

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Localização de alvos por uma rede de sensores sem fio a partir de distâncias intervalares

Renan B. Butkeraites¹

Pós Graduação em Pesquisa Operacional, UNIFESP-ITA, São José dos Campos, SP, BRA

Luiz L. S. Neto²

Instituto de Ciência e Tecnologia, UNIFESP, São José dos Campos, SP, BRA

Weldon A. Lodwick³

Department of Mathematical and Statistical Sciences, University of Colorado Denver, Denver, Colorado, USA

Resumo O avanço tecnológico atual tem propiciado que cada vez mais os processos de produção sejam automatizados, quantificados e controlados de forma eficiente. Redes de sensores sem fio tem desempenhado um papel importante neste cenário, sendo considerada a base da Indústria 4.0. Este trabalho aborda a localização de um alvo a partir de distâncias intervalares provenientes da rede de sensores, utilizando a ótica da Geometria de Distâncias. Testes computacionais são apresentados para aferir a eficiência da metodologia proposta utilizando *solvers* comerciais. Novas direções de pesquisa e desafios também são discutidos.

Palavras-chave. Localização de Alvos, Otimização sob Incerteza, Incerteza Intervalar, Geometria de Distâncias.

1 Introdução

A década de 70 se mostrou próspera para os Tigres Asiáticos (*Coreia do Sul, Taiwan, Cingapura e Hong Kong*) que aumentaram sua participação no mercado mundial com o modelo de *Industrialização Orientada para Exportação*. Entre os anos 1991 e 2011, a Ásia, exceto o Japão, passou a representar 31% da representação do valor agregado industrial global [3].

Em 2011 na feira de Hannover (*Alemanha*) surge o conceito de Indústria 4.0, marcada por quatro características principais: Rede vertical de sistemas inteligentes de produção, Integração horizontal por meio de uma rede voltada a cadeia de valor global, Cadeia de valor permeada pela engenharia e a Aceleração do processo através de tecnologias de ponta.

A Indústria 4.0 está intrinsecamente ligada a informações colhidas por uma rede de sensores, gerenciada por sistemas inteligentes que armazenam e processam suas informações.

¹renan.butkeraites@unifesp.br - Bolsista do CNPq - Brasil

²luiz.leduino@gmail.com

³weldon.lodwick@ucdenver.edu

Algumas aplicações inerentes a este contexto são: Localização de veículos autômatos em uma fábrica; Gerenciamento de plantações; Gerenciamento automatizado de estoque; Otimização online de frotas de entrega; Histórico de utilização de equipamentos de saúde; Monitoramento de pacientes em hospitais.

Neste artigo trataremos o problema de localização de alvos utilizando sensores sem fio, uma das principais aplicações inovadoras da atualidade.

1.1 Problema de Localização

De acordo com [5] existem três tipos principais de técnicas de medidas de localização de alvos utilizando uma rede de sensores sem fio: Medidas de *ângulo-de-chegada* (ou em inglês: *Angle-of-arrival measurements*); Medidas *relativas a distâncias* (ou em inglês: *distance related measurements*); Medidas *relativas a intensidade do sinal* (ou em inglês: *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*);

As medidas relativas a distâncias consideram o tempo de propagação do sinal para determinar a distância entre os sensores sem fio e o alvo que deve ser localizado. As duas principais estratégias de medida de distância por tempo de propagação são:

- Propagação *uma-direção*: Considera o intervalo de tempo entre a emissão do sinal e o recebimento do sinal pelo alvo. É necessária uma sincronização refinada entre transmissor e receptor o que implica em alto custo de hardware, causando baixa popularidade no mercado.
- Propagação *ida e volta*: Considera o tempo entre o envio do sinal pelo transmissor e a recepção do sinal proveniente de um segundo sensor. Erro de tempo de propagação provém do atraso necessário para que o segundo sensor faça a recepção e transmissão do sinal (erro conhecido *a priori* por calibração).

Todas as metodologias para determinação da distância entre alvos e sensores sem fio baseadas no tempo de propagação do sinal são associadas a medidas de incerteza que devem ser tratadas para encontrar de forma efetiva as coordenadas de um determinado alvo.

2 Abordagem da literatura

O problema de localização de alvos sob incerteza é tratado por [2] e é definido como apresentado abaixo.

Definição 2.1. *Sejam p_1, p_2, p_3 sensores sem fio instalados de forma não colinear, $d_{ij}, i, j \in \{1, 2, 3\}$ as distâncias conhecidas entre eles. Sejam $\hat{d}_{0j}, j \in \{1, 2, 3\}$ as distâncias aferidas entre os sensores e o alvo, com erros associados ϵ_j . O problema de localização consiste em determinar as coordenadas $x_0, y_0 \in \mathbb{R}$ do alvo p_0 de forma que $d_{0j}, j \in \{1, 2, 3\}$ seja consistente com as leituras realizadas.*

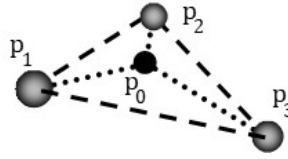


Figura 1: Exemplo de instalação não colinear dos sensores p_1, p_2, p_3 e do posicionamento do alvo p_0 em \mathbb{R}^2 .

Os autores de [2] consideram que é possível calcular as distâncias reais do alvo aos sensores âncora (denotada por d_{0j}) a partir das medidas coletadas pelos sensores âncora (denotada por \hat{d}_{0j}) como sendo da forma $d_{0j}^2 = \hat{d}_{0j}^2 + \epsilon_j$, para algum $\epsilon \in \mathbb{R}^3$ e para todo $j \in \{1, 2, 3\}$ (sendo ϵ_j a j -ésima coordenada de ϵ). Essa hipótese distancia o problema da realidade pois não é sensível à qualidade de leitura e transmissão de informação dos sensores, dificultando que haja aplicação real.

A vantagem teórica da hipótese de [2], caso ela seja satisfeita pelas medidas de distância colhidas pela rede de sensores, é que existem $A \in \mathbb{R}^{3 \times 3}, b \in \mathbb{R}^3, c \in \mathbb{R}$, dependentes de \hat{d}_{0j}, d_{ij} com $i, j \in \{1, 2, 3\}$ tais que $\epsilon^T A \epsilon + \epsilon^T b + c = 0$. Esse resultado é obtido através de manipulações algébricas aplicadas ao determinante de Cayley-Menger da sequência de pontos p_0, p_1, p_2, p_3 . Os autores se utilizam da hipótese para definir uma superfície quadrática sobre os ϵ 's e então encontrar as expressões para A, b, c . Em [2] é garantido que é possível resolver (1) e encontrar as distâncias reais entre os sensores e o alvo a partir dos valores ótimos de ϵ_i .

$$\min_{\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3} \quad \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 \tag{1}$$

$$S. a \quad \epsilon^T A \epsilon + \epsilon^T b + c = 0 \tag{2}$$

Com as distâncias reais obtidas, [2] utilizam a estratégia de triangulação para encontrar efetivamente as coordenadas do alvo.

3 Nova abordagem proposta

Em [4] é apresentado o *problema fundamental da geometria de distâncias* (PGD):

Definição 3.1. Dado um inteiro $K > 0$ e um grafo simples $G = (V, E, d)$, conectado e com pesos nas arestas $d : E \rightarrow (0, \infty)$, encontre uma função $x : V \rightarrow \mathbb{R}^K$ tal que:

$$\forall \{u, v\} \in E, \|x(u) - x(v)\| = d(u, v) \tag{3}$$

Definição 3.2. A *matriz de Cayley-Menger* de duas sequências de n pontos $\{p_1, \dots, p_n\}$ e $\{q_1, \dots, q_n\} \in \mathbb{R}^m$ é definida como:

$$M(p_1, \dots, p_n; q_1, \dots, q_n) = \begin{pmatrix} (d^2(p_i, q_j))_{n \times n} & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \tag{4}$$

E o bi-determinante de Cayley-Menger destas duas sequências de pontos é definida como o determinante de M , denotado como CM .

Este artigo considera a hipótese de que a distância real $j \in \{1, 2, 3\}$ é um *número intervalar* da forma:

$$d_{0j} = \hat{d}_{0j} \cdot (1 + \lambda_j \cdot \alpha), \lambda_j \in [-1, 1] \tag{5}$$

Onde $\alpha \in [0, 1]$ é a tolerância em termos percentuais associada ao método de aquisição da distância j , e algum $\lambda_j \in [-1, 1]$.

É possível encontrar no padrão 802.11-2016 emitido pela IEEE [1] (norma vigente até a publicação do trabalho), página 1920, que o valor de RSSI tem uma tolerância de $\pm 5db$ mas que pode ser reportado de acordo com a especificação do fabricante dos sensores. Portanto, o valor de intensidade do sinal recebido (ou RSSI) é um valor intervalar. Como a função que associa o valor de RSSI a uma estimativa de distância é uma exponencial negativa (função contínua e decrescente), o valor intervalar de RSSI gerará um valor intervalar de distância, o que corrobora a hipótese adotada neste artigo.

Outra vantagem desta hipótese é a possibilidade de interpretação do valor ϵ utilizado por [2]. Ao considerar $d_{0j} = \hat{d}_{0j} \cdot (1 + \lambda_j \cdot \alpha)$, $\lambda_j \in [-1, 1]$, é possível notar o impacto da escolha de um equipamento de alta qualidade no valor do erro da estimativa de posição pois $\epsilon_j = \hat{d}_{0j}^2 \alpha \lambda_j \cdot (\alpha \lambda_j + 2)$.

É necessário encontrar os intervalos máximos viáveis de cada distância real d_{0j} , $j \in \{1, 2, 3\}$ de forma que elas sejam consistentes com distâncias euclidianas entre pontos presentes em \mathbb{R}^2 . Para isso, é proposta a resolução de dois modelos não convexos (6) e (7). Sejam $\bar{\lambda}_i$ e $\underline{\lambda}_i$ suas respectivas soluções ótimas para $i \in \{1, 2, 3\}$.

$$\begin{aligned} \max & \quad \lambda_0 & (6) \\ \text{S. a} & \quad CM(\vec{p}_0, p_1, p_2, p_3) = 0 \\ & \quad \vec{D}_{0i} \leq \vec{D}_{0j} + d_{ji}, & \forall i, j \in \{1, 2, 3\}, i \neq j \\ & \quad d_{ji} \leq \vec{D}_{0j} + \vec{D}_{0i}, & \forall i, j \in \{1, 2, 3\}, i \neq j \\ & \quad \lambda_0 \leq \lambda_i, & \forall i \in \{1, 2, 3\} \\ & \quad \lambda_i \in [0, 1], & \forall i \in \{0, 1, 2, 3\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \max & \quad \lambda_0 & (7) \\ \text{S. a} & \quad CM(\overleftarrow{p}_0, p_1, p_2, p_3) = 0 \\ & \quad \overleftarrow{D}_{0i} \leq \overleftarrow{D}_{0j} + d_{ji}, & \forall i, j \in \{1, 2, 3\}, i \neq j \\ & \quad d_{ji} \leq \overleftarrow{D}_{0j} + \overleftarrow{D}_{0i}, & \forall i, j \in \{1, 2, 3\}, i \neq j \\ & \quad \lambda_0 \leq \lambda_i, & \forall i \in \{1, 2, 3\} \\ & \quad \lambda_i \in [0, 1], & \forall i \in \{0, 1, 2, 3\} \end{aligned}$$

Em que:

$$CM(\vec{p}_0, p_1, p_2, p_3) = \left| \begin{pmatrix} 0 & \vec{D}_{01}^2 & \vec{D}_{02}^2 & \vec{D}_{03}^2 & 1 \\ \vec{D}_{01}^2 & 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & 1 \\ \vec{D}_{02}^2 & d_{12}^2 & 0 & d_{23}^2 & 1 \\ \vec{D}_{03}^2 & d_{13}^2 & d_{23}^2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \right| \quad (8)$$

$$CM(\overleftarrow{p}_0, p_1, p_2, p_3) = \left| \begin{pmatrix} 0 & \overleftarrow{D}_{01}^2 & \overleftarrow{D}_{02}^2 & \overleftarrow{D}_{03}^2 & 1 \\ \overleftarrow{D}_{01}^2 & 0 & d_{12}^2 & d_{13}^2 & 1 \\ \overleftarrow{D}_{02}^2 & d_{12}^2 & 0 & d_{23}^2 & 1 \\ \overleftarrow{D}_{03}^2 & d_{13}^2 & d_{23}^2 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \right| \quad (9)$$

Com $\vec{D}_{0i} = \hat{d}_{0i} \cdot (1 + \lambda_i \cdot \alpha)$ e $\overleftarrow{D}_{0i} = \hat{d}_{0i} \cdot (1 - \lambda_i \cdot \alpha)$. Note que os símbolos \leftarrow e \rightarrow sobre as distâncias D_{0i} representam, respectivamente, que à medida que o valor de λ_i cresce então os valores de \vec{D}_{0i} crescem e \overleftarrow{D}_{0i} decrescem.

De acordo com [6], para que as distâncias desconhecidas $d_{0j}, j \in \{1, 2, 3\}$ sejam distâncias entre pontos em \mathbb{R}^2 é necessário e suficiente que $CM(p_0, p_1, p_2, p_3) = 0$ e que as desigualdades triangulares sejam respeitadas, pois as distâncias conhecidas $d_{ij}, i, j \in \{1, 2, 3\}$ foram tomadas de pontos que pertencem a \mathbb{R}^2 (ou seja, são conhecidas as localizações exatas de cada sensor âncora).

Uma vez encontrados os intervalos máximos, delimitado que as distâncias reais d_{0j} podem pertencer, para todo $j \in \{1, 2, 3\}$, resta encontrar as coordenadas $x_0, y_0 \in \mathbb{R}$ do alvo. Com esse intuito, o PGD pode ser formulado como o problema (10).

$$\begin{aligned} \min & \quad \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 \\ \text{S. a} & \quad (p_{ix} - x)^2 + (p_{iy} - y)^2 \leq \hat{d}_{0i}^2 \cdot (1 + |\lambda_i| \cdot \alpha)^2 \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \\ & \quad (p_{ix} - x)^2 + (p_{iy} - y)^2 \geq \hat{d}_{0i}^2 \cdot (1 - |\lambda_i| \cdot \alpha)^2 \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \\ & \quad \lambda_i \in [-\bar{\lambda}_i, \bar{\lambda}_i] \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \end{aligned} \quad (10)$$

Esse modelo encontra as coordenadas do alvo de forma com que a estimativa da distância real esteja próxima a leitura de distância obtida pelos equipamentos.

4 Testes Computacionais

Para determinar a eficiência da metodologia foram geradas 1.000 coordenadas de alvos aleatórios em que o alvo i tem coordenadas tais que:

$$(x_i, y_i) \in \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x \in [-25, 70], y \in [-20, 20]\} \quad (11)$$

As instâncias foram geradas e o modelo implementado utilizando MATLAB (*R2016a* Version: 9.0). Os modelos matemáticos foram resolvidos utilizando a função *fmincon* do toolbox de otimização 8.0.

A metodologia proposta obteve melhor localização em **59%** dos casos e tempo de execução melhor em **53,4%**, se comparado com a metodologia proposta pelo artigo referência. A qualidade do método criado foi verificada a partir do número de vezes que cada um dos alvos foi localizado com um erro menor do que o cometido pela abordagem de [2]. Na Tabela 1 é possível perceber que os dois primeiros quartis dos erros cometidos pelo método proposto são menores do que os quartis dos erros cometidos pela metodologia de [2]. A Figura 2 mostra um histograma dos 90% menores valores de erro cometido pela abordagem proposta e o erro cometido pela abordagem de [2].

Tabela 1: Estatística do erro na localização de alvos utilizando diferentes abordagens.

	Método de [2]	Método Proposto
P.Q.	0.8301	0.6247
S.Q.	1.4337	1.1838
T.Q.	2.9131	3.1707

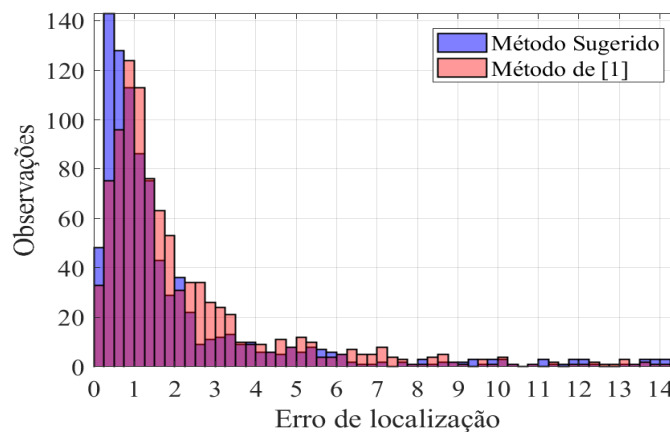


Figura 2: Histograma do erro cometido pela abordagem sugerida e pela metodologia apresentada por [2].

Tabela 2: Estatística do tempo necessário para localização de alvos utilizando diferentes abordagens.

	Método de [2]	Método Proposto
P.Q.	0.6016	0.3445
S.Q.	0.6024	0.5637
T.Q.	0.6035	1.0222

Pela Tabela 2 é possível notar que nos dois primeiros quartis o método proposto teve tempo de execução menor do que o de [2].

5 Conclusões e Próximos Estudos

A metodologia proposta trouxe a utilização do problema de geometria de distâncias para o contexto de localização de alvos sob incerteza, utilizando modelos de incerteza mais próximos da realidade da aplicação.

Os resultados demonstram a eficácia da abordagem pois além de considerar novas informações do problema, encontra soluções viáveis, teoricamente consistentes, melhores e em menor tempo do que as presentes na literatura. A escalabilidade da metodologia quanto ao número de sensores âncora e dimensão de localização (localização em \mathbb{R}^3) serão temas de pesquisas futuras.

Referências

- [1] IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, 1:1–3534, 2016. DOI:10.1109/IEEESTD.2016.7786995.
- [2] M. Cao, A. S. Morse, and B. D. O. Anderson. Sensor Network Localization with Imprecise Distances. *System and Control Letters*, 55:887–893, 2006. DOI: 10.1016/j.sysconle.2006.05.004
- [3] B. Gomes, and C. M. R. Coelho. *Panorama da inovação: Indústria 4.0*. Sistema FIRJAN, Rio de Janeiro, 2016.
- [4] L. Liberti, C. Lavor, A. Mucherino, and N. Maculan. Molecular distance geometry methods: From continuous to discrete, *International Transactions in Operational Research*, 18:33–51, 2011. DOI: 10.1111/j.1475-3995.2009.00757.x.
- [5] G. Mao, B. Fidan, and B. D. O. Anderson. Wireless sensor network localization techniques, *Computer Networks*, 51:2529–2553, 2007. DOI: 10.1016/j.comnet.2006.11.018.
- [6] G. A. Rezende, Explorando a Dualidade em Geometria de Distâncias. Tese de Doutorado, IMECC/UNICAMP, 2014.