

修士論文

ノード間の接続関係を用いた 屋内位置推定方式

平成 30 年度修了

三重大学大学院 工学研究科
博士前期課程 情報工学専攻

加藤 有真

目次

はじめに	1
第1章 屋内位置推定方式	2
1.1 Triangulation(三点測位)	2
1.2 Fingerprinting	3
1.3 PDR(Pedestrian Dead-Reckoning)	4
第2章 既存方式	5
2.1 SOL(Self-Organizing Localization) アルゴリズム	5
2.1.1 多次近傍ノードによる位置修正	6
2.1.2 トポロジ矛盾判定	7
2.1.3 絶対座標変換	10
2.2 大域 SOL	11
2.3 局所 SOL	11
2.4 既存方式の問題点	12
第3章 提案方式	13
3.1 初期位置決定	13
3.1.1 初期位置決定の具体例	15
3.2 推定位置矛盾判定	16
3.3 推定位置矛盾判定を用いた位置修正	17
3.3.1 位置修正の具体例	19
3.4 推定位置の更新	20
3.5 推定位置の壁際への移動	20
3.6 位置修正の終了条件	20
第4章 評価実験	21
4.1 評価	23

おわりに	24
謝辞	25
参考文献	26
付録	27
1 提案方式 [5] の実行結果	27

はじめに

近年，スマートフォンやタブレット等のスマートデバイスが普及し，マップアプリでのナビゲーション等の位置情報を利用したサービスが広く利用されている．開けた屋外では GPS を用いて高精度な位置推定を行うことができる．また，準天頂衛星システムの運用により，ビルの間や山間部でも十分な精度が出るようになって期待されている．しかし，GPS を用いた位置推定では，人工衛星からの電波を端末で受信し，送信時刻と受信時刻の差から人工衛星と端末の擬似距離を求め，複数の人工衛星との擬似距離が分かることで端末の位置を推定する．そのため，屋内では人工衛星と端末の間に天井や壁といった障害物が存在し，衛星からの電波を直接受信できないため，GPS を用いた高精度な位置推定ができない．

そのため，人工衛星からの電波の代わりに AP (Access Point) からの電波強度を用いて AP と端末の距離を推定し，複数の AP からの距離の交点を推定位置とする方式，推定領域において AP からの電波強度を綿密に収集し，データベースとのマッチングにより位置推定を行う方式や，スマートデバイスに搭載されたセンサを用いた方式などが提案されている [1][2]．これらの方式では，設備やデータベース作成にコストがかかるため，接続関係を用いた位置推定方式が研究されている [3]．

本稿では第 1 章で屋内位置推定方式である Triangulation，Fingerprinting，PDR について概説し，第 2 章で接続関係を用いた位置推定方式について説明する．第 3 章で既存方式と同様の想定環境において，初期位置決定処理の追加と，矛盾判定を更新し，矛盾判定を用いた位置修正を行う方式の提案を行い，第 4 章でシミュレーションを行い，評価をする．

第 1 章

屋内位置推定方式

屋内位置推定方式である Triangulation , Fingerprinting , PDR について概説する .

1.1 Triangulation(三点測位)

複数の AP から電波を受信し , 各 RSSI(Received Signal Strength Indicator:受信電波強度) から各 AP と端末の距離を推定する . 3 点以上の AP が存在すれば円周の交点に端末が存在すると推定できる . GPS もこの方式であり , 人工衛星からの電波を用いている . 屋内での三点測位では , 主に Wi-Fi の電波を用いている . しかし , 推定を行う環境において , どこでも 3 点以上の AP の電波を取得できる必要があり , また , RSSI は電波の屈折や反射の影響を受けるため , 屋内での推定精度は低くなってしまう .

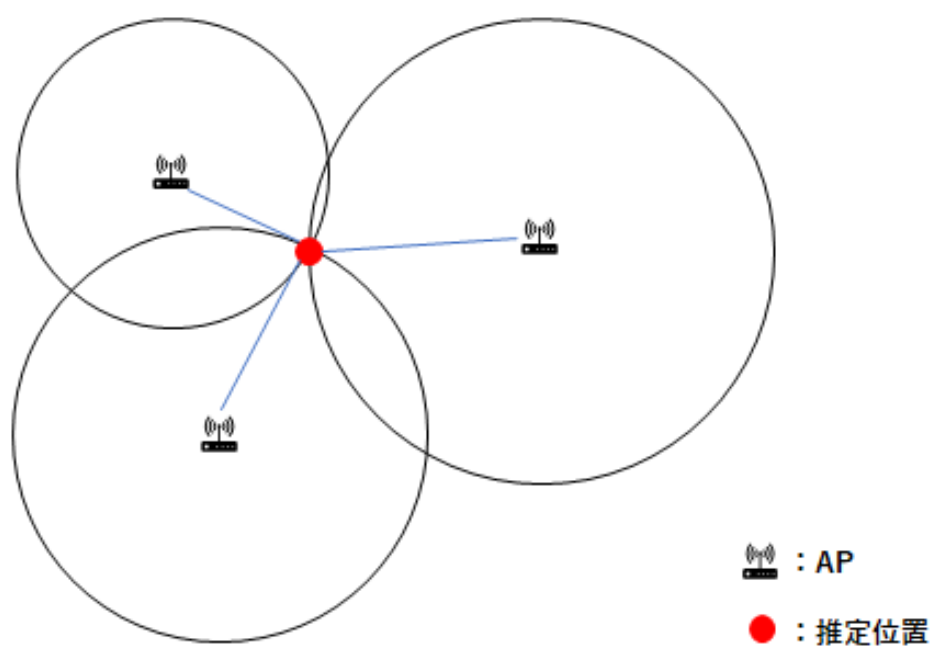


図 1 三点測位

1.2 Fingerprinting

事前に推定を行う領域において，各 AP からの RSSI を取得し，データベース化する．位置推定時は，取得した RSSI とデータベースとのパターンマッチングにより推定を行う．事前のデータ収集を綿密に行うことで三点測位よりも高精度な位置推定が可能である．しかし，事前にマップを作成するコストがかかり，また，環境が変化するとマップを再構築する必要がある．

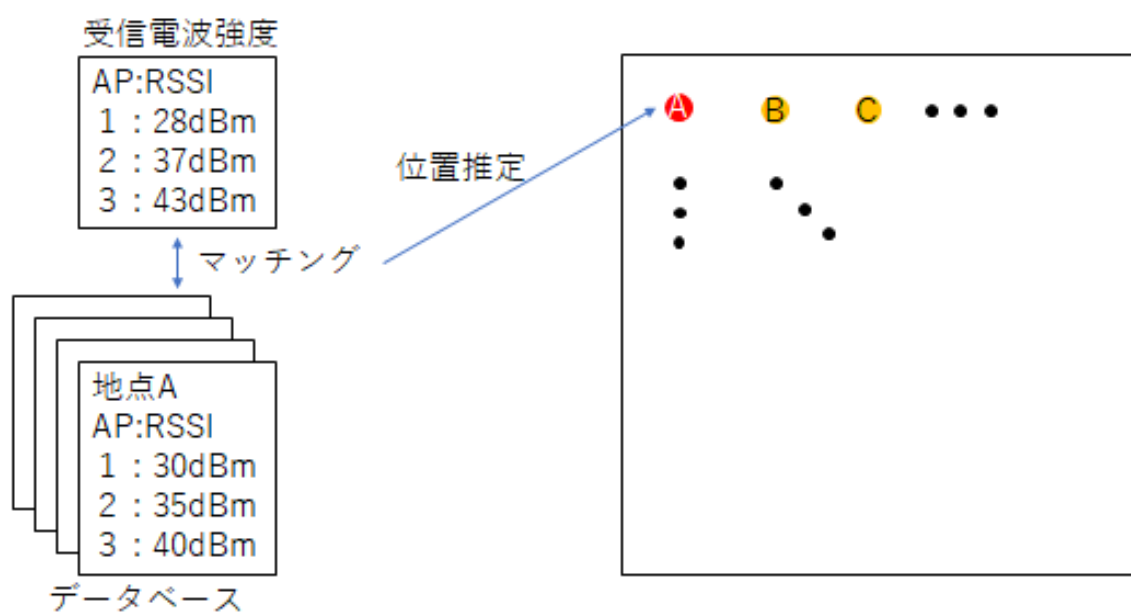


図 2 Fingerprinting

1.3 PDR(Pedestrian Dead-Reckoning)

移動開始地点を基準点として、加速度センサの2重積分を用いて移動量の推定をし、現在地の推定を行う。しかし、相対測位方式のため、誤差が蓄積してしまい、一定間隔ごとに補正を行う必要がある。また、移動開始地点の推定や補正のために、絶対位置を高精度に推定する必要があるが、相対測位であるPDR単独では不可能である。



図3 PDR

第 2 章

既存方式

以下の環境を想定する．十分な数のノードが存在し，アンカーノード（位置が既知なノード）が 3 点存在する．各ノードはスマートフォン等の無線通信可能な機器を人が所持しており，ブロードキャストにより各ノードは通信半径内に存在するノードが分かり，その情報を集約できる．また，各ノードはモーションセンサにより自身の移動・停止状態を判別できる．

2.1 SOL(Self-Organizing Localization) アルゴリズム

多次近傍ノードによる位置修正を繰り返すことで推定位置を得る．ただし，各ノードの近傍ノード数の偏りが大きい場合，SOL アルゴリズムは位置推定精度の劣化の主要因となるトポロジ矛盾を起こす場合がある．したがって，位置修正終了後に推定位置のトポロジ矛盾を確認する．また，位置修正の繰り返しによる推定位置はネットワーク内における相対位置である．この相対位置をアンカーノードの真位置と推定位置を用いて絶対位置へ変換する．

2.1.1 多次近傍ノードによる位置修正

ノード i に対して N ホップとなるノード群からランダムにノードを 1 つ選択し, ノード n とする. ノード間距離をホップ数 N とし, ノード n を用いたノード i の修正 t 回目における修正ベクトル $V_i^{\{N\}}(t)$ を次のように定義する.

$$V_i^{\{N\}}(t) = \frac{N - |w_i(t) - w_n(t)|}{|w_i(t) - w_n(t)|} (w_i(t) - w_n(t))$$

$w_i(t)$: ノード i の推定位置 (x_i, y_i)

$w_n(t)$: ノード n の推定位置 (x_n, y_n)

$|w_i(t) - w_n(t)|$: ノード i とノード n の距離

$(w_i(t) - w_n(t))$: $(x_i - x_n \quad y_i - y_n)$

この修正ベクトル $V_i^{\{N\}}(t)$ を用いてノード i の位置修正を次のように行う.

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha(t) * (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{N\}}(t)) & (t < \tau_N), \\ w_i(t) + \alpha(t) * (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{N-1\}}(t)) & (\tau_N \leq t < \tau_{N-1}), \\ \vdots & \\ w_i(t) + \alpha(t) * (V_i^{\{1\}}(t) + V_i^{\{2\}}(t)) & (otherwise) \end{cases}$$

$$\alpha(t) = \eta * \alpha(t-1) \quad (0 < \eta < 1)$$

ただし, τ_N は位置修正に用いる修正ベクトルを切り替える修正回数の閾値, $\alpha(t)$ は t 回目の修正における学習係数, η は減衰定数である. この一連の処理を全ノードに対して行う.

2.1.2 トポロジ矛盾判定

ノードの真位置は不明であるため，位置推定誤差は算出できない．そのため，位置推定誤差の代わりに以下のトポロジ矛盾判定を行い，矛盾の少ない位置を推定する．

図 4 にトポロジ矛盾の場合を示す．ノード i ，ノード i の 1 次近傍ノード j ，ノード i の 2 次近傍ノードかつノード j の 1 次近傍ノード l のそれぞれの推定位置を w_i, w_j, w_l とし，ノード l の真位置を W_l とする． w_l はトポロジ矛盾となる位置である．

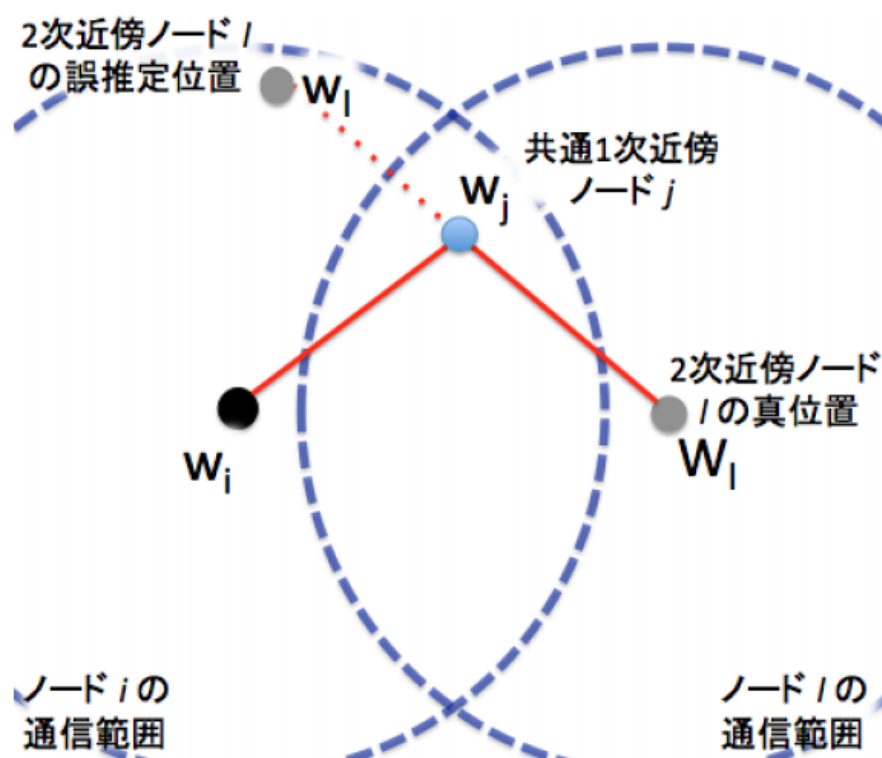


図 4 トポロジ矛盾の例 (a)

図 5 に示すように, w_i と w_j において, 線分 $\overline{w_j - w_i}$ の垂直二等分線を用いて, w_i と w_j のいずれかに近い領域に空間を 2 分割する. ノード l はノード i の 2 次近傍ノードであるため, w_l は w_j に近い領域に存在しなくてはならない. したがって, $|w_l - w_i| \leq |w_l - w_j|$ である場合, トポロジ矛盾と判定する.

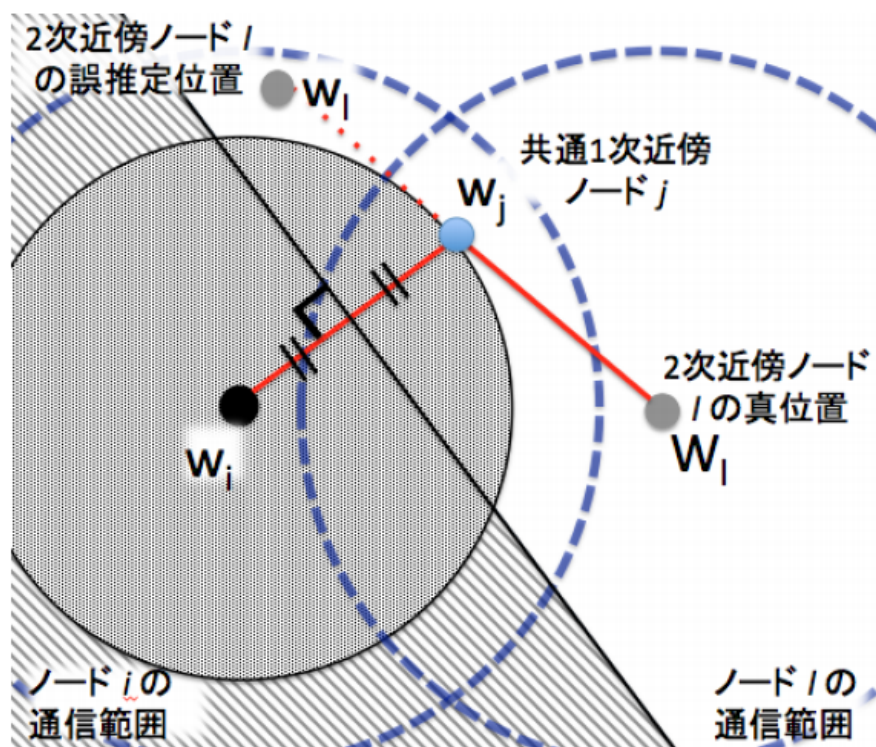


図 5 トポロジ矛盾の例 (b)

2.1.3 絶対座標変換

アンカーノードの真位置 $W_A = (X_A, Y_A)$ は推定位置 $w_A = (x_A, y_A)$ を用いて以下のように表される .

$$\begin{aligned} X_A &= ax_A + by_A + t_x \\ Y_A &= cx_A + dy_A + t_y \end{aligned}$$

アンカーノードは 3 点あるため , 構成される 6 本の連立方程式より 6 つの係数 a, b, c, d, t_x, t_y を求めることができる . 得られた係数を用いて , 以下の処理をすべてのノードに対して行うことで , 2.1.1 の処理により求めた推定位置 $w_i = (x_i, y_i)$ を絶対座標 $\hat{w}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ へ変換する . これを位置推定の結果とする .

$$\begin{pmatrix} \hat{x}_i \\ \hat{y}_i \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & t_x \\ c & d & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix}$$

2.2 大域 SOL

十分な推定時間を利用できるため，次の位置推定処理サイクルを複数回実施して，トポロジ矛盾の最も少ない位置推定結果を求める．

- 多次近傍ノードを用いた位置修正
- 絶対座標変換
- トポロジ矛盾判定
- 最小のトポロジ矛盾の割合と推定位置を記憶

2.3 局所 SOL

以下の処理の削減によって計算時間を短縮し，かつ精度の維持を図る．

- 停止ノードは大域 SOL により高精度に位置推定されていると仮定し，移動ノードのみを位置修正の対象とする．また，移動ノードの位置修正には停止ノードのみを用いる．
- 移動ノードの想定速度において，局所 SOL 実行周期当たりの移動距離は小さく，局所的な移動にとどまるため，近傍トポロジによる位置推定が可能である．よって，1 次近傍ノードと 2 次近傍ノードのみを用いた位置修正を行う．

2.4 既存方式の問題点

図 7 に平均誤差のシミュレーション結果を示す．

大域 SOL を 10 サイクル毎に，局所 SOL を 1 サイクル毎に行っているため，1 サイクル当たりの推定精度にばらつきがある．また，ノード数が少ない場合の誤差が大きく，推定精度が十分でない．

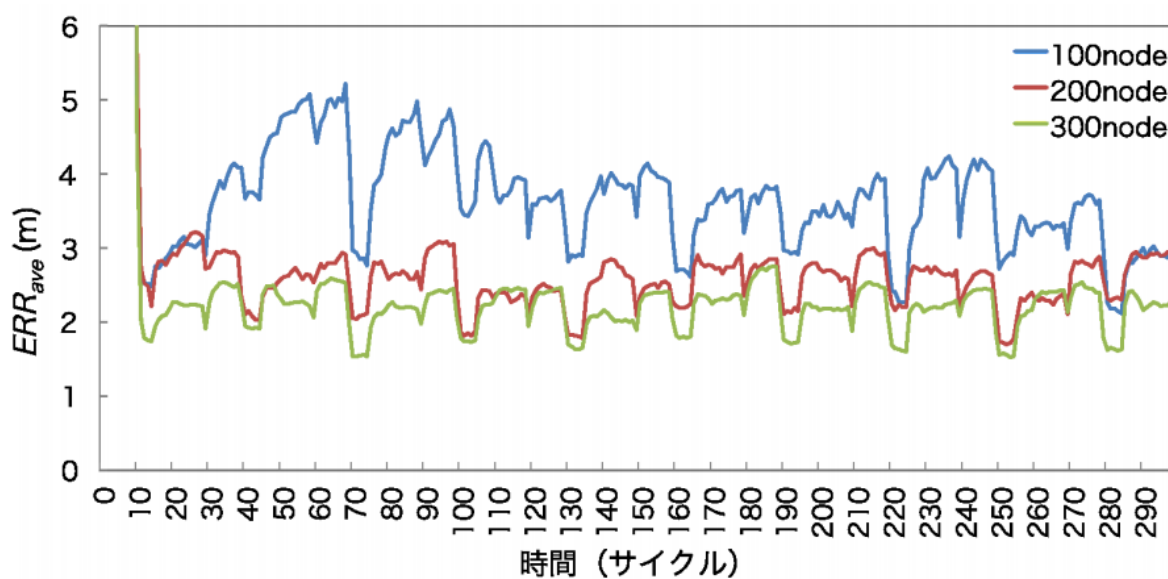


図 7 平均誤差

第 3 章

提案方式

既存方式と同様の環境を想定する．自身の 1 ホップと N ホップの 2 つのノードの情報ではなく，より多くの情報がある矛盾判定を用いて位置修正を行う方式を提案する．また，既存方式では使用していたモーションセンサによる移動・停止の判断は提案方式では必要としない．

3.1 初期位置決定

既存方式では初期位置を推定領域からランダムに決定していたが，提案方式では各ノードとアンカーノードとのホップ数の関係から，初期位置が存在し得る領域を決定する．推定を行う領域において，ノードをランダムに配置した場合を考える．ノードの接続関係から配置されたノードと 3 点のアンカーノードとのホップ数を計算する．3 点のアンカーノードとのホップ数が同じノードをグルーピングする．これをすべてのホップ数の関係ごとに行う．この処理をノードの配置に偏りを持たせた場合について複数回行い，3 点のアンカーノードとのホップ数の関係が存在しない可能性を減らす．

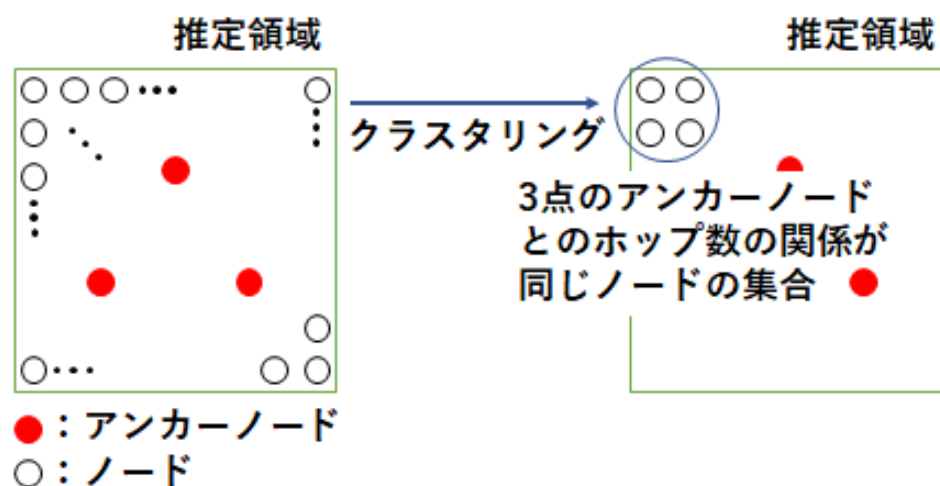


図 8 初期位置決定のためのグルーピング

位置推定時は、すべてのノードの接続関係を集約する。この接続関係から各ノードと3点のアンカーノードとのホップ数を計算する。ホップ数の関係が同じグループの中からランダムに1つを選び、その位置を初期位置とする。ホップ数の関係が同じであるグループにノードが存在しなかった場合は、いずれかのアンカーノードとのホップ数をインクリメントまたはデクリメントして一致するグループが存在すれば、そのグループから初期位置を選択する。存在しなければ、初期位置を領域の中からランダムに決定する。2サイクル目以降は直前のサイクルの位置推定結果を初期位置とする。

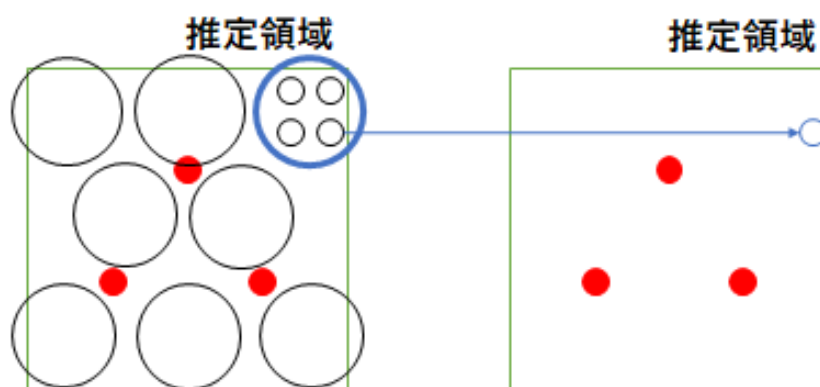


図9 接続関係を用いた初期位置決定

3.1.1 初期位置決定の具体例

図 10 に初期位置決定の具体例を示す．あるノードが 3 つのアンカーノードとのホップ数の関係が $(2,3,5)$ である場合について考える．事前にノードをランダムに配置した場合のアンカーノードとのホップ数の関係の中から $(2,3,5)$ のグループを探す．その中に複数の候補が存在するため，ランダムに 1 つを選び，初期位置とする．アンカーノードとのホップ数の関係が存在しない場合は，推定領域の中からランダムに初期位置を決定する．

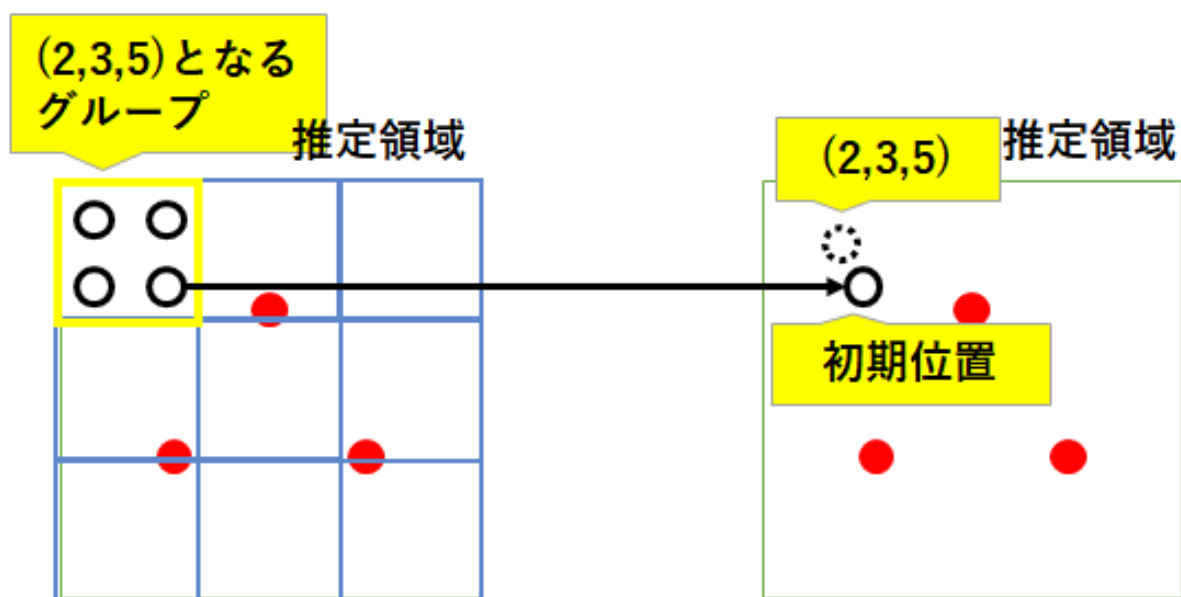


図 10 接続関係を用いた初期位置決定の具体例

3.2 推定位置矛盾判定

位置推定では真位置を知ることができないため、推定結果を評価する方法として、推定位置矛盾判定を用いる。推定位置矛盾の割合が少ない推定位置が高精度な推定結果である。

各ノードの接続関係からノード間のホップ数が分かる。この情報を用いて、ある2つのノードの関係が、

- (A) 1 ホップの時にノードの推定位置間の距離が通信半径よりも大きい場合
- (B) 2 ホップの時にノードの推定位置間の距離が通信半径以下の場合
- (C) 2 ホップの時にノードの推定位置間の距離が通信半径の2倍よりも大きい場合
- (D) 現在が1ホップ、1サイクル前が2ホップの時にノードの推定位置間の距離が(通信半径 - 1サイクル当たりの移動量)より小さい場合
- (E) 現在が2ホップ、1サイクル前が1ホップの時にノードの推定位置間の距離が(通信半径 + 1サイクル当たりの移動量)より大きい場合

以上の5つの場合について推定位置が矛盾していると判定する。1, 2ホップの関係となるノードの組み合わせすべてに対して推定位置矛盾判定を行う。

3.3 推定位置矛盾判定を用いた位置修正

修正回数 $t + 1$ 回目におけるノード i の推定位置 $P_i(t + 1) = (x_i, y_i)$ は以下の式により修正される．

$$P_i(t + 1) \rightarrow P_i(t) + \alpha(t) * \frac{M_i}{M_{MAX}}$$

ここで $\alpha(t)$ は修正回数 t 回目における最大修正量で

$$\alpha(t) = MAX((a - b * t), c)$$

で求める．

また，初期位置決定に失敗したノードが存在する場合は，真位置から大きくずれたノードが存在するため，一定時間 a を大きな値に設定し，位置修正量を大きくする．

c は位置修正の処理を行い，矛盾の割合が改善されなかった回数 t_{same} が一定回数 $(e - N * f)$ を超えた場合に更新される最小修正量で

$$c \rightarrow c - g$$

で求める．

M_{MAX} は

$$M_{MAX} = (MAX(\{abs(m_{x_i}) | 1 \leq i \leq N\}), \\ MAX(\{abs(m_{y_i}) | 1 \leq i \leq N\}))$$

で求める．

$M_i = (m_{x_i}, m_{y_i})$ はノード i の修正量係数で、以下で求める。

$$M_i = \sum_{j=1}^N d * (m_{x_{ij}}, m_{y_{ij}})$$

$$d = \begin{cases} -1 & (\text{ノード } i \text{ とノード } j \text{ の関係が矛盾 A, C, E の場合}) \\ 1 & (\text{ノード } i \text{ とノード } j \text{ の関係が矛盾 B, D の場合}) \end{cases}$$

$$m_{x_{ij}} = \begin{cases} 1 & (x_i > x_j) \\ 0 & (x_i = x_j) \\ -1 & (x_i < x_j) \end{cases}$$

$$m_{y_{ij}} = \begin{cases} 1 & (y_i > y_j) \\ 0 & (y_i = y_j) \\ -1 & (y_i < y_j) \end{cases}$$

$m_{x_{ij}}$ と $m_{y_{ij}}$ がともに 0 の場合は矛盾と判定されていても、位置修正が行われない可能性がある。しかし、矛盾が発生しているため、どちらかのノードは真位置から遠いと判断できる。そのため、 $m_{x_{ij}}$ と $m_{y_{ij}}$ の両方をランダムに 1 または -1 にし、位置修正が行われるようにする。

また、2 つのノードの関係に対して、矛盾しているかを判定しているため、真位置に近いノードも修正量係数が変動する。そのため、矛盾が大きいノードの位置のみを修正する。

3.3.1 位置修正の具体例

図 11 に位置修正の具体例を示す．ここではノード x を位置修正する場合を考えている．ノード x とノード i は 1 ホップの関係であるが，推定位置間の距離が通信半径より大きいため，

$$d = -1$$

$$(m_{xx_i}, m_{yx_i}) = (1, -1)$$

と求まる．ノード j の場合についても同様に，

$$d = 1$$

$$(m_{xx_j}, m_{yx_j}) = (-1, 1)$$

と求まり，ノード k の場合についても，

$$d = -1$$

$$(m_{xx_k}, m_{yx_k}) = (-1, -1)$$

と求まり，

$$M_x = (-1) * (1, -1) + (1) * (-1, 1) + (-1) * (-1, -1)$$

$$= (-1, 3)$$

となる．係数 $\alpha(t)$ をかけた値が位置修正量となり， x の推定位置は図 11 において左下に位置修正が行われる．

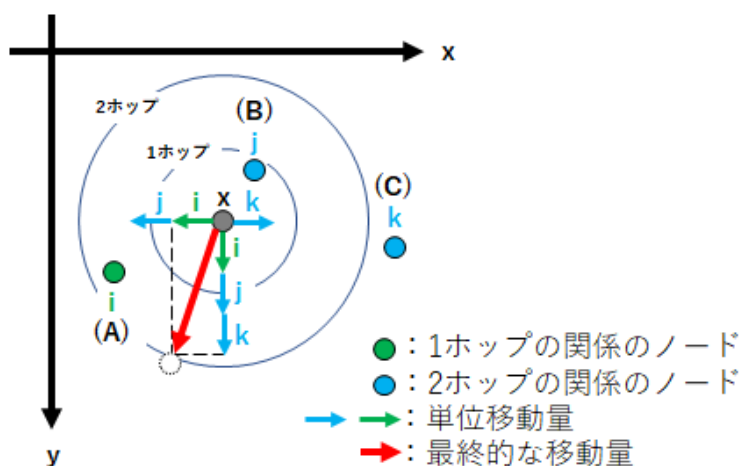


図 11 位置修正の具体例

3.4 推定位置の更新

位置修正の処理終了後，推定位置矛盾判定を行い，矛盾の割合が減少していた場合，推定位置を更新する．その後再び位置修正の処理を行う．この一連の処理を繰り返す．

3.5 推定位置の壁際への移動

ノードの真位置が壁際であり，ノードの初期位置決定に失敗し，ノードの推定位置が壁から垂直に通信半径の2倍程度の距離である場合に推定位置が真位置に近づかない場合がある．1ホップの関係のノードは真位置に近づけるように，2ホップの関係のノードは遠ざけるように作用する．そのため，ノードの分布によっては，推定位置が真位置に近づかない可能性がある．そのため，矛盾が多いノードの推定位置を壁付近とし，推定位置矛盾判定を行い，矛盾が少なくなった場合は推定位置を更新する．

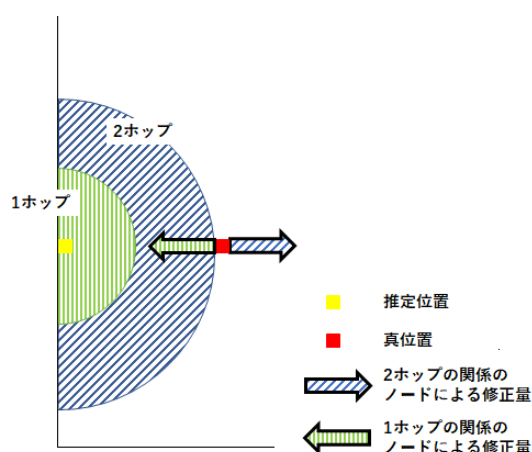


図 12 推定位置の壁際への移動

3.6 位置修正の終了条件

修正回数 t が

$$t \geq l - N * p$$

となる，または，最小修正量 c が

$$c \leq 0$$

となった場合，処理を終了する．

第 4 章

評価実験

シミュレーション諸元を表 1 に示す．各ノードの初期配置はランダムに決定し，アンカーノードとの接続関係を用いた初期位置決定の処理によりおおよその初期位置を決定している．

表 1 シミュレーション諸元

w(推定領域の横の長さ)	50m
h(推定領域の縦の長さ)	50m
ノードの通信半径	10m
移動ノードの割合	0.5
1 サイクル当たりの移動量	1m
ノードの移動/停止遷移間隔	15 サイクル
N(ノード数)	100,200,300
シミュレーション期間	1000 サイクル
a(初期位置決定成功時)	2
a(初期位置決定失敗時)	25
b	0.01
c	$\frac{300}{N}$
e	700
f	1.5
g	0.5
l	10000
p	25
アンカーノードの座標	$\left(\frac{w}{2}, \frac{h}{4} \right)$ $\left(\frac{w}{4}, \frac{3 * h}{4} \right)$ $\left(\frac{3 * w}{4}, \frac{3 * h}{4} \right)$

表 2 にシミュレーションを 10 回行った結果の平均を示す．ここで，3 点のアンカーノードとのホップ数の関係が存在する場合，初期位置決定に成功したと定義する．

表 2 10 回シミュレーションを行った結果の平均

	ノード数		
	100	200	300
初期位置決定成功率 (%)	100	100	100
初期平均誤差 (m)	5.43	4.91	4.56
平均誤差 (m)	1.36	0.75	0.57

図 13 に平均誤差，図 14 に最大誤差のシミュレーション結果を示す．

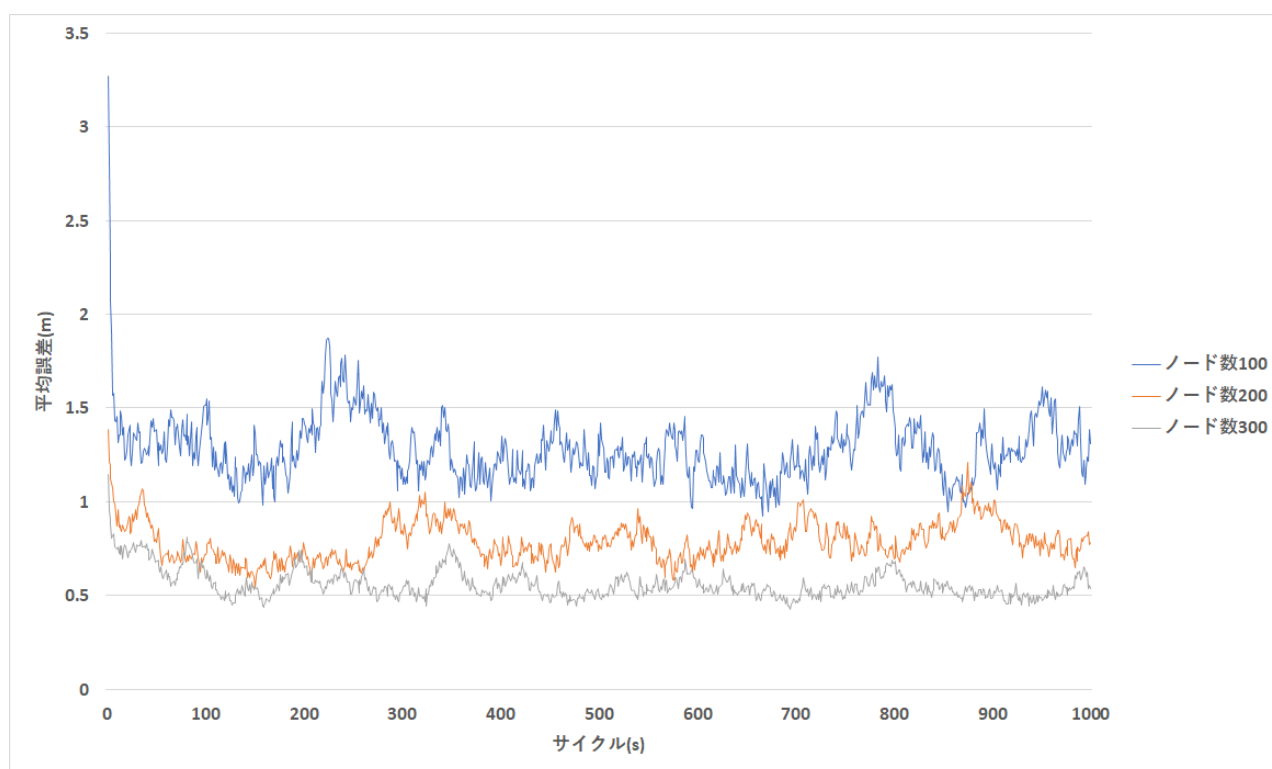


図 13 平均誤差

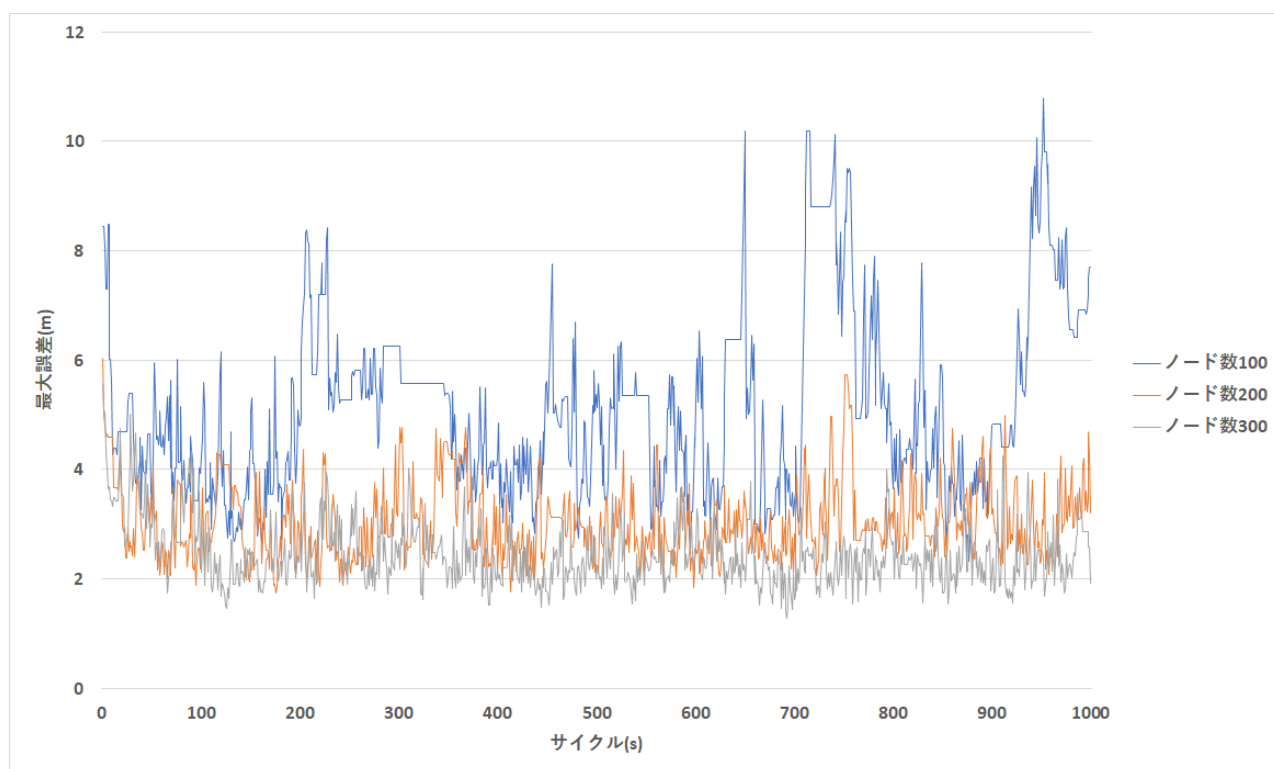


図 14 最大誤差

4.1 評価

既存方式と比べ、すべてのノード数で精度が向上している。また、サイクルごとの精度のばらつきも少なく、ノード数が少ない時の精度を大きく改善することができている。また、提案方式はモーションセンサによる端末の移動・停止状態の判別を必要としないため、端末の消費電力を削減することができる。

おわりに

接続関係のみを用いた位置推定方式を提案した．シミュレーションにより，提案方式は既存方式と比べ，1 サイクル当たりの推定精度のばらつきが少なく，高精度な位置推定を行えていることを示した．

今後の課題として，実際の環境での利用を考えた場合，最大誤差が大きいため，最大誤差の低減についても考える必要がある．また，今回のシミュレーションでは何もない領域を想定したが，壁や端末を利用する人による通信半径の変化による位置推定精度への影響を調査する必要がある．

謝辞

日ごろから多くの御指導を頂きました太田義勝教授，鈴木秀智准教授，杉浦徳宏准教授に深く感謝いたします．そして，日頃何かとお世話になりました落合美子事務員に感謝いたします．また，本論文作成にあたって特にお世話になりました太田義勝教授に深く感謝いたします．最後に，日頃から熱心に討論して頂いた研究室の諸氏に感謝いたします．

参考文献

参考文献

- [1] 水野 忠則，内藤 克浩，“モバイルネットワーク”，共立出版，2016
- [2] 西尾 信彦，“図解よくわかる屋内測位と位置情報”，日刊工業新聞社，2018
- [3] 北之馬 貴正，安達 直世，滝沢 泰久，“大規模屋内施設における集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式 SmartFinder とその評価”，情報処理学会，研究報告モバイルコンピューティングとパーベシブシステム (MBL)，vol20，pp1-8，2016
- [4] 北之馬 貴正，新居 英志，安達 直世，滝沢 泰久，“SmartFinder：大規模屋内施設における集約型自己組織化スマートデバイス位置推定方式とその評価”，情報処理学会論文誌，vol59，No.2，pp462-472，2018
- [5] 加藤 有真，太田 義勝，杉浦 徳宏，鈴木 秀智，“ノード間の接続関係を用いた屋内位置推定方式の提案と評価”，情報処理学会第 80 回全国大会 (5s-6)，2018
- [6] 加藤 有真，太田 義勝，鈴木 秀智，杉浦 徳宏，“ノード間の接続関係と履歴を用いた屋内位置推定方式”，平成 30 年度 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会 (L2-3)，2018

付録

1 提案方式 [5] の実行結果

初期位置決定において，一様に配置した場合の一度のみを用いて行っている．また，推定位置矛盾判定において，(A)，(B)，(C) のみを用いている．

平均誤差を図 15 に，最大誤差を図 16 に示す．シミュレーション諸元は表 1 と同じである．

表 3 10 回シミュレーションを行った結果の平均

	ノード数		
	100	200	300
初期位置決定成功率 (%)	96.8	99.9	100
初期平均誤差 (m)	6.57	4.74	4.59
平均誤差 (m)	1.49	0.87	0.68

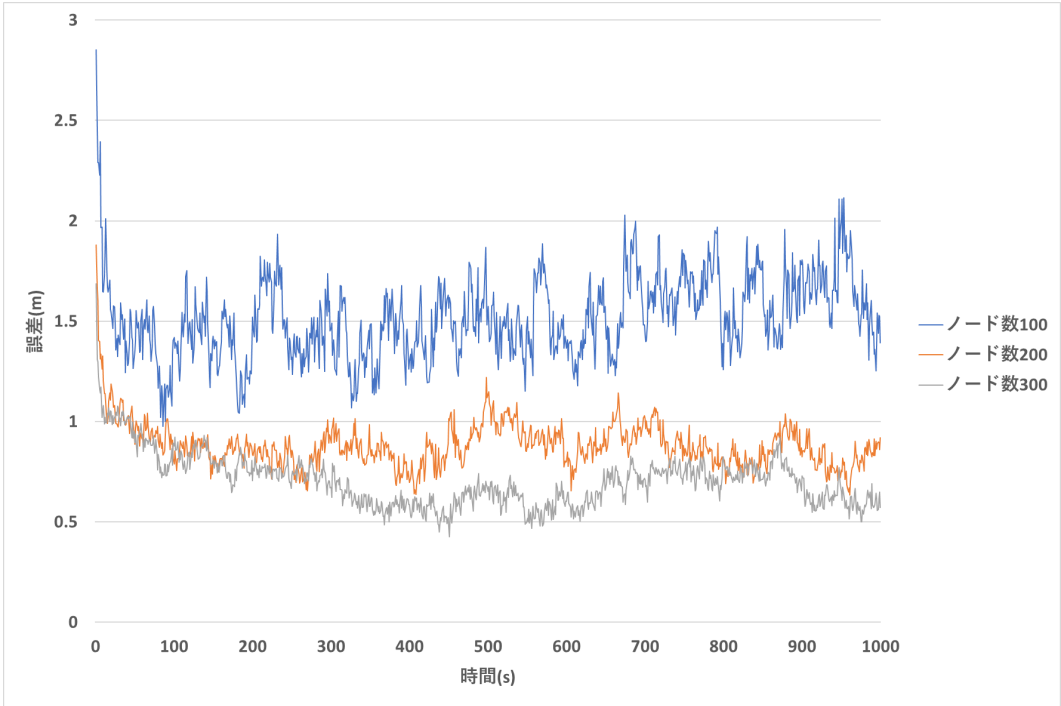


図 15 平均誤差

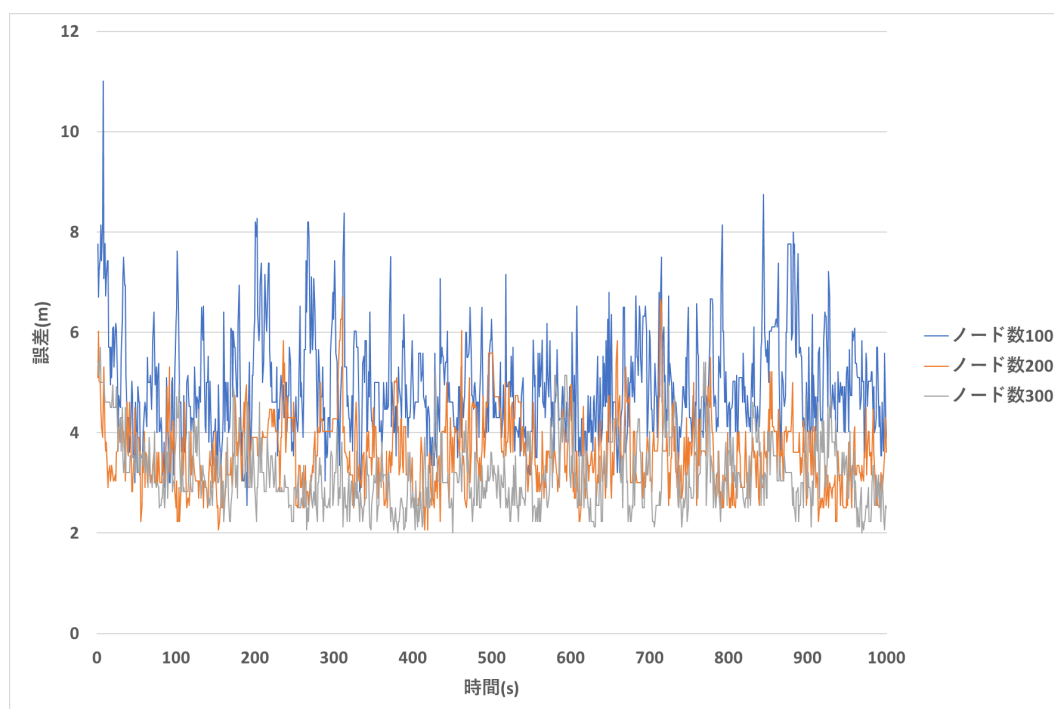


図 16 最大誤差