. 2015. Simulation Frameworks for Morphogenetic Problems. *Computation* 3, 2 (2015), 197–221. <https://doi.org/10.3390/computation3020197>
- [82] Timothy Taylor. 2004. A Genetic Regulatory Network-Inspired Real-Time Controller for a Group of Underwater Robots. In *Proceedings of the Eighth Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-8)*.
- [83] Tim Taylor, Peter Ottery, and John Hallam. 2007. An approach to time-and space-differentiated pattern formation in multi-robot systems. *Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 2007)* (2007), 160–167.
- [84] Tim Taylor, Peter Ottery, and John Hallam. 2007. Pattern formation for multi-robot applications: Robust, self-repairing systems inspired by genetic regulatory networks and cellular self-organisation Running title: Pattern formation for multi-robot applications. Technical Report EDI-INF-RR-0971. University of Edinburgh.
- [85] Pei-hsuan Tsai, Chun-lung Lin, Ching-yi Chen, and Jia-shung Wang. 2013. A Scalable Localization Scheme using Particle Swarm Approach for Sensor Networks. In *Int'l Conf. Sensor Technologies and Applications*. 21–26.
- [86] Alan M Turing. 1952. The Chemical Basis of Morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 237, 641 (1952), 37–72.
- [87] Atsushi Yamashita, Tamio Arai, Jun Ota, and Hajime Asama. 2003. Motion planning of multiple mobile robots for cooperative manipulation and transportation. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19, 2 (2003), 223–237.
- [88] Daniel Yamins. 2005. Towards a Theory of “Local to Global” in Distributed Multi-Agent Systems (II). I (2005).
- [89] Bin Yang, Yongsheng Ding, Yaochu Jin, and Kuangrong Hao. 2015. Self-organized swarm robot for target search and trapping inspired by bacterial chemotaxis. *Robotics and Autonomous Systems* 72 (2015), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.05.001>
- [90] Kiwon Yeom and Ji Hyung Park. 2010. Artificial morphogenesis for arbitrary shape generation of swarms of multi agents. In *Proceedings 2010 IEEE 5th International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications, BIC-TA 2010*. IEEE, 509–513.
- [91] Shuang Yu and Jan Carlo Barca. 2015. Autonomous formation selection for ground moving multirobot systems. In *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, Vol. 2015-Augus. IEEE, 54–59.
- [92] Mengfei Zhou, Jiang Lin, Shuo Liang, Wei Du, and Long Cheng. 2017. A UAV patrol system based on Bluetooth localization. In *2017 2nd Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*. IEEE, 205–209. <https://doi.org/10.1109/ACIRS.2017.7986094>