

UMA ANÁLISE DO PERCURSO DE FORMIGAS EM PASSEIO ALEATÓRIO

AN ANALYSIS OF THE RANDOM WALK OF ANTS

Dr. José Roberto de Araújo Fontoura¹

Marcos Batista Figueiredo²

Ana Flávia Magalhães Moreira³

RESUMO

Rastrear o movimento de insetos em um grupo social, como formigas, é um desafio, porque os indivíduos não são apenas semelhantes na aparência, mas também propensos a realizar contato corporal intensivo e ajuste de movimento súbito (iniciar, parar, mudanças bruscas de direção). Nessas mudanças bruscas de movimento elas podem perder a trilha de feromônio e muitas tendem a se perder definitivamente da colônia. Neste trabalho apresentamos uma modelagem capaz de identificar esse tipo de comportamento para numa colônia da espécie *Atta Sexdens*. O modelo se baseia em métodos simples de visão computacional associados ao filtro de kalman e correlação com a teoria do random Walk, ou seja, a percepção do modelo ao estimar se indivíduos analisados apresentam uma rota a qual não está alinhada ao dos demais. O modelo se comportou bem ao determinar as trajetórias mas ainda precisa de ajustes para a análise do movimento uma vez que a taxa de falso positivos foi elevada.

PALAVRAS-CHAVE

trajetória, formigas, visão computacional, caminhante aleatório

ABSTRACT

Tracking the movement of insects in a social group (such as ants) is challenging because individuals are not only similar in appearance, but also prone to intensive body contact and sudden movement adjustment (start, stop, sudden changes in direction). . In these sudden changes of movement they can lose the iron hormone trail and many tend to get lost permanently from the colony. In this work we present a model capable of identifying this type of behavior for a colony of the *Atta Sexdens* species. The model is based on simple computer vision methods

associated with the kalman filter and correlation with the random walk theory, that is, the perception of the model when estimating whether analyzed individuals present a route which is not aligned with the others. The model behaved well when determining the trajectories but still needs adjustments for the movement analysis since the false positive rate was high.

KEYWORDS

trajectory, ants, computer vision, random walker

1. INTRODUÇÃO

Existe uma diversidade de seres vivos, em particular formigas, que participam de movimentos coletivos semelhantes a fluxos. O processo pelo qual um grupo de organismos se espalha no ambiente a partir de uma pequena região do espaço é chamado de dispersão. A dispersão é central para todos os processos ecológicos espaciais e é uma característica fundamental dos modelos matemáticos de difusão que investigam a dinâmica de agregação e dispersão em animais (LE et al., 2011; KSHEMKALYANI; ALI, 2019; AGARWALLA et al., 2018).

Determinar a influência dessa dispersão numa colônia de formigas é um campo de trabalho com pouca atenção dos pesquisadores, uma vez que a detecção desse tipo de comportamento é complexo de ser feito a olho nú. Como as colônias de formigas otimizam o forrageamento esse dado pode fornecer maiores informações sobre como as formigas alcançaram o sucesso ecológico.

É importante destacar que modelos matemáticos têm demonstrado que a presença de estrutura espacial em populações animais tem implicações cruciais inclusive para a coexistência de espécies e a manutenção de diferentes estratégias comportamentais (BESHERS; FEWELL, 2001; PINTER-WOLLMAN et al., 2013; GREENE; PINTER- WOLLMAN; GORDON, 2013).

Muitos estudos corroboram com a ideia de que colônias de formigas constituem um sistema adaptativo de auto-organização (HU et al., 2020; SCLOCCO et al., 2020; SCLOCCO et al., 2021; ZHANG et al., 2022).

Durante o processo de busca por fontes alimentares, muito embora pareçam forragear de modo independente, estão sob influência feromonal e interagem umas com as outras,

demonstrando um comportamento extremamente inteligente nas colônias (JIAN; LI, 2019). No entanto, rastrear movimento de formigas é uma tarefa desafiadora, visto que esses organismos, realizam movimentos repentinos e mantêm contato corporal constante (CAO et al., 2020; WU; CAO; GUO, 2020; YANG et al., 2020).

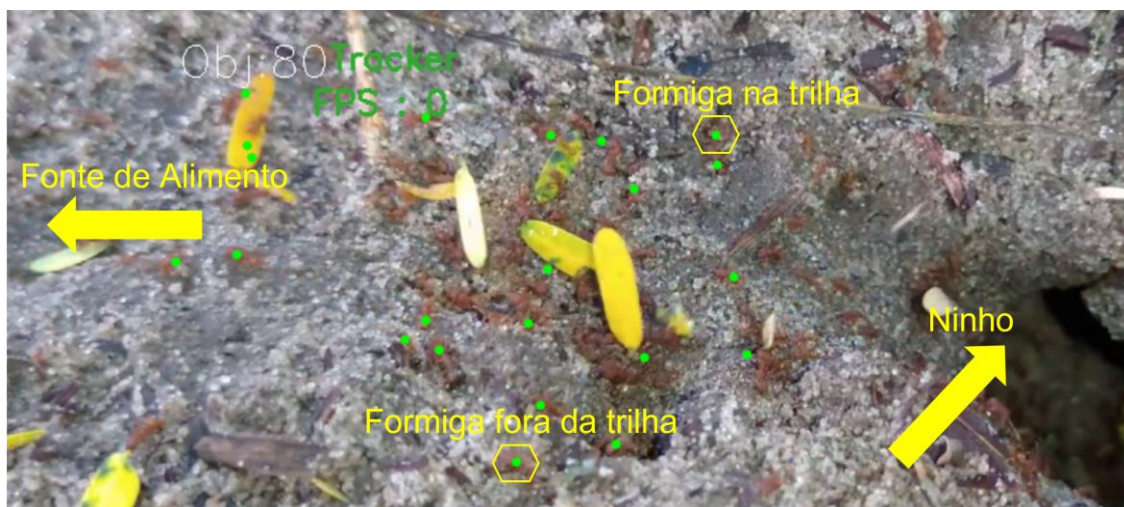
As trilhas de forrageamento, se apresentam dessa forma, como uma organizada forma de as formigas transitarem e transportarem alimento entre uma fonte alimentar e a colônia (CZACZKES, 2012; CZACZKES; GRÜTER; RATNIEKS, 2013; CZACZKES et al., 2012; CZACZKES; GRÜTER; RATNIEKS, 2015; FRIZZI; TALONE; SANTINI,

2018). Nesse contexto, pesquisas recentes demonstram que formigas realizam movimentos bidirecionais, contrariamente ao que ocorre na maioria das espécies (FOURCASSIÉ; DUS- SUTOUR; DENEUBOURG, 2010; JOHN et al., 2004; JOHNSON; ROSSI, 2006; RIBEIRO

et al., 2009). Sendo assim, as formigas são forrageadores de local central, o que significa que elas recuperam comida para seu ninho no final de cada viagem de forrageamento. Durante a exploração de fontes de alimento, muitas espécies deixam trilhas químicas ao longo das quais os indivíduos se deslocam, indo e voltando entre seu ninho e as fontes de alimento (BRUCE; BURD, 2012; BURD, 2006; BURD et al., 2002; FOLGARAIT, 1998; HOENICKE; BLISS; MORITZ, 2015; LASSAU; HOCHULI, 2004). Em algumas espécies,

o fluxo de indivíduos nestas trilhas pode ser bastante abundante, chegando a mais de cem formigas por minuto, como em cortadeiras, por exemplo (WIRTH et al., 2002).

Figura 1 – imagem da colônia foco do estudo



Fonte: Próprio autor

Em colônias jovens, o forrageamento próximo ao ninho exige menor perda energética. Entretanto, em colônias maiores, onde existem uma maior quantidade de forrageadoras, as trilhas podem ser estabelecidas a grandes distâncias dos ninhos, o que mostra a presença de formiga não está necessariamente relacionada à localização de ninho próxima a ela (LACERDA et al., 2013).

Nesse contexto, as operárias encontram os recursos explorando novas fontes e partindo de trilhas já existentes ou saindo de túneis subterrâneos, construindo assim novas trilhas ou não, em função da disponibilidade e qualidade desse recurso e nesse processo de saída da colônia notasse um comportamento estranho em relação ao grupo de determinados indivíduos, conforme observamos na figura 1 .

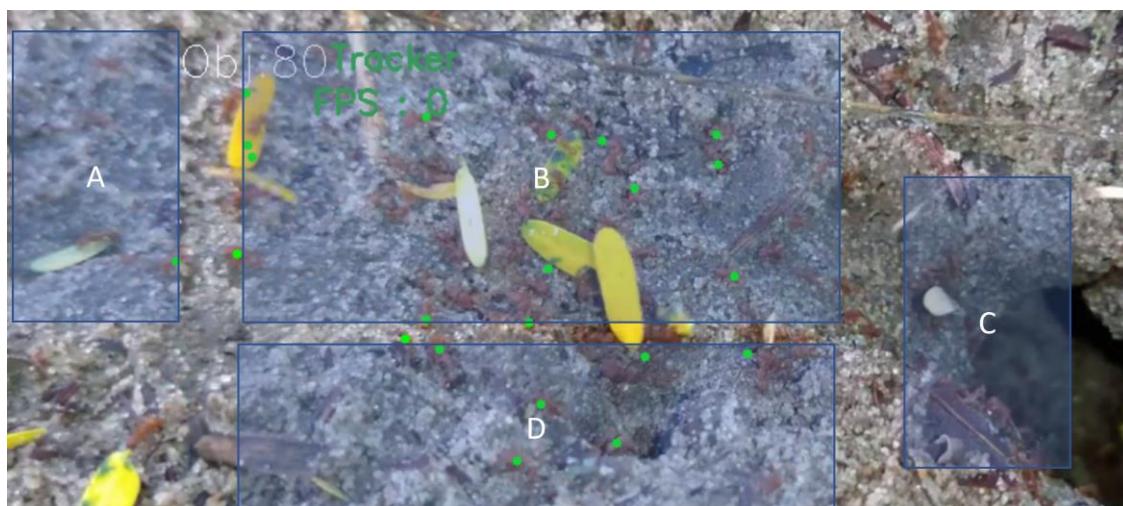
Todas as formigas partem de seu ninho seguindo a trilha de feromônio, porém algumas caminham aleatoriamente perdendo essa trilha. O objetivo desse comportamento é que as formigas encontrem fontes de alimento e entreguem pedaços dele ao ninho e como esta fonte tem um determinado valor nutritivo quanto maior for a perda da trilha de feromônio e o comportamento aleatório a fonte de alimento é reduzida empobrecendo o ninho. Neste trabalho, apresentamos um modelo computacional baseado em imagens que analisa o total de formigas que demonstram um comportamento aleatório ao se afastar do ninho baseando-se nos algoritmos de random walk e filtro de kalman.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção descrevemos a modelo empregado para análise do comportamento observado das nas formigas a partir das imagens obtidas adicionalmente à pontuação de decisão de direção. Introduzimos inicialmente um algoritmo de busca simples para o passeio aleatório. Em seguida, apresentamos o algoritmo de busca baseado em feromônios e por último o algoritmo que avalia a busca de prevenção de formigas baseado em feromônios. Ao final mostramos como as formigas direcionam a pontuação de decisão. As formigas usam essa pontuação para decidir em que direção devem ir, se estiverem enfrentando muitos feromônios adjacentes ou fontes de alimento.

O universo neste artigo é uma grade retangular de 675px por 1200px. Essa grade possui uma quantidade definida de locais alvo(A,B,C e D). Nesta área identificamos o posicionamento da entrada da colônia (C), uma área base para a trilha de ferormonios (A e B) e uma área de aleatoriedade (D). Conforme observamos na figura 2

Figura 2 – Áreas de investigação do comportamento das trabalhadoras



Fonte: Próprio autor

Neste trabalho consideramos que as formigas estão procurando alimento para sobreviver. Percebemos que cada membro dessa colônia é responsável pelo sucesso ou fracasso desta sociedade. Neste sentido o alimento consiste em muitos pedaços pequenos que são

transportados por uma formiga. A soma total dessas partes estabelece o valor nutritivo para a colônia. Assim, se uma formiga não alcança o alimento, o valor nutritivo é decrementado em um pedaço e se o valor nutritivo se torna zero, a fonte de alimento desaparece.

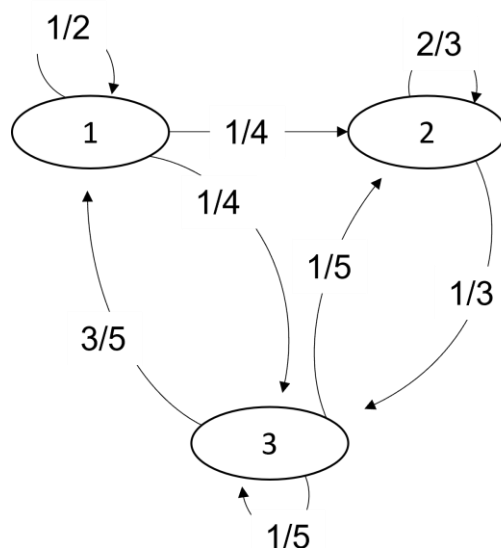
Os feromônios são usados para comunicação e forçam, indiretamente, a direção para uma fonte de alimento. Esses feromônios são gerados pelas formigas quando encontram comida e correm de volta para o ninho. No entanto, a natureza não está mantendo os feromônios para sempre. Portanto, cada feromônio espalhado começa com um valor de potência. O valor de potência diminui com uma determinada taxa de evaporação. Se a potência do feromônio chegar a zero, o feromônio não existe mais. Como resultado, as formigas não podem mais usá-lo e entram em movimento aleatório.

2.1. O RANDOM WALK

Passeios aleatórios e cadeias de Markov são um dos processos estocásticos bem conhecidos e estudados, como ferramenta comum em matemática aplicada. Um passeio aleatório em um conjunto finito de estados é um processo que se move de um estado para outro de uma maneira que depende apenas do último estado e de um conjunto associado de probabilidades de transição desse estado para os outros estados (??). A figura 3 ilustra esse processo

Esse processo também é conhecido como cadeia de Markov, e no cenário considera- mos que os dois modelos, cadeias de Markov e passeios aleatórios, são equivalentes.

Figura 3 – Áreas de investigação do comportamento das trabalhadoras



Fonte: Próprio autor

Uma das principais propriedades de cadeias de Markov (CV) é sua distribuição estacionária. Isso modela onde esperamos que o passeio ocorra ou seja “na média” à medida que o processo é executado até o infinito (Evidentemente em nosso trabalho limitamos a um estado finito). Para uma CV de N estados, existe uma matriz P estocástica N x N, onde P_{ij} é a probabilidade de transição do estado j para o estado i. O processo estocástico, que chamamos de passeio aleatório consiste em uma sequência de estados X(0), X(1), X(2),... e usa o conjunto de probabilidades de transição. Em uma cadeia de segunda ordem, usamos X(n) e X(n + 1) para procurar a coluna apropriada de dados de transição com base nos dois últimos estados do histórico. No espaço do passeio aleatório algumas vezes observamos o processo retornar a X(n) caso algum estado seja perdido durante o processo. conforme vemos na figura 3. Formalmente seja P_{ijk} uma transição de probabilidades de segunda ordem de uma cadeia de Markov com N estados.

$$Pr \{X(n + 1) = i | X(n) = j, X(n - 1) = k\} = P_{ijk}$$

A lei de probabilidade aleatória pode ser definida como:

$$Pr \{Y(n) = k | F_n\} = \frac{1}{n + N} \sum_{s=1}^n \mathbb{1}_{\{X(s) = k\}} \quad (1)$$

$$Pr \{X(n + 1) = i | X(n) = j, Y(n) = k\} = P_{ijk} \quad (2)$$

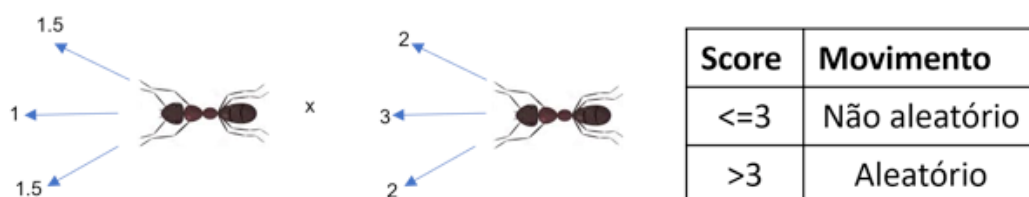
onde F_n é o n -ésimo termo gerado pelas variáveis $X(i)$, $i = 1, \dots, n$ e $X(0)$ é o estado inicial. Este sistema descreve um processo aleatório com reforço.

Algoritmo de busca de passeio aleatório (PA), as formigas partem de seu ninho e ao perderem a trilha de feromônio se movem aleatoriamente em qualquer direção até encontrarem novamente a trilha ou morrerem. Assim, deve-se mencionar que, enquanto as formigas estão procurando pela trilha, elas lembram após cada movimento a direção de onde vieram. As formigas usam essa memória para encontrar o caminho de volta ao ninho.

2.2. A PONTUAÇÃO DE DIREÇÃO

Depois que as formigas encontram comida, elas voltam para o ninho e, no caminho, espalham feromônios. No entanto, se uma formiga em busca tem muitos rastros de feromônios adjacentes, como ela decide qual escolher? Neste trabalho a melhor resposta é que a decisão de direção acontece com uma pontuação de direção associada a cada estado do ponto. O que equivale dizer que:

Figura 4 – Se a pontuação do estado $X(n)$ tem como resposta uma pontuação menor ou igual a 3 definimos esse movimento como passeio não aleatório caso contrário aleatório



Fonte: Próprio autor

A direção em que a formiga está olhando tem o fator de peso 3:0, para a esquerda ou para a direita tem um fator de 2:0, voltando ao local anterior 0:0, e todas as outras 4:0. Na Figura

4 vemos que a formiga decide ir para o local que está exatamente à sua frente. Depois de se mudar para este local, também aumenta a potência do feromônio e assim sucessivamente. No entanto, a pontuação é diferente quando uma formiga não localiza essa trilha e muda abruptamente esse movimento. Nesse momento sua pontuação acaba se sobrepondo ao restante das trabalhadoras e ela entra em movimento aleatório.

2.3. O MODELO

Nas últimas duas décadas, modelos de detecção e rastreamento baseados em visão têm sido amplamente utilizados para estudar insetos sociais (CAO et al., 2020). Aparência, forma e informações de movimento são as principais métricas usadas nesta categoria de método. Devido à alta semelhança da aparência das formigas, que se diferenciam basicamente em tamanho diversos métodos podem ser aplicados para rastreamento desses insetos em uma configuração de laboratório. Notavelmente, as operações de modelagem de segundo plano e extração de primeiro plano são demoradas.

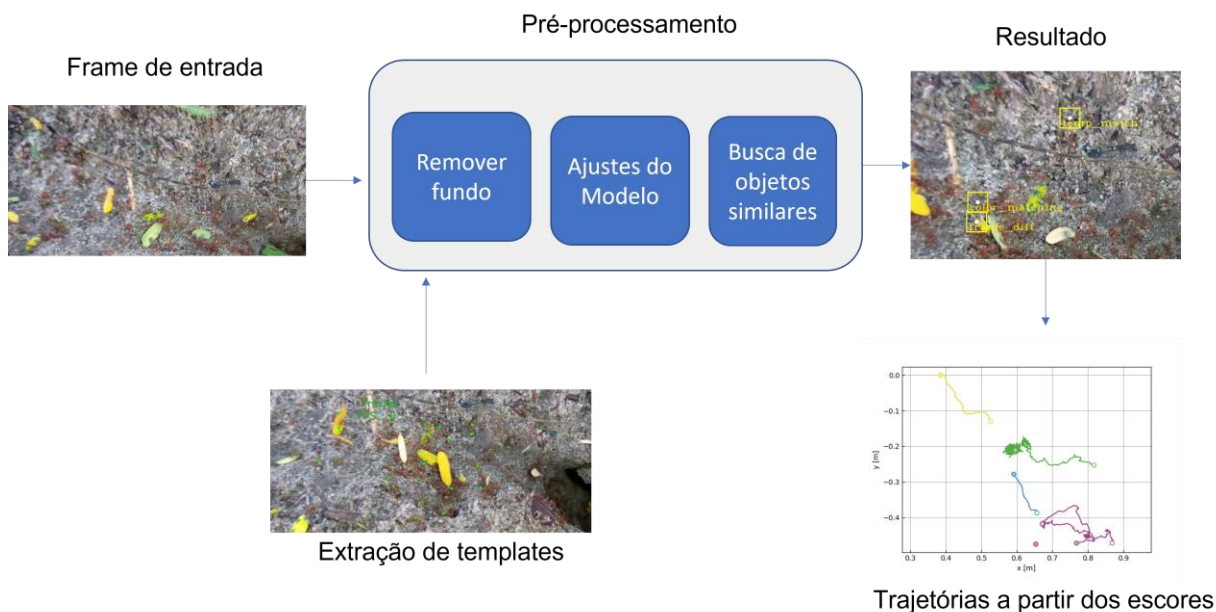
O paradigma aqui para o rastreamento e detecção consiste em combinar trajetórias e detecções em dois quadros consecutivos, um processo que requer métricas. O modelo do vizinho mais próximo global mede o estado de movimento para alcançar o rastreamento. O modelo do vizinho mais próximo global assume que o estado de movimento obedece ao modelo de observação linear, que no nosso caso, usa um modelo de velocidade constante - o filtro de Kalman (KF). No entanto, as mudanças na velocidade e direção das formigas são difíceis de prever, portanto, as informações de aparência são integradas como uma métrica.

Ao aplicar o método acima para rastrear formigas, percebemos que os frames são perturbados pelo ruído de fundo e difíceis de superar o sério problema de oclusão em cenas densas (Muitas formigas em uma frame). A memória de longo prazo e os mecanismos de atenção espaço-temporal foram introduzidos para tentar resolver esse problema da oclusão de longo prazo.

Uma estrutura de memória de curto prazo (comparação de frames) que acopla um preditor linear (KF) com recursos de detecção de entrada, modelando, assim, recursos de aparência de longo prazo. O mecanismo de atenção espaço-temporal também é adequado para a tarefa. O módulo de atenção espacial faz com que a predição da localização foque no padrão de correspondência. Enquanto isso, o módulo de atenção temporal atribui diferentes níveis de atenção à sequência amostral da trajetória.

Essa estrutura baseada depende dos resultados da detecção (luz incidente principalmente). Portanto, a oclusão severa provavelmente causará falhas de rastreamento. Para evitar esta situação, um detector com reparo e ajuste automático da caixa de detecção é ajustado e otimizada a cada frame. E assim propomos uma estrutura completa de detecção e rastreamento baseada nestas estruturas de detecção de múltiplos objetos conforme vemos na figura 5

Figura 5 – Estrutura do modelo



Fonte: Próprio autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nosso método de rastreamento automático de formigas que apresentam movimento aleatório contém dois processos principais: (1) detectar formigas em cada quadro de imagem de todos os vídeos e (2) construir trajetórias de formigas para cada vídeo com base nas formigas detectadas (3) Analisar nesse movimento quanto ao tempo permanece a aleatoriedade, percentual de elementos que entram nessa condição. Nosso conjunto de dados para análise possui > 2 milhões de quadros de imagem, buscamos gerar dados rotulados suficientes para alimentar o modelo sem incorrer em esforço excessivo de rotulagem humana, algo que foi parcialmente atingido.

Nesta empreitada percebemos que as trajetórias do movimento de formigas normal-

mente abrangem vários quadros consecutivos em vídeos, as posições de formigas detectadas em quadros anteriores auxiliam na detecção de formigas em quadros consecutivos posteriores. Ou seja, enquanto a detecção de formigas forma uma base para a construção de trajetórias de formigas, as trajetórias de formigas detectadas também podem ajudar na detecção de outras formigas. Portanto, projetamos nosso procedimento de construção de trajetória de modo que ele não apenas possa rastrear as formigas detectadas, mas também fornecer dicas para indicar onde (quais quadros e locais) pode haver inconsistências nas trajetórias das formigas e cenários difíceis para detecção de formigas (por exemplo, formigas densamente agrupadas).

Portanto, nosso método inicial de rastreamento de detecção consiste em duas rodadas (com a segunda rodada melhorando os resultados de detecção e rastreamento da primeira rodada), e cada rodada executa duas etapas principais, detecção de formigas e construção de trajetória, conforme descrito abaixo.

A detecção do movimento de formigas usando um modelo de plano de fundo adaptável é uma técnica crítica e aplicável na visão Computacional. À medida que os frames são interpretados se cria um modelo de fundo foi mantida em formas baseadas em pixels. Neste artigo, propomos um método que combina abordagens baseadas em pixels e baseadas em blocos em um único “framework”. Essa abordagem nos permite administrar fundos de imagem hierárquicos eficientes considerando que essas duas abordagens são complementares entre si. Essa abordagem nos permitiu detectar formigas em todos os frames dos vídeos.

A Construção de trajetória de formigas. Dadas as formigas percebidas como em movimento aleatório detectadas em cada quadro, o próximo passo é criar a rotulação do objeto e formar trajetórias que conectem formigas detectadas quadro a quadro em vídeos. Formulamos este problema de construção de trajetória de formigas como um problema de transporte, ou seja, entre cada dois quadros consecutivos em cada vídeo, encontramos um transporte ótimo (para formigas) que corresponde ao movimento real das formigas. Nesta formulação de transporte, cada formiga detectada no quadro K pode ser vista como um “indicador” da sua posição inicial e cada formiga detectada no quadro $K + 1$ pode ser vista como um “resultado/acréscimo” no movimento. Destacamos aqui e determinados momentos houve a sobreposição de formigas. Que acontece quando em movimento aleatório as formigas se chocam. Nesse caso como o modelo não previu esse cenário cessamos a contagem para essa anomalia.

A dissimilaridade (baseada na distância espacial e na diferença de aparência) entre

formigas em dois quadros consecutivos é uma medida de quanto seria necessário para transportar (mover) uma formiga no quadro K para outra no quadro $K + 1$. Essa dissimilaridade também computa o transporte de alimento. O objetivo é transportar formigas detectadas (o maior número possível) no quadro K para o quadro $K + 1$ com o custo total mínimo.

Avaliação de erros. Na avaliação a precisão do modelo, assistimos a um subconjunto de vídeos e determinamos a taxa de erro. Dividimos essa etapa em momentos de cerca de 26 minutos. Isso fornece uma maneira de verificar a precisão do rastreamento em pontos não detectados pelo modelo e rotular como erro. Ao final, verificamos os erros identificados na detecção e assim determinar melhor a precisão dos dados daquela colônia.

Se a precisão média fosse superior a 60% para esses vídeos, continuamos a verificação caso contrário fizemos correções nos parâmetros do modelo até o mesmo atingir a meta estabelecida.

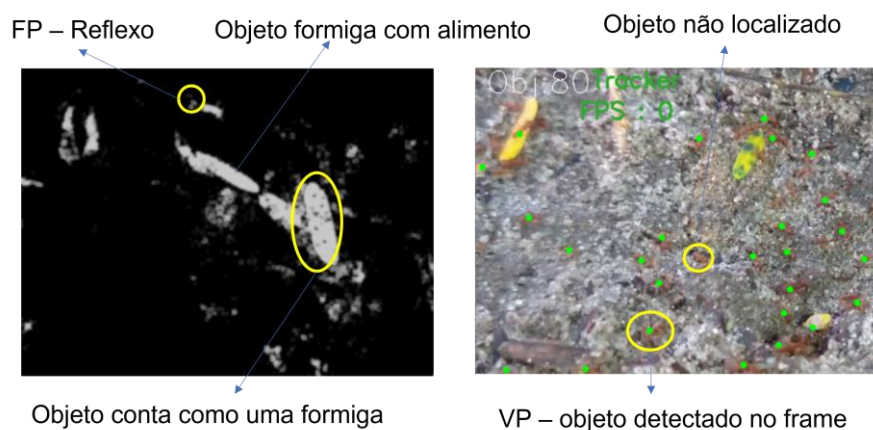


Figura 6 – Estrutura do modelo

Fonte: Próprio autor

O rastreamento automatizado de formigas em quadros de vídeo resultou em

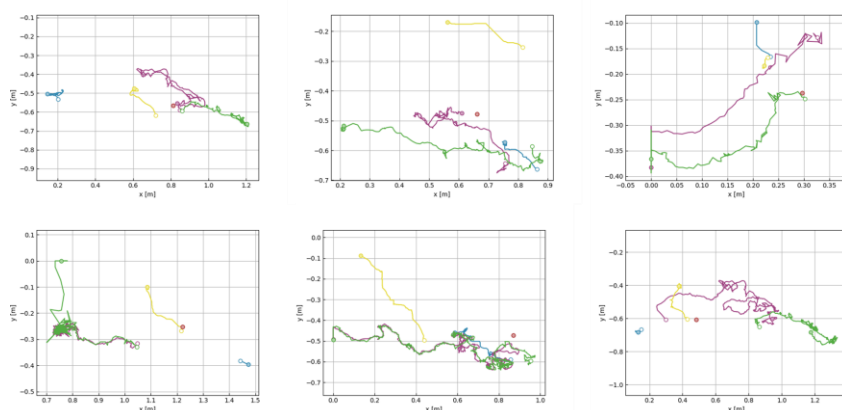
20.979.200 pontos de dados sobre o movimento das formigas. O modelo tinha dois tipos de precisão um para formigas na trajetória de feromônio e outra as fora desse percurso. A primeira é a precisão da espécie, que é uma medida de quão bem o modelo reconheceu uma trajetória que chamamos aqui de bem-comportada e outra aleatória. O modelo detectou corretamente as formigas *Atta Sexdens* com uma precisão de 85,8%. O modelo pegou outros insetos ou espécies de formigas na trilha (falso positivo) ou não conseguiu detectar quando ela atravessou a trilha em média 2.21% das vezes;

A segunda medição de precisão é a precisão de rastreamento da aleatoriedade. O computador tinha que detectar as formigas *Atta Sexdens* e segui-las enquanto elas se moviam pela tela quando observados os movimentos aleatórios. Se uma formiga se movia em linha reta ou seguindo um padrão, isso exigia que o computador reconhecesse e rastreasse e removesse essa formiga da contagem. O modelo atribuiu números de identificação a formigas individuais para seguir uma formiga enquanto ela viajava pela tela. O modelo às vezes cometeu erros ao fazer isso. O computador pode trocar os números de identificação quando as formigas andam muito próximas umas das outras. Uma média de 78.70% das trajetórias completas de formigas em todas as colônias não teve erros identificados por um observador humano.

Os resultados na seção anterior mostram que nosso método alcança resultados de rastreamento satisfatórios. Nosso objetivo é apresentar um modelo computacional baseado em imagens que analisa o total de formigas que demonstram um comportamento aleatório ao se afastar do ninho. Somamos a isso a eficácia de nossa estrutura de rastreamento em ambientes do mundo real, a fim de obter dados de avaliação mais significativos e persuasivos.

A detecção desse comportamento em tempo real em ambientes complexos pode expor as limitações de nosso modelo, que fornecerá orientação confiável para nossos esforços futuros. Selecionamos 8 vídeos com formigas em áreas externas de 33 quadros por segundo para teste. Os vídeos contêm um ambiente complexo e um número de 101 a 210 formigas aparecem ao longo os quadros, com uma média de 180 formigas por quadro. Além disso, este teste ao ar livre é muito mais desafiador do que experimentos anteriores realizados na literatura, uma vez que a maioria das formigas está se movendo rapidamente e com fundo que reflete a luz.

Figura 7 – Aleatoriedade de movimento das formigas



Fonte: Próprio autor

Aplicamos diretamente o modelo determinando a partir das imagens obtidas e um conjunto de 10 referencias. A Tab. 1 mostra os resultados do rastreamento.

Vídeo	Detectadas	EM aleatoriedade	FP	FN
Vídeo 1	2893465	510697	43.402	1,05
Vídeo 2	1987626	360754	43.728	2,08
Vídeo 3	1146122	191632	24.069	2,1
Vídeo 4	1076254	192434	29.059	2,87
Vídeo 5	2245320	321530	42.661	1,9
Vídeo 6	3134090	587955	62.055	2,89
Vídeo 7	2022807	367949	50.570	1,92
Vídeo 8	3456876	637102	72.249	2,89

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Propusemos o modelo de detecção de movimento aleatório para formigas sem o uso de pré-treinamento utilizando um modelo que extrai o fundo da imagem e recupera o conjunto de formiga por meio de um pequeno conjunto de dados de amostra de 10 imagens para descrever a aparência das formigas. Em seguida, usamos a distância a relação entre descritores de aparência

para medir a similaridade entre as formigas, obtendo rastreamento em tempo real. Os resultados experimentais demonstram nosso modelo é efetivamente atrapalhado pelo fundo e que a taxa de detecção do movimento ainda precisa ser trabalhada que o uso de redes neurais. Nosso modelo alcançou 85,5% 0, 5% de detecção desse tipo de movimento com um erro de 14,5% 2, 1% ao longo de 8 sequencias de vídeo que perfazem 16 horas tomadas em ambiente externo sem preparação ou qualquer tipo de melhoramento na condição de captura.

5. REFERÊNCIAS

AGARWALLA, A. et al. Deterministic dispersion of mobile robots in dynamic rings. In: Proceedings of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. (ICDCN '18), p. 1–4. ISBN 9781450363723. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3154273.3154294>>.

BESHERS, S.; FEWELL, J. Models of division of labor in social insects. Annual review of entomology, v. 46, p. 413–40, 2001. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/3a5596f04e8d5fddedff9a1dbcfbf77d67ae638>>.

BRUCE, A. I.; BURD, M. Allometric scaling of foraging rate with trail dimensions in leaf-cutting ants. 2012. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/0d884121f42bfa95e03769a27087884f71e2df08>>.

BURD, M. Ecological consequences of traffic organisation in ant societies. 2006. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/609acf5f66dc23a363bd57e2ca77f2f2c92e99eb>>.

BURD, M. et al. Traffic dynamics of the leaf-cutting ant, *atta cephalotes*. 2002. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/74c976c8073a15ce1d8b5d150a92cfc173ce4144>>.

CAO, X. et al. Online tracking of ants based on deep association metrics: method, dataset and evaluation. Pattern Recognit., v. 103, p. 107233, 2020. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/f45c4645b5d6b164c65145ce37518a36fcbb6f3d>>.

CZACZKES, T. Organisation of foraging in ants. 2012. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/88f8f20c8beb0fd65461b265a4dfb7acaf58653a>>.

CZACZKES, T. et al. Uncovering the complexity of ant foraging trails. Communicative Integrative Biology, v. 5, p. 4 – 78 – 80, 2012. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/12b4ba59469545663aa84fd7e7305c3f2484d25a>>

CZACZKES, T.; GRÜTER, C.; RATNIEKS, F. Negative feedback in ants: crowding

- results in less trail pheromone deposition. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 10, 2013. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/4ad893b0abecf9d5ebf7f989c0b3062a7b6eac17>>
- CZACZKES, T.; GRÜTER, C.; RATNIEKS, F. Trail pheromones: an integrative view of their role in social insect colony organization. 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/989a750c27beb93e880312614d3bb3086a77a6e1>>
- FOLGARAIT, P. Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity Conservation*, v. 7, p. 1221–1244, 1998. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/e9c710fd9abd2329b05945684866e9f206ebae64>>
- FOURCASSIÉ, V.; DUSSUTOUR, A.; DENEUBOURG, J. Ant traffic rules. 2010. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/c408024857dfd6d095c2021b8e8021702ac77cf5>>.
- FRIZZI, F.; TALONE, F.; SANTINI, G. Modulation of trail laying in the ant *Iasius neglectus* (hymenoptera: Formicidae) and its role in the collective selection of a food source. *Ethology*, 2018. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/85be721bb5b42d65aaeb340d6263ea57848ab4f2>>.
- GREENE, M.; PINTER-WOLLMAN, N.; GORDON, D. Interactions with combined chemical cues inform harvester ant foragers' decisions to leave the nest in search of food. *PLoS ONE*, v. 8, 2013. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/6069d8cc90f139875b6f24f632aca9f2feb96859>>.
- HOENICKE, C.; BLISS, P.; MORITZ, R. Effect of density on traffic and velocity on trunk trails of *Formica pratensis*. 2015. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/0cc7bf10afd964f1f424c9926cc54f0b162373f8>>.
- HU, T. et al. Antvis: A web-based visual analytics tool for exploring ant movement data. *Visual Informatics*, Elsevier, v. 4, n. 1, p. 58–70, 2020. Citado na página 2.
- JIAN, Y.; LI, Y. Research on intelligent cognitive function enhancement of intelligent robot based on ant colony algorithm. 2019. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/28877de4048ab7c14e4a84e843eec06c95d54fc3>>.
- JOHN, A. et al. Collective effects in traffic on bi-directional ant trails. 2004. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/8487811e9bf5be4088123121ad5821dca19000e5>>.
- JOHNSON, K.; ROSSI, L. A mathematical and experimental study of ant foraging trail dynamics. 2006. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/613d4f2af8fb15ed6cadfcbc6de5c491fd6bf54>>.

- KSHEMKALYANI, A. D.; ALI, F. Efficient dispersion of mobile robots on graphs. In: Proceedings of the 20th International Conference on Distributed Computing and Networking. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2019. (ICDCN '19), p. 218–227. ISBN 9781450360944. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3288599.3288610>>.
- LACERDA, F. G. et al. Task performance of midden workers of *atta sexdens rubropilosa* forel (hymenoptera: Formicidae). 2013. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/f322f37c1a9ab0376adf0be20754af8ad96b6629>>.
- LASSAU, S. A.; HOCHULI, D. Effects of habitat complexity on ant assemblages. *Ecography*, v. 27, p. 157–164, 2004. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/f5fa538bdfef1cfe3c0987bfcf4137c38dfb1c741>>.
- LE, D. Q. et al. Traffic dispersion graph based anomaly detection. In: Proceedings of the Second Symposium on Information and Communication Technology. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2011. (SolCT '11), p. 36–41. ISBN 9781450308809. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2069216.2069227>>.
- PINTER-WOLLMAN, N. et al. Harvester ants use interactions to regulate forager activation and availability. *Animal Behaviour*, v. 86, p. 197–207, 2013. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/4725ac468831ab68811840edc96440c4c9af2b52>>.
- RIBEIRO, P. L. et al. Ants can learn to forage on one-way trails. 2009. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/a4015e34559abdc762bab509d338416deda23748>>.
- SCLOCCO, A. et al. Integrating real-time data analysis into automatic tracking of social insect behavior. *bioRxiv*, 2020. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/b2844ad12b08f13113cff00c7167bc3db7a20a22>>.
- SCLOCCO, A. et al. Integrating real-time data analysis into automatic tracking of social insects. *Royal Society Open Science*, v. 8, 2021. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/5b5d3b656e9edde23efb3f81609f408c14c2f724>>.
- WANG, Q. et al. Bi-directional movement characteristics of *camponotus japonicus* ants during nest relocation. 2018. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/9a9f5f1b0415dacf6f7eb1fb6edba4725b1e3f6d>>. Nenhuma citação no texto.
- WIRTH, R. et al. Herbivory of leaf-cutting ants: a case study on *Atta colombica* in the tropical rainforest of Panama. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2002. v.

164.

WU, M.; CAO, X.; GUO, S. Accurate detection and tracking of ants in indoor and outdoor environments. bioRxiv, 2020. Disponível em:

<<https://www.semanticscholar.org/paper/4a68ef6afb6c19bb292247a09b47d1dfc939949d>>.

YANG, H. et al. Online multi-object tracking using kcf-based single-object tracker with occlusion analysis. Multimedia Systems, p. 1 – 15, 2020. Disponível em:

<<https://www.semanticscholar.org/paper/5adf07691ef4e18ef9c9730d271eeaabf054bd9d>>.

ZHANG, T. et al. Dynamic label assignment for object detection by combining predicted and anchor ious. ArXiv, abs/2201.09396, 2022. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/01eeb351b3180f15f75f991c7580ecaefd6d22dc>>.