1Y-02

電波による相対距離測定に基づいた屋内位置推定

安部 北斗 *
法政大学大学院 情報科学研究科 *

廣津　登志夫 †
法政大学 情報科学部 †

1. 序論

現在スマートフォンをはじめとした様々な機器での位置情報の取得にはGPSが主に使われている．しかし，屋内では衛星からの電波がさえぎられるため，GPSでは正確な位置推定が困難であり他の推定手法が必要となる．屋内位置推定手法の一つとして電波の位相差を使用するものが存在する．電波を送信する際に使用される搬送波の位相の違いから，信号を送信してから受信するまでの伝搬時間を測定する．求めた伝搬時間に電波の速度を掛け合わせることで距離の変動を測定することが可能である．この手法を用いる場合，空間内に設定した複数の基準点からの距離を用いて屋内位置を推定することが可能とは考えられるが，基準点における距離情報の初期化が必要になる．そこで，本研究では推定に必要な事前情報を最小限にし使用者の負担が少ない位置推定手法を提案する．位置の推定は双方向通信による時刻同期技術であるWi-Wiを使用して，端末間の相対距離を測定することにより対象の位置推定を行う．またモジュールをペアにして配置するなどの工夫をすることにより，モジュールの位置を事前に測定することなく位置推定を行えるシステムを実現する．

2. 位相差による高精度な距離推定

送信機から送信された信号を受信機で測定することにより，送信機から受信機の間で変化した位相が測定可能である．通信に使用している電波の周波数が既知の場合，1周期に電波が進む距離がわかるため距離の変動が測定可能である．位相の変化を知るためには，送信機と受信機の時刻が同期されている必要がある．時刻同期を高精度に行う手法として，Wireless Two-Way Interferometry (Wi-Wi)[1] が存在する．Wi-Wiは双方向無線通信により伝搬時間を高精度に測定する手法である．双方向に伝搬時間を測定することにより，互いの時計のずれを計測し，そのずれを修正することで2端末間で時刻の同期を行うことが可能となる．

2つの端末 A, B で双方向通信を行う場合，端末 A に対して端末 B の時間の遅れを t_c とし，ある信号が基地局 A, B に届いた時刻をそれぞれ T_A, T_B とすると，端末 A から B に送ったときに測定される時刻差 t_b は

$$t_b \equiv T_B - T_A = t_c + t_d \tag{1}$$

である．同様に端末 B から A に送ったときに測定される時刻差 t_a は

$$t_a \equiv T_A - T_B = -t_c + t_d \tag{2}$$

である．二つの式を足し合わせると

$$\frac{t_a + t_b}{2} = \frac{t_c + t_d - t_c + t_d}{2} = t_d \tag{3}$$

となる．よって測定結果から時計のずれの影響がなくなり，伝搬時間 t_d を正確に測定することが可能である．伝搬時間 t_d と離の変動 l_d の関係を位相差を使用して表す．端末 B から A までに変化した位相を ϕ_A, 端末 A から B までに変化した位相を ϕ_B, 光速を定数 c とすると

$$l_d = c \cdot t_d = \{\frac{\phi_A + \phi_B}{2\pi} + K\}\frac{\lambda}{2} \tag{4}$$

となる．電波は1周期ごとに同じ波になるため，アンビギュイティである整数 K が含まれる．しかしこの K は位相を連続で測定し，位相が大きく変化した際に逆方向に 2π 分位相を変化したものとして扱うアンラップという処理で確定させることができる．そのため距離の変動を一意に測定することが可能である．

3. 距離変位を使用した屋内位置推定手法

本手法ではWi-Wiにより距離変位を測定することで位置推定を行う．基準となる基地局を一つ規定し，基地局や推定対象の相対的な位置関係を事前のキャリブレーションなしに推定する．基地局としてモジュールを4つ使用し，そのうち2ずつをペアとして一定の間隔に固定する．ペア間を結ぶ線分が一方は地面と平行に，もう一方は地面と垂直になるように配置する．推定対象となるユーザーも同じモジュールを保持して移動し，各基地局との距離の変動を測定し続ける．これらのモジュール間の距離変動を測定することで位置推定を行う．

位置の推定は各基地局で測定した距離変動に関する式を立式し，それらを合わせた連立方程式を解くことにより行う．始めに，i 番目の基地局の座標 $\boldsymbol{s}_i = (sx_i, sy_i)$ で測定した時刻 j, k での伝搬時間をそれぞれ $d_{i,j}, d_{i,k}$, 時刻 j でのユーザーの座標を $\boldsymbol{x}_j = (x_j, y_j)$ したとき，i 番目の基地局に対して時刻 j, k 間での距離変動 $D_{i,j,k}$ は

$$D_{i,j,k} = (d_{i,k} - d_{i,j})c = ||\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{s}_i|| - ||\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{s}_i|| \tag{5}$$

となる．これを複数の基地局，時刻に対して立式して連立方程式を解けば対象の位置が求まる．これらを近似して線形化したものに対して解を求める．実際の座標 $\boldsymbol{x}$ を初期値 $\boldsymbol{x'}$ とそれに対する差分 $\Delta\boldsymbol{x}$ とで表すと

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x'} + \Delta\boldsymbol{x} \tag{6}$$

となる．これらを使用して距離の差に関する関係は以下の通りとなる．

$$\begin{aligned}\Delta D_{i,j,k} = &\frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial x_k}\Delta x_k + \frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial y_k}\Delta y_k \\ &+ \frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial x_j}\Delta x_j + \frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial y_j}\Delta y_j\end{aligned} \tag{7}$$

$$\frac{\partial D_{i,j,k}}{\partial x_j} = \frac{(x_j - sx_i,)}{||\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{s}_i||} \tag{8}$$

目標となる距離の差の変化量は実際の測定値 d_{i,j,x_k} から，現在の求めてる座標と基地局の距離を減算したものになるので

$$\Delta D_{i,j,k} = D_{i,j,k} - (||\boldsymbol{x}_k^{'} - \boldsymbol{s}_i|| - ||\boldsymbol{x}_j^{'} - \boldsymbol{s}_i||) \tag{9}$$

Indoor location estimation based on relative distance measurement using radio wave
* *Graduate School of Computer and Information Sciences, Hosei University*
† *Faculty of Computer and Information Sciences, Hosei University*

Copyright ©2019 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.

となる．これらを連立方程式とし行列化すると以下の通りになる．

$$\boldsymbol{D} = \begin{pmatrix} \Delta D_{1,1,2,} \\ \Delta D_{2,1,2} \\ \Delta D_{3,1,2} \\ \Delta D_{4,1,2} \\ \vdots \\ \Delta D_{4,n-1,n} \end{pmatrix} \tag{10}$$

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial D_{1,1,2}}{\partial x_1} & \frac{\partial D_{1,1,2}}{\partial y_1} & \cdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial D_{2,1,2}}{\partial x_1} & \frac{\partial D_{2,1,2}}{\partial y_1} & \cdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial D_{3,1,2}}{\partial x_1} & \frac{\partial D_{3,1,2}}{\partial y_1} & \cdots & 0 & 0 \\ \frac{\partial D_{4,1,2}}{\partial x_1} & \frac{\partial D_{4,1,2}}{\partial y_1} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{\partial D_{4,n-1,n}}{\partial x_n} & \frac{\partial D_{4,n-1,n}}{\partial y_n} \end{pmatrix} \tag{11}$$

$$X = \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \\ \Delta y_n \end{pmatrix} \tag{12}$$

X に誤差が加わっていると仮定し，二乗和誤差が最小になるよう解を求めると

$$X = (A^T A)^{-1} A^T D \tag{13}$$

となる．ここで求めた X を現在の値に足し合わせて繰り返し処理を行い，変動が十分小さくなるなったらそれを解とする．

4. 位置推定シミュレーション

実機による測定の前に，実装した手法における位置推定の精度を確認するためにシミュレータによる推定を行った．部屋の一点を移動の開始点として既知であるとし，基地局を $(0,0,0),(0,100,0),(1000,0,0),(1000,0,100)$ に配置した場合のシミュレーション結果を図 1,2 に示す．測定される距離の変位には平均 $0cm$, 標準偏差 $0.1cm$ の正規分布に基づく誤差を加えた．正しい位置と推定した位置を比較すると，推定結果がおおむね正しい位置と一致していることがわかる．推定した位置と正しい位置との差を示したのが図 2 である．図 1 の経路に対する推定では平均 $7.52cm$, 最大で $19.22cm$ となっている．

5. まとめ

シミュレーションの結果から実装した手法により正確な位置推定が可能であることが確認できた．モジュール単体による距離変動の測定は mm オーダーで行えている条件だったが，推定結果の誤差は cm オーダーの誤差が発生していた．また，位置の差は常に一定というわけではなく，基地局に近づいた時など基地局との位置関係により推定精度が変化することが確認された．そのため，正確な位置推定を行うためには基地局の配置も考慮する必要があると考える．今回のシミュレーションでは位相差による距離変位は正確に測定できるという条件で行った．しかし，屋内で電波の位相差を測定する場合，壁などで反射した電波であるマルチパスなどにより測定される位相差に誤差が発生する場合がある．マルチパスにより位相差が間違って判定した場合，電波の半波長 (Wi-Wi のモジュールの場合約 $16cm$) 分距離変位がずれて測定されてしまい推定結果に大きな誤差が発生することが予想される．人の動きが連続的であると仮定すれば，1 サンプル測定する間に距離が急激に変化することはあまり考えられないため，そのような値を測定した場合に測定値を修正するような処理が可能ではないかと考える．また，シミュレーションでは移動の開始点を既知なものとしていたが，開始点と測定するコストを考えると開始点が未知な状態でも推定できるようにすることが必要であると考える．

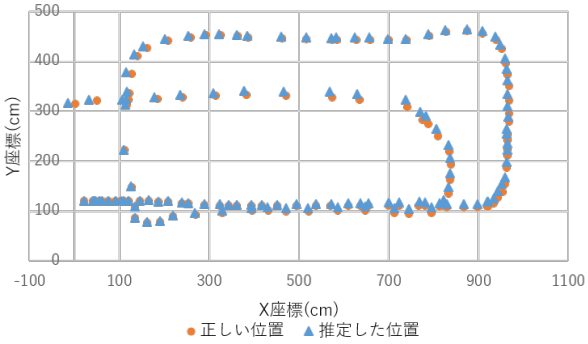


図 1. 位置推定の実験結果



図 2. 推定誤差

謝辞

本研究にご協力いただいた情報通信研究機構の志賀信泰様，安田哲様，法政大学の尾花賢教授に感謝いたします．また本研究は JSPS 科研費 JP17K00138 の助成を受けたものである．

参考文献

[1] Bhola R. Panta, Kohta Kido, Satoshi Yasuda, Yuko Hanado, Seiji Kawamura, Hiroshi Hanado, Kenichi Takizawa, Masugi Inoue, Nobuyasu Shiga “Range Variation Monitoring with Wireless Two-Way Interferometry (Wi-Wi)” arXiv:1806.02130 [eess.SP]

Copyright ©2019 Information Processing Society of Japan.
All Rights Reserved.