

Uma Heurística para o Problema de Patrulhamento de Ambientes com Múltiplos Agentes

Maristela Oliveira Santos¹

Departamento de Matemática Aplicada e Estatística, ICMC/USP, São Carlos, SP

Sadao Massago²

Departamento de Matemática, UFSCar, São Carlos, SP

Roseli Aparecida Francelin Romero³

Departamento de Ciências de Computação, ICMC/USP, São Carlos, SP

Rodrigo Calvo⁴

Departamento de Informática, UEM, Maringá, PR

Resumo. Neste trabalho é proposto uma heurística para um problema de vigilância com múltiplos agentes em ambientes representados por meio de um grafo. Os nós do grafo representam os locais a serem visitados em cada ciclo. Um ciclo é finalizado quando todas os locais são observados pelo menos uma vez por um agente. Deseja-se determinar as trajetórias dos agentes de modo que a duração de cada ciclo seja mínimo, que os agentes sejam incentivados a se movimentarem o máximo possível. Um modelo de programação inteira mista foi proposto bem como uma heurística baseada na decomposição do modelo. Alguns cenários foram gerados e usados para testar a abordagem heurística e os resultados obtidos mostram seu bom desempenho quando comparado a um *solver* comercial de otimização utilizado.

Palavras-chave. Otimização inteira mista, Vigilância com múltiplos agentes, minimização ciclos, maximização visitas.

1 Introdução

O termo patrulhamento ou vigilância é definido como a ação de percorrer uma região, em intervalos regulares, a fim de promover proteção ou supervisão da mesma. Dessa forma, para que estratégias de patrulhamento sejam eficazes, agentes (humanos ou artificiais) necessitam estabelecer uma coordenação adequada entre si, para que locais de um dado ambiente sejam visitados repetidas vezes ao longo do período de monitoramento [1]. Uma das formas de um sistema de vigilância trabalhar com um ambiente a ser observado implica no conhecimento prévio de seu ambiente, ou seja, informações de disposição e conectividade dos ambientes são fornecidas com antecedência. Por exemplo, considere um ambiente que pode ser representado por meio de um grafo de conectividade com suas

¹mari@icmc.usp.br

²sadao@dm.ufscar.br

³rafrance@icmc.usp.br

⁴rcalvo@uem.br

respectivas distâncias e tempo de permanência necessária em cada ambiente. Cada nó do grafo representa um local a ser observado e os arcos são caminhos possíveis entre eles com respectivas distâncias ou tempo de viagem. Estes ambientes podem ser salas, laboratórios nos prédios no mesmo nível, plantações entre outras. O modelo de grafo é adotado em [2] para vigilância com múltiplos robôs. Locais estratégicos são destacados, possibilitando a maximização da cobertura total do ambiente em um determinado instante. Um estudo comparativo entre estratégias de vigilância que representam o estado-da-arte foi apresentado em [3] em relação ao desempenho e a escalabilidade de cada uma delas. No trabalho de [4], um modelo de grafos com peso foi utilizado para obter caminhos hamiltonianos com menor custo. Em [5], encontram-se métodos que podem ser utilizados tanto para visitar o local, bem como efetuar a vigilância de determinadas regiões conhecidas e desconhecidas. Calvo [6] considerou um problema de gerenciamento de múltiplos-robôs para vigilância em ambientes desconhecidos. Foram utilizados os termos: ciclo de vigilância (SE) e o intervalo de vigilância (SI) para descrever o problema. Um ciclo SE é finalizado quando todos os pontos de um ambiente forem visitados pelo menos uma vez. O intervalo de tempo necessário para completar um SE é denominado de SI, os quais devem ter a menor duração possível.

Neste trabalho, apresentamos um modelo de programação inteira mista e uma heurística baseada no modelo para o problema de vigilância. Considera-se um horizonte de tempo de planejamento, subdivididos em intervalos de tempo (T), como em [6], a fim de promover proteção ou supervisão de ambientes conhecidos. O ambiente é representado por um grafo e o objetivo é determinar a trajetória ótima de múltiplos agentes (N) em um ambiente dividido em S locais que devem ser monitorados, com $N < S$. Os agentes (homogêneos) fazem divisão de trabalho, podendo cada um visitar uma parte das regiões alvo. O problema proposto difere de [4], pois supomos que as trajetórias dos agentes podem ser diferentes ao longo de cada ciclo. Além disso, desejamos que os agentes visitem mais locais em um determinado ciclo. Nos experimentos computacionais mostra-se as vantagens de considerar esta abordagem em diferentes cenários.

2 Modelagem Matemática e Abordagem de solução

Para resolver o problema, considera-se que existem T ciclos, de tamanho variável, nos quais todas os locais devem ser observados. Um local de observação deve ser visitado, em um ciclo, por pelo menos um agente i e quando este visita o local j (ou k) deve permanecer nele durante um certo tempo para que seja considerado "observado", dado por $Stay_i$. O ciclo finaliza quando todos os locais/salas são visitados pelo menos uma vez e em seguida, um novo ciclo é iniciado. No início da observação, os agentes estão em determinados locais ($W0_i$) e, em um ciclo, um agente pode visitar um local mais de uma vez. No final do último ciclo, o agente i deve retornar a posição inicial $W0_i$. Em um ciclo, cada rota de um agente tem que ser conexa, desta forma, implementa-se as restrições de modelos do tipo *Multi Commodity Flow* para eliminação das sub-rotas propostas por [7]. No problema de vigilância, os objetivos consistem na minimização da duração máxima dos ciclos e na maximização do número médio de visitas, em cada ciclo, para todos os agentes.

Parâmetros adicionais

d_{jk}	Tempo(distância) de deslocamento da sala j para sala k
$bigM$	Número Grande
$PesoZZ$ ($PesoZV$)	Peso da variável zv (zv)
$PesoME$	Peso da variável ME_t

Variáveis de decisão

Δ_t	Duração do ciclo t
x_{ijkt}	Número de vezes que o agente i visitou o local k após o local j no ciclo t
F_{ijkt}^m	É 1 se o arco (j,k) é usado para chegar na sala m pelo agente i no ciclo t . 0 caso contrário
NS_{it}	Número de visitas nas salas pelo agente i no ciclo t
G_{ijt}	1 se o agente i visitou o local j no ciclo t . 0, caso contrário
y_{ijt}	Número de vezes que o agente i visitou o local j no ciclo t
w_{ijt}	1 se o agente i está no local j no início do ciclo t . 0, caso contrário
MI_t (ME_t)	Início (final) do ciclo t
zz (zv)	Variáveis auxiliares para função objetivo.

A função objetivo (1) visa a redução do tamanho de cada ciclo e o incentivo à movimentação dos agentes.

$$Min \quad PesoZZ \times zz + \sum_t \text{PesoME} \times ME_t - \text{PesoZV} \times zv \tag{1}$$

As restrições (2) garantem que todo local j seja visitado por pelo menos um agente em cada ciclo t . As restrições (3) garantem que cada agente i deve estar em algum local no início do ciclo t . As restrições (4) contabilizam quantas vezes o agente i visitou a sala j no ciclo t , considerando a possibilidade do agente já iniciar o ciclo na sala j .

$$\sum_{i=1}^N G_{ijt} \geq 1, \quad \forall j, t \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^S w_{ijt} = 1, \quad \forall i, t \tag{3}$$

$$w_{ijt} + \sum_k x_{ikjt} = y_{ijt} \quad \forall t, i, j \tag{4}$$

O balanço de visitas realizadas pelo agente i no ciclo t é obtido por meio das restrições (5). A variável binária G_{ijt} é 1 se, e somente se $y_{ijt} > 0$, ou seja, quando ocorre alguma visita à sala j pelo agente i no período t . As restrições (6) usam a ideia do $bigM$ para garantir esta condição.

$$w_{ijt} + \sum_k x_{ikjt} = w_{ij(t+1)} + \sum_k x_{ijk(t+1)}, \quad \forall i, j, t \tag{5}$$

$$\begin{cases} G_{ijt} \leq y_{ijt} \\ y_{ijt} \leq bigM * G_{ijt} \end{cases} \quad \forall i, j, t \tag{6}$$

Os caminhos devem ser conexos. Desta forma, utiliza-se as restrições (7)-(11) para eliminação de sub-rotas. Para estas restrições cria-se um nó fictício (local fictício), denotado N_0 .

$$\sum_{j=1}^S F_{i,N_0,j,t}^m = G_{imt} \quad \forall t, i, m \quad (7)$$

$$F_{i,N_0,k,t}^m + \sum_{j=1, j \neq m}^S F_{i,j,k,t}^m = \sum_j^S F_{i,k,j,t}^m \quad \forall t, i, k, m \quad (8)$$

$$F_{i,N_0,m,t}^m + \sum_{j=1}^S F_{i,j,m,t}^m = G_{imt} \quad \forall t, i, m \quad (9)$$

$$F_{i,N_0,j,t}^m \leq w_{ijt} \quad \forall t, i, m, j \quad (10)$$

$$F_{i,j,k,t}^m \leq X_{ijkt} \quad \forall t, i, m, j, k \quad (11)$$

O início do primeiro ciclo deve ser no instante $t = 0$, ou seja $MI_0 = 0$. O início do ciclo t é igual ao final do ciclo $t - 1$, sendo representado pelas restrições (12). As restrições (13) garantem que os movimentos dentro do ciclo mais o tempo de permanência devem estar dentro do ciclo. No modelo, os ciclos são de tamanho variáveis e são determinados em função do início do ciclo (MI_t) e do fim do ciclo (ME_t). Assim, para cada ciclo t , o tamanho do ciclo Δ_t é determinado pelas restrições (14). Deseja-se também que os tamanhos dos ciclos sejam, na média, mais equilibrados. Desta forma, consideramos as restrições (15), relacionando o tamanho do ciclo com a variável zz . As restrições (16) contabilizam para cada agente i o número total de visitas realizadas durante um ciclo t . Desejamos maximizar o mínimo das visitas NS_{it} , assim consideramos as restrições (17), que relacionam as variáveis NS_{it} com a variável zv . As restrições (18)-(20) apresentam os domínios das variáveis. No início da observação, os agentes estão em uma posição inicial e devem retornar para esta posição no final do último ciclo ($w_{ij1} = w_{ij,t+1} = W0_i$).

$$MI_t = ME_{t-1} \quad \forall t > 0 \quad (12)$$

$$\sum_{j,k} c_{jk} x_{ijkt} + \sum_k Stay_k * (y_{ikt} - w_{i,j,t}) + MI_t \leq ME_t \quad \forall t \quad (13)$$

$$\Delta_t = ME_t - MI_t, \quad \forall t \quad (14)$$

$$\Delta_t \leq zz, \quad \forall t \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^S y_{i,j,t} = NS_{it} \quad \forall t, i \quad (16)$$

$$zv \leq NS_{it}, \quad \forall i, t \quad (17)$$

$$\Delta_t \geq 0 \quad \forall t, \quad MI_t(ME_t) \geq 0 \quad \forall t \quad (18)$$

$$F_{ijkt}^m \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, t, \quad G_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, jt, \quad w_{ijt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, jt \quad (19)$$

$$x_{ijkl} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, j, k, t, \quad NS_{it} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, t, \quad y_{ijt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, j, t \quad (20)$$

A abordagem de solução consiste em uma heurística construtiva (*relax-and-fix*) e uma heurística de melhoria (*fix-and-optimize*). Estas heurísticas têm sido aplicadas com sucesso em vários problemas de otimização [8]). Ambas heurísticas se baseiam na partição das variáveis inteiras do problema em conjuntos disjuntos. Na *relax-and-fix*, inicialmente, todas as variáveis inteiras são relaxadas. Na primeira iteração, uma partição tem suas variáveis integralizadas e o subproblema é resolvido. Caso obtenha uma solução factível, fixa-se os valores das variáveis inteiras e integraliza-se as variáveis de outra partição. O processo é repetido até que se obtenha uma solução factível para todo o problema ou que um subproblema seja infactível. No caso da heurística de melhoria, pode-se considerar as mesmas partições, porém, as variáveis não são mais relaxadas e sim fixadas de acordo com a melhor solução corrente. Em cada iteração, as variáveis inteiras de uma partição são liberadas para otimização e o subproblema é resolvido. Caso obtenha uma solução de melhor qualidade, a melhor solução corrente é atualizada. O processo é repetido até não ocorrer mais melhorias ou um limite de tempo é atingido. Neste trabalho ambas as heurísticas utilizam a partição por ciclo, inicia-se do primeiro ao último ciclo. Desta maneira, na primeira iteração da heurística construtiva, resolve-se o problema de determinar a duração do primeiro ciclo e as trajetórias dos agentes. Caso obtenha uma solução factível, o processo de melhoria é aplicado.

3 Experimentos computacionais

Foram considerados dois cenários de vigilância representados pelas Figuras 1 e 2 com 6 e 16 locais e o exemplo Hub1, que possui 20 nós e 19 arcos ([9]). Os tempos de percurso entre duas salas para qualquer agente estão sobre os arcos, medido em segundos. O tempo de permanência dos agentes em cada local é de 6s, independente do tamanho dos locais. Consideramos $N = 3$ agentes e eles iniciam o primeiro ciclo (finalizam) no local 1. Para os cenários com 6 locais consideramos 5 ciclos e para demais 4. Os pesos $PesoZZ = 0.8$, $PesoME = 0.1$, $PesoZV = 0.1$ são considerados para cenários com foco na minimização dos ciclos (sigla C) e os pesos $PesoZZ = 0.01$, $PesoME = 0.1$, $PesoZV = 0.89$ com foco na movimentação (sigla M). Com os dados, geramos 6 exemplares. O modelo matemático foi codificado no *software* ILOG CPLEX^(TM) 12.1, usando a biblioteca ILOG Concert. Os exemplos foram executados durante um tempo máximo (TM) de 30 minutos, sendo que nas heurísticas utilizamos 15 minutos para cada etapa.

Na Figura 3 são mostradas as trajetórias dos 3 agentes nos 5 ciclos, para o cenário com 6 locais. A solução ótima foi obtida para ambas abordagens. Na Figura 3-(b), existe o incentivo na movimentação dos agentes, enquanto que Figura 3-(a), é priorizada mais a duração dos ciclos. Observa-se nestas figuras, que os agentes procuram determinar uma posição estável após o primeiro ciclo em ambas situações. Nos ciclos intermediários, as trajetórias são repetidas. No cenário com incentivo a movimentação, percebe-se que os agentes executam mais movimentos, porém ainda com o compromisso da minimização da duração do ciclo. As trajetórias poderiam ser diferentes ao longo dos ciclos, caso fosse considerada uma prioridade para intensificação das visitas aos locais. Este problema,

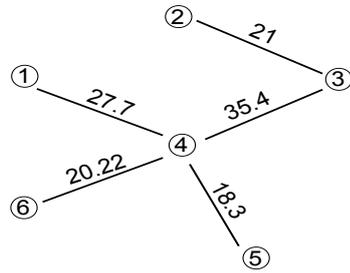


Figura 1: Ambiente com 6 salas

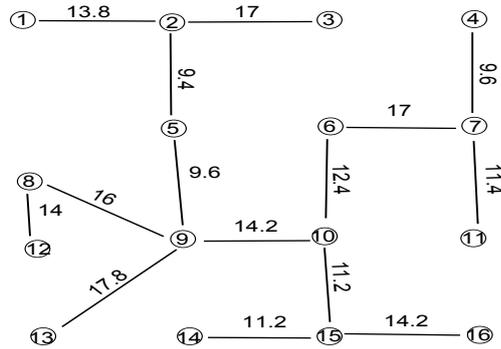


Figura 2: Ambiente com 16 salas

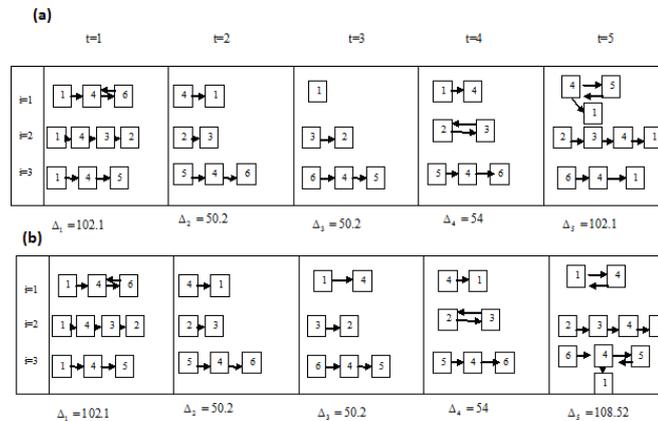


Figura 3: Soluções para Ambiente com 6 salas

geralmente, é abordado considerando apenas um ciclo, sem definição da posição inicial para os agentes. Neste caso, determina-se apenas a trajetória para um ciclo e ela é repetida para as demais. Porém, pelo exemplo, o tempo de estabilização das trajetórias justificaria a abordagem utilizada. Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos pelo CPLEX e pela heurística, os valores dos limitantes inferiores obtidos pelo solver (LB) e os valores das soluções (FO_M e FO_H). O GAP é determinado em relação ao limitante inferior fornecido pelo CPLEX e o valor da melhor solução factível obtida no tempo limite. Quando o número de locais a serem observados é aumentado, o *solver* apresenta dificuldade, mas a heurística consegue determinar soluções competitivas em um tempo computacional menor.

4 Conclusões

Neste artigo foi proposta uma heurística baseada em programação matemática para resolver o problema de vigilância com múltiplos agentes e múltiplos ciclos de observação. Os

Tabela 1: Soluções dos Exemplos

N.Locais	Pesos	LB	FO_M	GAP_M(%)	TM_M(s)	ME_T(M)	FO_H	TM_H	GAP_H	ME_T(H)
6	C	188,99	189,00	0,01	10	359,24	189,00	18	0,01	359,24
6	M	107,36	107,37	0,01	17	365,66	107,37	22	0,01	365,66
16	C	281,95	309,32	8,85	1800	644,00	309,10	375	8,79	642,40
16	M	137,62	152,26	9,61	1800	626,40	154,66	301	11,02	635,20
20	C	3181,59	4102,73	22,45	1800	8561,88	4076,71	394	21,96	8506,13
20	M	1737,22	2150,43	19,22	1800	8543,30	2141,13	400	18,86	8506,13

experimentos computacionais mostraram que a heurística forneceu soluções de boa qualidade com menor tempo computacional. Outros testes devem ser realizados em ambientes com mais salas e mais agentes para verificar a escalabilidade da heurística. Estratégias de diversificação devem ser consideradas na heurística para melhorar as soluções encontradas.

Agradecimentos

Os autores agradecem as agencias financiadoras: CNPq, CAPES e FAPESP.

Referências

- [1] Yehuda Elmaliach, Noa Agmon and Gal A. Kaminka. Multi-robot area patrol under frequency constraints. In *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 57: 293–320, 2009.
- [2] Pooyan Fazli, Alireza Davoodi and Alan K. Mackworth. Multi-Robot Repeated Area Coverage: Performance Optimization Under Various Visual Ranges. In *Proceedings of the Ninth Conference on Computer and Robot Vision, CRV 2012*, 298–305, 2012.
- [3] David Portugal and Rui P. Rocha. Multi-robot patrolling algorithms: examining performance and scalability. *Advanced Robotics*, 325–336, 2013.
- [4] Y. Elmaliach, N. Agmon and G. Kaminka. Multi-Robot Area Patrol under Frequency Constraints. In *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 385–390, 2007.
- [5] S. Alamdari, E. Fata and S. L. Smith. Persistent monitoring in discrete environments: Minimizing the maximum weighted latency between observations. *The International Journal of Robotics Research*, 1–17, 2013.
- [6] Rodrigo Calvo. Sistemas bio-inspirados para coordenação de múltiplos robôs móveis, Tese de Doutorado, ICMC/USP, 2012.
- [7] S. C. Sarin, H. D. Sherali and L. Yao. S New formulation for the high multiplicity asymmetric traveling salesman problem with application to the Chesapeake problem. *Optimization Letters*, 5:259–272, 2010.
- [8] M. O. Santos and B. Almada-Lobo. Integrated pulp and paper mill planning and scheduling. *Computers & Industrial Engineering* 63:1–12, 2012.
- [9] F. Lauri, J.C. Créput and A. Koukam. The Multi-Agent Patrolling Problem-Theoretical Results about Cyclic Strategies. In *In 12th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*, 2014.