

CSIを用いた位置測位手法に関する初期的検討

福島 健¹ 岩崎 裕輔¹ 村上 遼¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要: ドローン技術の進歩により, 将来的には室内において多数のドローンを用いたサービスを提供することが考えられる。室内でドローンを利用する場合, ドローンの位置測位をどうするかが課題となる。室内において端末の位置測位を行う技術の研究は盛んに行われているが, 現状では精度や導入コストの観点で課題があり, ドローンの位置測位に利用することはできない。本稿では, 無線 LAN で取得可能な CSI (Channel State Information) を用いた位置測位技術について検討する。具体的には, 数十センチの誤差で位置測位が可能な Chronos[1] を改良・拡張することを試みる。まず, Chronos の位置測位手法を用いて多数のドローンを効率的に位置測位するための位置測位プロトコルについて検討する。また, 実際に Chronos を実機を用いて再現し, 実環境において CSI を用いた距離測定を行う中で誤差が生じる要因を検証する。

キーワード: Channel State Information, 位置測位, ドローン, 無線通信

1. はじめに

ドローンの低価格化, ソフトウェア技術の向上, 搭載可能なセンサーの種類増加などによってドローンの新しいアプリケーションの開発, サービスの多様化等による市場の拡大が見込まれている。平成 28 年に総務省が発表した資料 [2] によると, 国内のドローン市場規模は 2020 年には 186 億円, 2022 年には 406 億円に増加すると予測されている。ドローンの市場規模の拡大に伴い, ドローンを用いるアプリケーションの数も増加の一途をたどっている。

急増するドローンを用いたアプリケーションの増加とその要求の多様化に向けて, 屋内のドローンに対して精度の高い位置測位技術を提供する必要がある。屋外でドローンの位置を測位する際には GPS を用いることが一般的であるが, GPS は屋内では衛星からの電波が届かない。また, GPS 信号が屋内に届いたとしてもマルチパスの影響で電波の品質が低下する。

屋内でドローンを使用する際における GPS の代替手段として, 様々な技術が考えられる [3], [4], [5], [6], [7]。例えば, IMES を用いることで屋内でも GPS 受信器を利用することができる。また, 超音波やカメラを用いた計測では, 数 cm での位置測位が可能である。しかしながら, 現在提案されている位置測位技術は位置測位精度やインフラやドローンに対して追加のデバイスが必要であるといった欠点がある。

位置測位の精度が高く, 導入が容易な手法として WiFi の既存の 2.4 GHz 帯と 5 GHz 帯のチャンネルにおける CSI か

ら距離測位を多量にすることで数十 cm の精度で位置測位する技術が提案されている [1], [7]。例えば, Chronos は既存の WiFi を用いてドライバの変更だけで数十センチメートルの誤差で位置測位することが可能である。ドローンはデータ通信に WiFi を具備していることが多いため, Chronos は屋内のドローンの測位技術としては有望であると考えられる。

本稿では, Chronos を用いた場合に問題となる計測時間の短縮と位置測位精度のさらなる向上を目的とする。Chronos は 1 回の距離測定において, すべてのチャンネルでの CSI を計測する必要があるため, 約 84 ms 必要としている。1 回の距離測定において, 2.4 GHz 帯のチャンネルと 5 GHz のチャンネルの計 35 チャンネルを利用して NDP (Null Data Packet), CSI, ACK のパケットを送信が必要であるからである。

このような観点から, 本稿では, Chronos において多数のドローンの位置測位を高速に行う手法を提案する。具体的には, 位置測位を行う際にドローンの通信範囲を考慮した場合に, 必要なパケットの数を減らすための通信プロトコルを実現する。また, 位置測位自体の回数を減らすための測位順序のスケジューリングアルゴリズムを実現する。計算機シミュレータを用いた提案手法を評価した結果として, 提案手法で位置測位が高速に行えることを示す。また, 実環境において実際に CSI を計測したデータを元に Chronos において誤差が生じている要因を検証する。

本稿の構成は以下のとおりである。2 節において, Chronos の概要と Chronos の問題点について述べる。3 節では, 提案手法として計測時間を減らすための通信プロトコルとス

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

ケジューリングアルゴリズムを示す。4節では、計算機シミュレーションによって提案手法の評価を行う。5節では実機を用いた検証を示す。最後に6節で本稿のまとめを行う。

2. 屋内における位置測位技術の課題

ドローンの位置測位を行うための候補として、GPS、超音波、カメラを用いたものが挙げられる。

2.1 電波を利用した位置測位手法

現在一般的に使用されている位置測位技術として、GPS (Global Positioning System) [8]がある。GPSはToA (Time of Arrival)の考えを活用する事で位置測位を実行している。ToAとは無線信号が送信機から受信機まで伝搬するまでにかかる時間のことである。しかしながら、建物内、高層ビル近辺などにおいては、衛星からの電波が建物によって反射、あるいは遮断されるためノードに衛星からの信号が届かないことに起因して伝搬する時間を求めることができない。また、仮にノードに衛星からの信号が届いたとしても、衛星からの直接波とはならないために位置測位の誤差が大きくなる。

室内でもGPSを使った位置測位を可能にするための技術として、IMES (Indoor Messaging System) [3]が提案されている。IMESはノードの使用者の位置を測位する代わりにノードの緯度、経度、高さなどの位置情報を提供することで位置測位を行うことなくノードの位置を知らせることができる。しかしながら、IMESを利用するためには位置情報を送信する機械の設置、運用にはIMESの開発者であるJAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)への登録が必要となる。また、位置測位の誤差が約3~10m程度と大きい。

IMESよりも精度が良い電波を用いた手法としてRSSI (Received Signal Strength Indicator)を用いた位置測位技術である文献[9],[10]の技術が挙げられる。RSSIとは受信した電波の強度を表す指標であり、ノードから送信された信号を基地局が計測することで取得することができる。RSSIは基地局とノードの距離が離れているほど値が小さくなるため、RSSIを用いて電波強度の減衰率から基地局とノード間の距離を約1.5~3m程度の誤差で測定することができる。しかしながら、RSSIを用いた位置測位は室内でドローンを用いたアプリケーションを想定した場合、精度が低いという問題がある。この精度の低さは室内ではマルチパスの影響が発生することが原因である。また、ノードと基地局間に障害物が存在した時に正確なRSSIが取得できないことも要因となる。高い精度を得るために多数の基地局を設置するとコストが問題となる。

電波を用いた位置測位手法の中で位置測位精度が高い技術としてUWB (Ultra-Wide band) [11]を用いた位置測

位が挙げられる。UWBは日本では3.4 GHz~4.8 GHz, 7.25 GHz~10.25 GHzを使用する。UWBの特徴として、非常に広い帯域を持つことのほかに単位周波数当たりの出力レベルが約-41.5 dBm/MHzと非常に少ない電力で信号を送信することができることや、送信される信号のパルス幅は帯域幅と逆比例するためパルス幅が非常に短いことがあげられる。そのため信号の出力レベルが非常に小さく、他の無線機器はUWBの信号を雑音として処理するためUWBは他の無線機器と干渉を起こすことなく使用することができる。しかしながら、UWBは送信電力が小さいため、ノード間に障害物がある場合やマルチパスの影響が大きい場合に使用が困難であるという欠点が存在する。また非常に短い距離の測定にしか使用できないという欠点も存在する。

2.2 超音波を用いた位置測位手法

精度の高い位置測位を行う方法として超音波を用いた位置測位技術が挙げられる。超音波を利用した位置測位技術にActive Bat [12]や、DOLPHIN [4]がある。超音波を用いた手法では、ノードから送信されてくる超音波のTDoA (Time Difference of Arrival)方式を利用して位置測位を行う。TDoAとは複数のノードが発信した信号が伝搬する際の到達時間差を用いて位置測位を行う方法のことである。TDoAの概要はToAと同じものになるが、ToA方式と比べて基地局間の時刻同期が不要という点で優れている。しかしながら、超音波を利用するためには特殊なデバイスを利用しなければならないという欠点がある。また超音波の通信距離が数mと短いため、広い空間でドローンの位置を測位する場合には多くの測定装置を設置しなければならないという欠点も存在する。

2.3 カメラを用いた位置測位技術

カメラを利用したドローンの位置測位技術として[5],[6]が存在する。ドローンに搭載されているカメラを利用して、目印となる柱や地面の線を撮影することによりドローンの移動を制御することができる[5]。また、ドローンの周りにカメラを配置して、カメラを使用して取得できた画像からエッジポラ幾何によってモーションキャプチャを行うことでドローンの位置を把握することができる[6]。しかしながら、前者は空中など目印を置くことができない場所では使用が困難であるという欠点が存在する。また、後者は広い範囲でドローンを制御する場合、カメラの台数が多く必要であるという欠点も存在する。さらに、両者共にキャリブレーションが導入の障壁になるという欠点も存在する。

2.4 CSIを用いた位置測位技術

CSI Tool [13]を用いることで、通常のIEEE 802.11nの無線LANカードとして使用できるIntel Wi-Fi Wireless

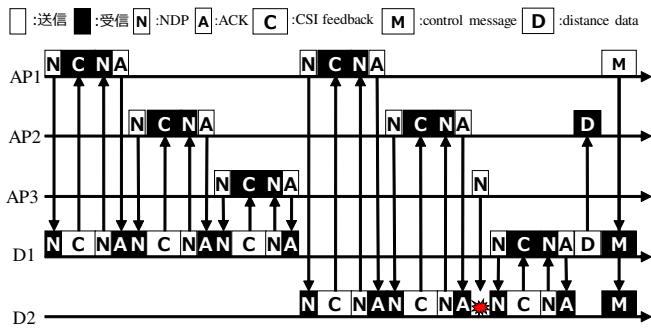


図 2: 工夫なしのプロトコルシーケンス図

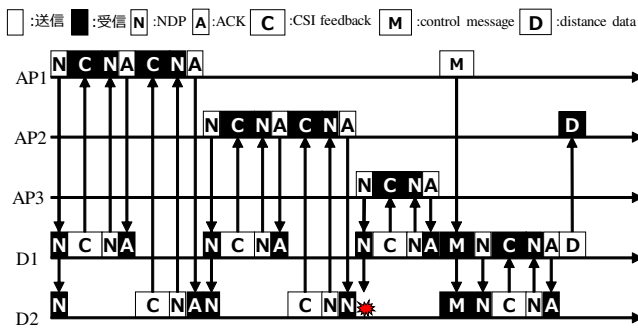


図 3: 提案手法のプロトコルシーケンス図

は 1 回の距離測位につき、ACK、NDP、CSI のパケット数が合わせて 140 個のパケットを要するため、全てのドローンの位置を測定するのに 840 個のパケットが発生する。したがってドローンの数を N とすると、必要なパケット数は $O(N^2)$ となる。

パケットサイズは ACK が 14 Byte、NDP が 23 Byte、CSI が 554.25 Byte である。距離データが 6 つあり、チャンネルが 35 個とすると、合計のパケットサイズは 1,241,625 Byte (=124.1625 KByte) となる。伝送レートを仮に R Mbps とすると、全てのパケットの伝送にかかる時間の合計は $121462.5 / (8R * 10^6)$ s となる。パケットの伝送に要する時間に加え、実際の位置測位にかかる時間は伝送方式によってさらに時間を要する。

3. 提案手法

Chronos を用いて多量のドローンの位置測位を行う場合に、位置が確定しているノードから順にスケジューリングを行うことで全てのドローンの位置測位に要するパケット量を削減する手法を提案する。提案手法のプロトコルシーケンス図を図 3 に示す。位置測位の基本的な動作は、1. 位置測位が完了したノードによる NDP のブロードキャスト、2. NDP ブロードキャストを受け取った複数の位置不定ノードが NDP 送信元に CSI と NDP の返信、3. CSI から距離の算出、4. 算出した距離を収集、5. 収集した距離からノードの位置の算出の 5 つのステップを繰り返すことで実現する。以上の手順を採ることで、最良の場合のパケッ

ト数を $O(N)$ に抑えることができる。

3.1 トポロジー全体で見た時の動作

図 1 における提案手法の動作例を図 3 に示す。各フレームは CSMA/CA で送信される。また、図 3 では NDP と CSI feedback は各フェーズで 1 組しか送受信していないように記載しているが、実際は NDP、CSI feedback、ACK は 35 チャンネル分を切り替えて 35 組の送受信が発生していることに注意されたい。

全てのドローンの位置測位を行う際に、AP-ドローン間、ドローン-ドローン間の距離測定を何も工夫を行わずに行うと、ドローンの位置測位に必要な距離測定の個数以上に距離測定を行う事が発生することが考えられる。そのため、距離測定回数をなるべく少なくするような位置測位のプロトコルの考案が必要となる。提案手法における AP 側のプロトコル、並びにドローン側のプロトコルをそれぞれ 1, 2 に示す。

まず、位置情報が分かっている 3 つの AP がコントローラに接続されているとする。コントローラは位置情報が分かっている 3 つの AP から 1 台を選んで NDP をブロードキャストする。ここでは AP1 が選ばれたとする。NDP を受け取った位置不定ノードであるドローン 1 とドローン 2 は AP1 に対して CSI feedback と NDP を返信する。AP1 では AP1 ↔ ドローン 1 間の距離と AP1 ↔ ドローン 2 間の距離を計測してコントローラに送信する。コントローラでは、距離情報を保存すると共に AP1 を使用済みとする。同様にコントローラは AP2、AP3 を順次選択して、AP2 ↔ ドローン 1 間、AP2 ↔ ドローン 2 間、AP3 ↔ ドローン 1 間の距離を収集して AP2、AP3 を使用済みとする。収集した距離情報を元に三辺測量を行うことで、コントローラではドローン 1 の位置を算出することができる。次にコントローラは新たに位置が算出されたドローン 1 を選んでドローン 1 に対してドローン 1 が NDP をブロードキャストするように通知する。NDP を受け取った位置不定ノードであるドローン 2 は AP1 に対して CSI feedback と NDP を返信する。ドローン 1 ではドローン 1 ↔ ドローン 2 間の距離を計測してコントローラに対して送信する。コントローラでは、距離情報を保存すると共にドローン 1 を使用済みとする。収集した距離情報を用いて位置測位を行うことでコントローラはドローン 2 の位置を算出することができる。

3.2 位置測位の方法

ドローンの 3 次元での位置測位の手法として、GPS など用いられている三角測量を用いる。3 つの基準点 (AP、または位置が測位できたドローン) と位置を測位したいドローン間で距離を測定する。3 つの基準点の座標をそれぞれ (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , (x_3, y_3, z_3) とし、それぞれ

Algorithm 1 Proposed Method in AP

```
1:  $D \leftarrow$  Deploy N Drone
2:  $A \leftarrow$  Deploy 3 AP
3:  $F \leftarrow \phi$ 
4:  $A$  send NDP to  $D$ 
5: if  $A_i$  can get CSI feedback data from  $D$  then
6:    $A_i$  send ACK to  $D$ 
7:    $A_i$  compute distance between  $A_j$  and  $D_i$ 
8: end if
9:  $A$  compute location of  $D_i$ 
10:  $A$  add  $D_i$  to  $F$ 
11:  $A$  broadcast location data of  $F$ 
12: while  $|F| < N$  do
13:   if  $|F| \geq 1$  then
14:      $A_j$  decide PrimaryDrone(Drone which is most distant
       from  $A_j$ ) from  $F$ 
15:   end if
16:   if  $|F| == 0$  then
17:      $A_j$  decide PrimaryDrone(ID of Drone is most smallest)
18:   end if
19:    $A_j$  send request to PrimaryDrone
20:    $A$  get distance data from PrimaryDrone
21:    $A$  compute location of  $D_k$ 
22:    $A$  add  $D_k$  to  $F$ 
23: end while
```

Algorithm 2 Proposed Method in Drone

```
1:  $D \leftarrow$  Deploy N Drone
2:  $A \leftarrow$  Deploy 3 AP
3:  $F \leftarrow \phi$ 
4: if  $D$  could receive NDP then
5:    $D$  send CSI feedback and NDP
6: end if
7: while  $|F| < N$  do
8:    $D_i$  are choosed PrimaryDrone from  $A_j$ 
9:    $D_i$  send NDP to  $D$ 
10:  if  $D_k$  can receive NDP from  $D_i$  then
11:     $D_i$  compute distance between  $D_k$  and  $D_i$ 
12:     $D_i$  send distance data of  $D_k$  to  $A_j$ 
13:  end if
14: end while
```

の基準点と位置を測定したいドローンとの間で距離測定を行い、測定できた値をそれぞれ r_1, r_2, r_3 とする。これにより基準点を中心とした球を3つ作成することができる。3つの球の交点が位置を測定したいドローンの座標となる。GPSでは時刻同期のために最低でも4つ以上の基準点(衛星)が位置測定に必要となるが、本研究では時刻同期による位置測定の誤差は生じないものとする。すなわち3つの基準点からの距離を計測することでドローンの位置測定が可能とする。

4. 評価

4.1 評価モデル

提案手法による効果を確認するために、計算機シミュレーションによって評価を行った。評価を行う対象として、距離測定に使用したパケット量、距離測定にかかった時

間、位置測位の精度の3つを対象に評価を行った。ドローンとAPの動作はコントローラによってスケジューリングされて動作するものとした。評価を行う際の条件を表1に示す。50m × 50m × 50mの大きさの空間の中にドローン N 台、AP 4台を配置した。配置した。各AP、ドローンの送信電力は20 dBm、受信電力の閾値は-45 dBmとして、フリスの伝達公式から通信可能距離を40 mとした。各対象はドローンの台数 N 台によって変化すると考えられる。そこで、ドローンの台数 N 台と各評価対象の関係を確認するために、ドローンの台数を変えて同様の評価を行った。伝送レートは13 Mbps[16]とする。伝送方式はCSMA/CAを利用するものとする。またパケットサイズは2.5節の議論に鑑み、CSMA/CAにおけるDIFS, SIFSはIEEEの文書から値を決定した[15]。これに加えて、多数のドローンの使用を想定しているため、DIFSの後通信を行う後のAP、ドローンのrandom backoffは極めて小さい値で行うと想定することができる。したがって、本研究ではrandom backoffの値は0として評価を行った。各パケットサイズ、待ち時間の値をそれぞれ表2, 3に示す。距離測定において、ドローンは3本のアンテナを用いて1つの距離の値を算出できるものとする。また、AP-ドローン間、またはドローン-ドローン間での距離測定において2つのノード間の実際の距離が長くなるにつれて計測される距離の値も大きくなるような誤差を[1]を参考に導入して距離測定を行った。各評価につきシミュレーションは1000回実行することで評価を行った。

4.2 距離測定に使用したパケット量とドローン1台の位置測定に必要な時間の評価

ドローンを50m × 50m × 50mの範囲にランダムに配置した際の距離測定に使用したパケット数、ドローン1台の位置測定にかかる時間をそれぞれ図4, 5に示す。縦軸がそれぞれパケット量、1台の位置測定にかかる時間を表す。位置測定における誤差が0 cmであっても、ドローンが移動している場合、その移動速度と距離測定にかかる計測時間の大きさによって結果的に位置測定に誤差が生じてしまう。そのため、距離測定の計測時間には一定の要求値が存在することが考えられる。本研究では、距離測定に必要な時間の要求値としてHigh demand value, Low demand valueの2種類を想定する。demand valueの値を定式化したものを式1に示す。

$$\text{DemandValue}(x, y) = \frac{\text{位置測定に必要な時間によって生じる誤差の要求値}(y)}{\text{ドローンの移動速度}(x)} \quad (1)$$

High demand value = DemandValue(20 km/h, 50 cm),
Low demand value = DemandValue(5 km/h, 50 cm) とする。すなわち、High demand value とは、ドローンが20

表 1: 評価の条件

条件	値
ドローンを配置する範囲	50m × 50m × 50m
AP の数 (3 次元)	4 台
通信可能距離	40 m
伝送レート	13 Mbps[16]

表 2: パケットの名称とサイズ [15]

パケットの名称	パケットサイズ
NDP	23 Byte
CSI	554.25 Byte
ACK	14 Byte

表 3: CSMA/CA における待ち時間の名称と値 [15]

待ち時間の種類	待ち時間の値
SIFS	16 μ s
DIFS	34 μ s
random backoff	0 μ s

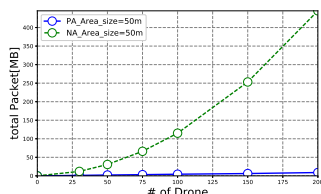
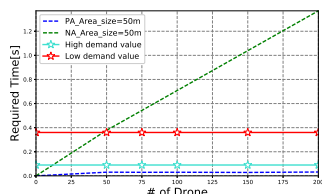


図 4: 距離測定に使用したパケット量 図 5: ドローン 1 台の位置測位にかかる時間



km/h で移動している場合に、位置測位に必要な時間によって生じる誤差が 50 cm 以内であるために必要な計測時間の値である。Low demand value とは、ドローンが 5 km/h で移動している場合に、位置測位に必要な時間によって生じる誤差が 50 cm 以内であるために必要な計測時間の値である。言い換えれば、ドローンが 20 km/h で移動している場合に、位置測位に必要な時間によって生じる誤差が 50 cm 以内に納めるには High demand value 以内の時間で距離測定を行わなければならない。同様に、ドローンが 5 km/h で移動している場合に、位置測位に必要な時間によって生じる誤差が 50 cm 以内に納めるには Low demand value 以内の時間で距離測定を行わなければならない。

具体的な High demand value の値は以下のようにして算出できる。ドローンの移動速度は 20 km/h である。すなわち、556 cm/s である。この条件で位置測位にかかる時間によって生じる誤差を 50 cm 以内に納めるには、 $\frac{50}{556} = 0.09s$ 以内に位置測位を行う必要がある。具体的な Low demand value の値も同様にして算出することができる。

図 4, 5 から、3 次元の場合において、ドローンの台数に関わらずドローン 1 台の位置測位に必要な時間はあまり変化しないことがわかる。これは、ドローンの台数が多くなっても位置測位を行うために計測される距離の数が変わらないためと考えられる。本研究ではドローン-ドローン間で距離測定を行う場合、通信可能な距離内にあるドローンは全て距離測定を行うため、これにより必要以上に距離測定を行っていると考えられる。3 次元における評価では、ドローンの台数にかかわらずドローン 1 台の位置測位にかかる時間は High demand value を達成することができた。全ての距離測定を行うものに比べてパケット量、ドローン 1 台の位置測位にかかる時間を約 90 % 以上削減することに成功した。しかしながら、今回のシミュレータでは実機において、チャンネル変更にかかる時間を考慮していないため、ドローン 1 台の位置測位にかかる時間は今回の実験結

果よりも増加することが考えられる。

4.3 位置測位の誤差の評価

図 6, 図 7, 図 8 に計算機シミュレーションによる位置測位の誤差を示す。

図 6 に全てのドローンを対象とした位置測位の誤差を示す。図 7 に、4 台の AP のうち、3 台と通信を行うことで位置測位を行うことができたドローンの位置測位の誤差を示す。図 8 に、位置測位にドローンを経由したドローンの位置測位の誤差を示す。また、各図におけるドローンの台数と誤差の中央値の関係をそれぞれ表 4, 5, 6 に示す。

上記の図、表からドローンの台数が増えるにしたがって誤差の値が増えていくことがわかる。また、AP3 台と通信することで位置測位を行うことができたドローンは誤差が 2 m 以内に収めることに成功したが、位置測位にドローンを経由したドローンは誤差が 4~5 m 程度と非常に精度が悪くなったことがわかる。これは基準点となるドローンに 2 m 弱誤差が生じており、その誤差のために正確な位置を算出できなかったためと考えられる。

5. 実機実験

5.1 Chronos におけるクロック誤差とマルチパス

2 つの端末間の距離は光の速さと電波の伝搬遅延を掛け合わせることで算出することができる。しかしながら、室内において電波を利用する際、マルチパスの影響等、伝搬遅延の値を変化させてしまう事柄を無視することはできない。Chronos において、マルチパスによる誤差、クロックの値が変わったことによる誤差、検波遅延による誤差を解消することに成功しているが、以前として距離測定において数十センチの誤差が発生している。筆者らは Chronos において CSI の値を取得する際にマルチパスとクロック誤差の影響を完全に除去できていないのではないかと考えている。

このような観点から、本節では室内で距離測定を行う際に算出される伝搬遅延で誤差が生じる要因であるクロックの位相のずれから生じる誤差の影響を検討する。具体的には、Chronos において使用されている誤差を除去する手法を実環境で取得できた CSI の値に利用することで生じている誤差の影響をどの程度解消できるかについて検討する。

CSI Tool を利用することで取得できる信号の位相は以下の式 2 のように取得することができる。式 2 において、

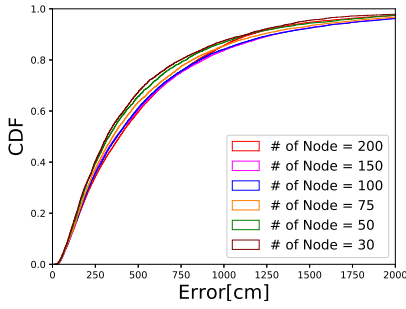


図 6: 全てのドローンの位置測位誤差

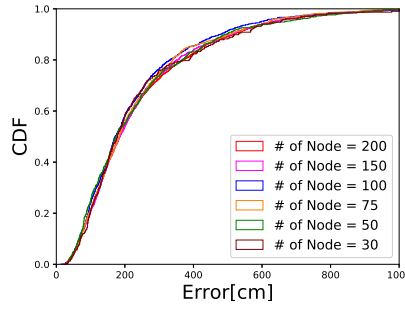


図 7: AP3 台と通信できたドローンの位置測位誤差

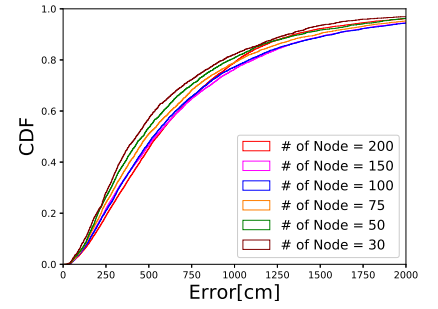


図 8: 位置測位にドローンを経由したドローンの位置測位誤差

表 4: 図 6 におけるドローンの台数と誤差の中央値

ドローンの台数	誤差の中央値
200	392.56 cm
150	374.64 cm
100	376.80 cm
75	353.26 cm
50	330.65 cm
30	318.32 cm

表 5: 図 7 におけるドローンの台数と誤差の中央値

ドローンの台数	誤差の中央値
200	550.83 cm
150	539.63 cm
100	527.33 cm
75	488.55 cm
50	465.01 cm
30	426.92 cm

表 6: 図 8 におけるドローンの台数と誤差の中央値

ドローンの台数	誤差の中央値
200	184.60 cm
150	186.03 cm
100	172.30 cm
75	183.50 cm
50	175.17 cm
30	178.80 cm

f が周波数, τ が伝搬時間を表している.

$$\angle h = -2\pi f\tau \pmod{2\pi} \quad (2)$$

Chronos において, Proximal Gradient Method (PGM)[17] を利用することでマルチパスの影響を削減することに成功している. PGM とは最適化手法の中でスパース性を利用した手法であり, 非常に早く収束することが示されている. Chronos では CSI Tool によって取得できた値を入力とし, 出力として $\mathbf{p} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)$ を用意して PGM を用いることで信号の減衰が非常に少ない信号と壁などを経由した減衰が非常に大きい信号に分けることに成功している. この際の τ_1, τ_2, \dots の初期値はランダムな値である.

Chronos において Transmitter 側の CSI と Receiver 側の CSI を取得することでクロック誤差の除去に成功している. クロック誤差は PLL (phase-locked-loop) で発生するものとキャリア周波数オフセットの 2 種類によって発生する. PLL によって位相は送信機側での位相を $\phi_{i,0}^{tx}$, 受信機側での位相を $\phi_{i,0}^{rx}$ とするとその差 $\phi_{i,0}^{tx} - \phi_{i,0}^{rx}$ のことである. キャリア周波数オフセットとは受信機側の周波数を $f_{i,0}^{rx}$ とすると, 送信機側の周波数 $f_{i,0}^{tx}$ とは少し異なる現象のことである. またその変化の値は $f_{i,0}^{tx} - f_{i,0}^{rx}$ で表すことができる. 位相オフセットの除去には送信機側と受信機側でそれぞれ CSI を計測していることを活用する. 受信機側の i 番目の周波数帯域における CSI は以下の式 3 のように表すことができる.

$$CSI_{i,0}^{rx}(t) = h_{i,0} e^{j(f_{i,0}^{tx} - f_{i,0}^{rx})t + j(\phi_{i,0}^{tx} - \phi_{i,0}^{rx})} \quad (3)$$

同様に, 送信機側の CSI は式 4 のように表すことができる.

$$CSI_{i,0}^{tx}(t) = h_{i,0} e^{j(f_{i,0}^{rx} - f_{i,0}^{tx})t + j(\phi_{i,0}^{rx} - \phi_{i,0}^{tx})} \quad (4)$$

式 3, 式 4 を互いに掛け合わせることで位相オフセットを除去することができる.

$\phi_{i,0}^{tx}$: 送信機側の位相, $\phi_{i,0}^{rx}$: 受信機側の位相, $f_{i,0}^{tx}$: 送信機側の周波数, $f_{i,0}^{rx}$: 受信機側の周波数

5.2 実験環境

実際に CSI の値を室内で測定し, マルチパスの影響による誤差, クロックによる位相のずれから生じる誤差の影響を検討する. 図 9 に CSI を取得した場所の見取り図を示す. 実験は 2018 年 4 月 30 日に大阪大学大学院情報科学研究科 A 棟 6F の研究室内で行った.

PC (Transmitter) と PC (Receiver) の間の距離は約 40 cm ほどであり, その際の伝搬遅延は約 1.33 ns である. PC (Transmitter) と PC (Receiver) の間に電波の伝搬を遮る障害物はない状態で CSI の取得を行った. また, PC (Transmitter) と PC (Receiver) には WiFi カードが Intel Wi-Fi Wireless Link 5300 であり, OS に Ubuntu 14.04 LTS がインストールされた Panasonic Let's note CF-B11 を使用した.

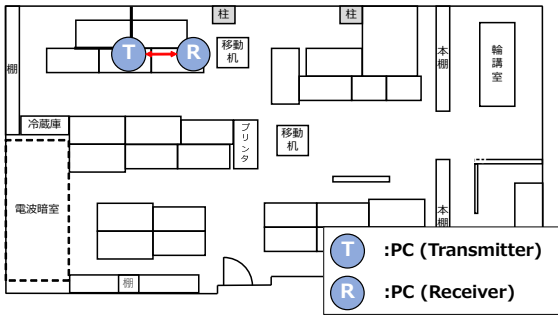


図 9: CSI を取得した環境

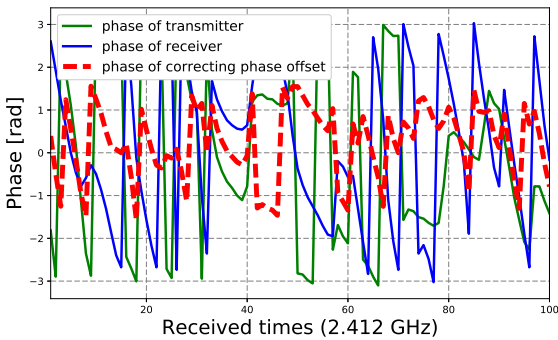


図 10: 2.412GHz を利用した電波の位相の値

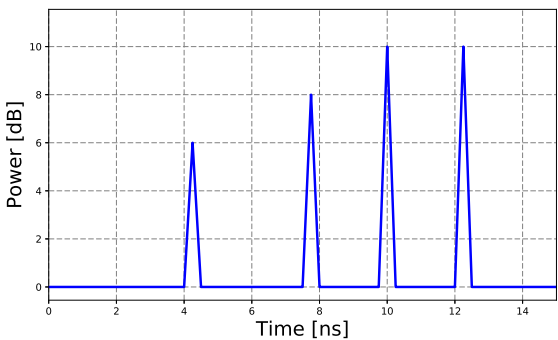


図 11: クロック誤差を除去しなかった場合のマルチパスプロファイル

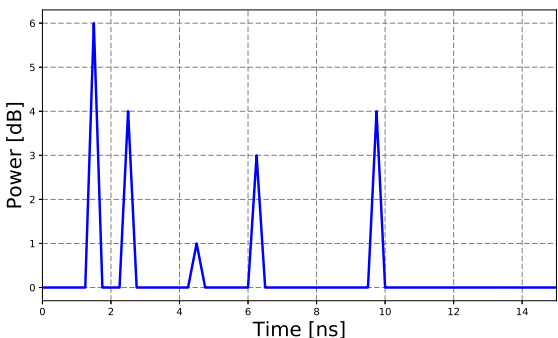


図 12: クロック誤差を除去した場合のマルチパスプロファイル

5.3 実験結果

図 10 に 2.412 GHz 帯を利用して 1 回目取得した電波の位相から 100 回目取得した電波までの位相の値を示す。図 10 の横軸は 2.412GHz のチャンネルを利用して何回目に

取得した電波であるかを意味している。各回の取得間隔は約 6 秒である。縦軸は取得した CSI の値から算出された位相の値 [rad] である。図 10 内の phase of transmitter が PC (transmitter) が送信した無線信号の位相の値、phase of receiver が PC (receiver) が送信した無線信号の位相の値を示す。また、phase of correcting phase offset が 5 節の議論を参考に PC (transmitter) と PC (receiver) の位相を基に位相オフセットの除去を行った後、算出された位相の値を示す。

図 10 から、位相オフセットの除去を行った後の位相の値は一定の値を示してはいないことがわかる。式 2 から電波の利用するチャンネルが同じであり伝搬遅延の値が等しい場合、何回目に取得したかに関わらず一定の位相を示すはずである。位相の揺らぎは Chronos の精度と同等であるため、位相オフセットの揺らぎが Chronos の位置測位精度を悪化させている可能性がある。

図 11 に 2.4 GHz 帯から 5 GHz 帯を利用して取得できた CSI の値を利用してクロック誤差を除去しなかった場合のマルチパスプロファイルを、図 12 クロック誤差を除去した場合のマルチパスプロファイルをに示す。図 11 と図 12 において最も左にある山の伝搬遅延の値が端末間の伝搬遅延の値を示す。図 11 における直接波の伝搬遅延は約 4 ns、図 12 における直接波の伝搬遅延は約 1.7 ns である。実際の伝搬遅延の値が約 1.33 ns であるため、クロック誤差を除去しなかった場合の距離測定の誤差は約 86 cm、クロック誤差を除去し他場合の距離測定の誤差は約 12 cm である。

6. おわりに

本稿では、CSI を用いた位置測位技術の使用を想定した場合に全てのドローンの位置測位を高速に行うことができるプロトコルを提案した。評価の結果、提案したプロトコルは一定の基準値を満たす速度での位置測位を実現した。また、実機を用いて Chronos で使用している手法の有効性の検討を行った。検討の結果、クロック誤差除去後においても位相オフセットに揺らぎがあることが分かった。現在、位相オフセットの揺らぎの原因の特定と位置測位精度の向上に向けて研究を進めている。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17KT0042, NTT アクセスサービスシステム研究所の支援の下で行った。

参考文献

- [1] Vasisht, D., Kumar, S. and Katabi, D.: Decimeter-Level Localization with a Single WiFi Access Point., in *Proceeding of 13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation(NSDI'16)*, pp. 165–178 (2016).
- [2] 総務省: ドローンの現状について, https://www.soumu.go.jp/main_content/000401647.

- [3] MANANDHAR, D.: Opening up indoors Japan's indoor messaging system : IMES, *GPS World*, Vol. 22, No. 5, pp. 38–46 (2011).
- [4] Minami, M., Fukuju, Y., Hirasawa, K., Yokoyama, S., Mizumachi, M., Morikawa, H. and Aoyama, T.: DOLPHIN: A practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system, in *Proceeding of Ubiquitous computing(Ubicomp'04)*, pp. 347–365 (2004).
- [5] Dijkshoorn, N. and Visser, A.: Integrating sensor and motion models to localize an autonomous ar. drone, *International Journal of Micro Air Vehicles*, Vol. 3, No. 4, pp. 183–200 (2011).
- [6] Zhang, Z., Deriche, R., Faugeras, O. and Luong, Q.-T.: A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry, *Artificial intelligence*, Vol. 78, No. 1-2, pp. 87–119 (1995).
- [7] Kotaru, M., Joshi, K., Bharadia, D. and Katti, S.: Spotfi: Decimeter level localization using wifi, in *Proceeding of the Association for Computational machinery, Special Interest Group on data COMMunication Computer Communication Review(ACM SIGCOMM'15)*, Vol. 45, No. 4, pp. 269–282 (2015).
- [8] Kaplan, E. and Hegarty, C.: *Understanding GPS: principles and applications* (2005).
- [9] Bahl, P. and Padmanabhan, V. N.: RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, in *Proceeding of IEEE International Conference on computer Communications (IEEE INFOCOM 2000). Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, Vol. 2, pp. 775–784 (2000).
- [10] Sugano, M., Kawazoe, T., Ohta, Y. and Murata, M: Indoor Localization System using RSSI Measurement of Wireless Sensor Network based on ZigBee Standard, in *Proceeding of Wireless sensor Networks* (2006).
- [11] González, J., Blanco, J.-L., Galindo, C., Ortiz-de Galisteo, A., Fernández-Madrigal, J.-A., Moreno, F. A. and Martínez, J. L.: Mobile robot localization based on Ultra-Wide-Band ranging: A particle filter approach, *Robotics and autonomous systems*, Vol. 57, No. 5, pp. 496–507 (2009).
- [12] Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-aware Application, *Wirel. Netw.*, Vol. 8, No. 2/3, pp. 187–197 (2002).
- [13] Daniel, H., Wenjun, H., Anmol, S. and David, W.: Linux 802.11n CSI Tool, <https://dhalperi.github.io/linux-80211n-csitool/>.
- [14] Vasisht, D., Kumar, S. and Katabi, D.: Sub-Nanosecond Time of Flight on Commercial Wi-Fi Cards, *CoRR*, Vol. abs/1505.03446 (2015).
- [15] IEEE: 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)*, pp. 1–3534 (2016).
- [16] Pefkianakis, I., Hu, Y., Wong, S. H., Yang, H. and Lu, S.: MIMO rate adaptation in 802.11 n wireless networks, in *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking(Mobicom'10)*, pp. 257–268 (2010).
- [17] Ke, H., Zirui, Z., Anthony, M.-C. S. and Zhi-Quan, L.: