

近隣端末との誤差情報の共有による GPS 測位精度向上手法の検討

木谷 友哉^{†1} 羽多野 裕之^{†2}
大西 博信^{†2} 平尾 駿^{†2}

GPS による単独測位では、各衛星の軌道情報からのずれや電離層や対流圏の遅延が原因となって起こる時間的な変動が少ない誤差と、信号波が反射することで発生するマルチパスによる遅延や受信機の熱雑音といったランダムな誤差が発生する。本稿では、前者の誤差を小さくするために、複数の端末が測位情報を通信で共有し協調して測位する方法を提案する。捕捉している衛星数が十分多い GPS 受信機ではほぼ正確な測位ができ、それゆえ各衛星のバイアス誤差について特定できる。そのため、その端末をディファレンシャル GPS における基準局のような役割をさせることで精度を向上させられると考えた。

A Method to Improve Positioning Accuracy of GPS by Sharing Error Information among Neighbor Devices

TOMOYA KITANI,^{†1} HIROYUKI HATANO,^{†2}
HIRONOBU ONISHI^{†2} and SHUN HIRAO^{†2}

The total error of localization with the Global Positioning System (GPS) depends on the following two reasons: the stable biased error from an irregularity in the orbit of a GPS satellite and the signal delay by the ionosphere and the troposphere, and the random error from the thermal noise of a GPS receiver and the multipath delay caused by the reflection from a building. In this paper, we propose a method to improve position accuracy of GPS by sharing error information among neighbor GPS devices in order to reduce the stable biased error. A GPS receiver which is capturing many GPS satellites enough to estimate its position accurately calculates the stable error of each GPS satellite, and the receiver broadcasts its error information to neighbors. A neighboring receiver can correct its estimation error by using the received error information.

1. はじめに

GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) とは、人工衛星を用いて地球上の位置を求めるシステムである¹⁾。GPS 受信機は、航空機、船舶や自動車などの車両にのみならず、携帯電話などの情報端末にも搭載され、様々な位置依存サービスが提供されるようになってきている。きめ細やかな位置依存サービスを提供するときには、位置推定精度が重要となる。特に、交通安全支援のような生死に関わる場面で利用するためには、より正確に位置を推定する必要がある。

GPS による測位では、まず、地上の受信機が衛星から時刻信号を受信し、その遅延時間から衛星までの距離を測定する。各衛星の位置は軌道情報からあらかじめ分かっているため、複数の衛星からの距離を測定することで、受信機の位置が決定できる。遅延時間から距離に変換するには、衛星内部の時計のずれ、受信機内部の時計のずれ、信号が通過する空間による遅延などを考慮する必要がある。それらの誤差要因のなかにおいて、各衛星内部の時計は高度な原子時計で衛星間で同期されているが、地上の受信機は安価であるために内部の時計の精度が相対的に悪く、このずれが GPS 測位誤差の主因となる。そこで、その受信機の地球上の 3 次元座標に加えて、その受信機内部の時計ずれも合わせた 4 つの値を未知の値とし、複数の衛星と地上の受信機までの距離それぞれの測定結果から、その未知数の値を求めている。未知数が 4 であるため、一般には 4 衛星以上から信号を受信することで位置が決定できる。

実際に測位する際には、受信機内の時計のずれ以外にも誤差となる要因があるため、4 以上のできるだけ多くの衛星から信号を受信することで、誤差を小さくしている。しかしながら、都市部では建物が林立し、十分な数の衛星を捕捉できるとは限らない。都市部でなくとも、建物の陰に入ると捕捉できる衛星数が少なくなり、それらの捕捉した衛星が天球上の狭い領域にしか広がっていないならば精度は低くなる。さらに、建物や地面などに反射した信号を、直接届いた信号として受信してしまうと誤差が大きくなる。

GPS による測位誤差は、大きく分けて以下の 2 つのグループに分類できる²⁾。一つは、各衛星の軌道情報からのずれや電離層や対流圏の遅延が原因となって起こる、時間的な変動が

^{†1} 静岡大学 若手グローバル研究リーダー育成拠点
Division of Global Research Leaders, Shizuoka University

^{†2} 静岡大学 工学部 電気電子工学科
Faculty of Engineering, Shizuoka University

少ない誤差（以後、バイアス誤差と呼ぶ）である。もう一つは、受信機の熱雑音、信号波が反射することで発生するマルチパスによる遅延、といったランダムな誤差である。

このうちバイアス誤差を補正する方法ために、各衛星の軌道情報や電離層や対流圏の厚みをモデル化して計算された値を含めて航法メッセージが作成され、各 GPS 衛星から受信機へ送信されている。しかし、電離層遅延のモデルの精度が高くないため、誤差は半減できるに留まっている。また、地上に位置が既知な GPS 基準局を設置し、それと各衛星との信号遅延時間を測定して、その差の情報を周囲の GPS 受信機（移動局）に知らせるディファレンシャル GPS (DGPS) がある。DGPS を用いることによって、電離層遅延などのバイアス誤差についてはほぼ相殺することが可能であるが、DGPS 基準局から受信機（移動局）までの距離が長いと、補正しても誤差が大きくなるという問題がある。

本稿では、上記のバイアス誤差の情報を近隣の端末間で通信して共有することで、測位誤差の分散を小さくする手法について検討する。捕捉している衛星数が十分多い GPS 受信機では、ほぼ正確な測位ができ、それゆえ各衛星のバイアス誤差について特定できる。建物の近くなど、十分な数の衛星を捕捉していない GPS 端末があるとき、近隣にいる十分な数の衛星を捕捉している GPS 端末からバイアス誤差情報を受け取り、それをを用いて測位することで精度が上げられる。また、ランダム誤差の大きな要因となるマルチパスについても、信号強度の情報を近隣の端末と共有することで、精度を悪化させる反射波を利用しないようにし、測位結果にぶれが発生しないようにすることも検討する。

2. GPS による測位

本節では、GPS による測位の原理、および、そのときに発生する誤差の種類について解析する。

2.1 GPS 単独測位の原理

各 GPS 衛星は極めて安定した原子時計を内蔵し、高精度の時刻を刻んだ信号を載せた電波を地球に向かって送信している³⁾。GPS 受信機もまた、内部時計を用いて同じ信号を生成しており、受信した信号と自身が生成した信号を比較することで、GPS 衛星が送信した時刻を計算し、伝播遅延時間を測定する。この伝播遅延時間に光速を乗じたものが、衛星から受信機までの距離となる。

ここで、誤差の原因となるものを以下にまとめる。GPS 衛星に起因する誤差として、内部時計のずれ δ_S 、軌道情報と真の軌道のずれによる誤差 ΔD がある。次に、衛星から受信機までに信号が通過する電離層での遅延 ΔI 、対流圏での遅延 ΔT がある。また、信号が建

物や山、地面などでの反射波がマルチパスで受信機に届いた場合に、それを直接届いた直接波として計算することによる誤差がある。最後に、GPS 受信機に起因する誤差として、内部時計のずれ δ_R 、熱雑音 ν がある。

ここで、GPS 受信機の内部時計での信号を受信した時刻 t_R 、その信号に含まれている GPS 衛星の内部時計での信号を送信した時刻 t_S 、そして、それぞれの真の時刻を t_{R0} 、 t_{S0} としたとき、衛星と受信機間の観測された距離 r （以降、擬似距離と呼ぶ）は、光速 c を用いて以下のように表される。

$$r = c(t_R - t_S) = c(t_{R0} - t_{S0}) + c(\delta_R - \delta_S) + c(\Delta I + \Delta T + \nu) + \Delta D \quad (1)$$

また、このとき真の距離は $\rho = c(t_{R0} - t_{S0})$ で表される。GPS 衛星が内蔵する極めて安定した原子時計の精度 10^{-9} から 10^{-13} と比較して、GPS 受信機内の時計の精度は 10^{-6} と低く、光速度を掛けると 300 メートル程度の誤差が発生することになる。また、GPS 衛星は定期的に地上の基準局と通信し、それにより、電離層遅延 ΔI 、対流圏遅延 ΔT 、軌道情報との誤差 ΔD について、通常は後述の航法メッセージ等を利用して誤差を数メートル程度まで補正できる。それゆえ、GPS の測位誤差は、受信機内の時計のずれが支配的である。そのため、GPS による単独測位では擬似距離を $s = c \cdot \delta_R$ として以下の式で近似する。

$$r \simeq \rho + s \quad (2)$$

そして、受信機の 3 次元位置と時計のずれの 4 値を未知数とし、4 以上の衛星から測定した擬似距離によって連立方程式を解き、位置推定を行っている。実際の測位では、受信機の位置の近似値 (x, y, z) について、修正量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, s)$ を定義し、逐次近似計算法により、これが十分小さくなるまで反復計算して求められる。

2.2 誤差の種類

GPS 測位における誤差について以下の表 1 にその性質と大きさをまとめる。以下の表は、文献 4) より抜粋したものである。なお、“大きさ” は擬似距離に対する大きさである。“傾斜係数” は衛星からの信号の地上に対する入射角度によって変動する。時間的相関の“バイアス” とは、測位時間間隔と比較して変動が小さく一方向に偏るものを、ランダムは測位する度に 0 を中心に正負の方向に変動するものを指す。

GPS による測位誤差は、受信機内の時計のずれを除くと、原因は以下の 3 つに大きく分類される。一つ目のグループは、衛星の正規の軌道位置からのずれ、衛星内部の時計のずれの衛星固有のずれである。二つ目のグループは、衛星からの信号が、電離層を通過するときの遅延、対流圏を通過するときの遅延といった、衛星が同じでかつ受信機の位置が近ければ相関があるずれである。最後のグループは、受信機の熱雑音、信号波が反射により発生す

表 1 GPS の各誤差要因の定量的特徴

分類	要因	大きさ	傾斜係数	時間的相関	空間的相関
衛星	内部時計のずれ	数 m	-	バイアス (15 分)	∞
	軌道情報からのずれ	数 m	-	バイアス (15 分)	1000km
伝送路	電離層遅延	0 ~ 20m	1 ~ 3	バイアス (15 分)	100km
	対流圏遅延	2.4m (海面)	1 ~ 10	バイアス (30 分)	100km
	マルチパス	数 ~ 数十 m	低仰角で大	ランダム (数分)	なし
受信機	熱雑音	数十 cm	-	ランダム (なし)	なし

るマルチパスによる遅延といったランダムノイズである。近隣の端末が同じ衛星を捕捉して距離を測定した場合、先の二つのグループの誤差（バイアス誤差）には強い相関がある。また、最後のグループの誤差はランダム誤差となって現れる。

2.3 バイアス誤差の削減

2.3.1 航法メッセージ

航法メッセージは、各衛星の位置を受信機に伝えるために作成され、測距信号に乗せて衛星から受信機に送信される。航法メッセージには、各衛星の内部時計の誤差修正情報、各衛星の軌道情報、電離層遅延の補正係数が含まれる。

高度 100km 以上に分布する電離層では、GPS が利用するマイクロ波帯の電波伝播速度を低下させる働きがあり、このため、測距信号は電離層がない場合に比べて遅れて衛星から受信機に到達する。この電離層遅延補正のための情報は、すべての衛星で共通の内容となっており、8 個の補正係数を用いて全地球上の電離層をモデル化し、それにより遅延時間を計算している。対流圏においても遅延が発生するが、対流圏の厚みは電離層に比べて十分薄い

ため、電離層の遅延を削除することで、ほとんどのバイアス誤差を打ち消すことができる。しかしながら、8 個の補正係数のみでモデル化しているため、場所によっては十分な近似になっておらず、結局、電離層遅延は半減できているに留まっている。

2.3.2 ディファレンシャル GPS (DGPS)

バイアス誤差のように近隣の GPS 受信機で同じような傾向の誤差が現れるのであれば、真の位置が既知な受信機を用意してその誤差を観測し、それを差し引くことで補正することができる。ディファレンシャル GPS では、地上に位置が既知な基準局を設置する。位置が既知であるため、各衛星までの距離も計算によって求めることができ、衛星からの信号によって測定した擬似距離からその真の距離を引くことで、電離層遅延等のバイアス誤差が得られる。この情報を放送によって周囲の受信局（移動局）に知らせることで、バイアス誤差を相殺することができる。なお、移動局が基準局から離れるほど、衛星からの信号が通

過する空間に差が生まれるため、測定したバイアス遅延のずれが大きくなるが、表 1 に示したように 100km 程度の距離であれば大きな誤差にならないことが分かっている。DGPS で実現できる測位誤差は約 1m であると言われている。

DGPS はもともと、米国によって GPS の精度に制限が掛けられていた SA（選択利用性）誤差を削減するために開発された。現在、SA は解除されており、GPS の単独測位で 10m 以内の精度が実現されている。DGPS は基準局の運用に費用が掛かることなどから、現在は基準局が減少傾向であり、DGPS を使わない GPS 受信機も増えている。日本では、海上保安庁が海岸沿いに 27 局の DGPS 基準局を設置して運用している。

3. 関連研究

GPS の測位には、GPS 受信機が受信した信号のみで測位する単独測位、地上の基準局を用いるディファレンシャル GPS、携帯電話網を用いるアシスト GPS などがある。ディファレンシャル GPS は、位置の真値が既知の基準局が受信した衛星からの信号を元に、各衛星からの信号が持つ誤差情報を計算し、それを周囲の GPS 受信機に配信することで測位精度を向上させる。アシスト GPS は、各衛星の軌道情報等を携帯電話網を通じて受信することで、測位までの準備時間を短縮するものである。通常、各衛星の軌道情報等はその衛星からの信号の内部に含まれており、この情報の取得には 30 分程度掛かることがある。携帯電話やスマートフォンなどでは常時衛星と通信していないため、即時に測位する場合にはこれらの情報をデータ通信網を介して取得している。

上記のディファレンシャル GPS やアシスト GPS は、通信によって誤差情報などを共有しているが、配信元はインフラとして用意された局である。本稿では、GPS 受信端末同士が通信で情報共有し、位置推定精度の向上を図ることを目標にする。

GPS 端末を複数協調させて利用する関連研究として、株式会社国際電気通信基礎技術研究所（ATR）で研究されている協調測位がある⁵⁾⁻⁷⁾。文献 5) では、GPS 端末を搭載した車両が車車間通信によって測位情報を交換して測位精度を向上させる研究を行っている。ここでは、都市部のような捕捉できる衛星数が少ない場合において、近隣の車両は受信している反射波にも相関があると考え、その反射波からの測位情報を共有することで、2 車間の相対位置の推定精度を向上させている。また、文献 6) では、上記の研究を引き継ぎ、反射波に相関があるかどうかを判断する指標を与え、相関がない場合には相対位置の測位に使わないようにして相対位置推定精度を向上させている。文献 7) では、トラックのような大きな車両に、GPS 端末を 2 台取り付け、設置間隔が既知なその端末間で測位情報を共有するこ

とで測位精度を向上させている。

また、車車間通信による協調で位置推定精度の向上を図る方法として、レーザレンジファインダのような端末間の絶対距離を測れる装置を利用するものがある⁸⁾。この手法では、各端末間で交換した測位位置を端末間距離で補正し、測位誤差がガウス分布に従うとして中心極限定理で精度が向上できることを示している。バイアス誤差を完全に相殺できた場合、マルチパスノイズや受信機の熱雑音のようなランダムノイズが残るため、この手法は有効であるが、レンジファインダのような追加装備を必要とする。

4. 提案する誤差情報の共有による協調位置推定手法

本稿で提案する手法では、車載 GPS 端末や携帯電話に内蔵された GPS 端末を想定する。それらの端末が測位時の誤差情報を通信で交換して共有することによって、単独測位よりも測位精度を向上させられる方法を提案する。

表 1 に示したように、測位誤差に大きな影響を与える要因は、バイアス誤差とマルチパスによるランダム誤差である。

バイアス誤差は、DGPS を使えば大きく削減できる。しかし、DGPS は基準局数が多くなく、場所によっては移動局と基準局の距離が大きいこと、また、今後の運用に不安があることが問題である。現在の GPS の単独測位でも、SA (選択利用性) が解除されているため、十分多くの衛星を捕捉して測位している端末は、高精度に位置を推定できている。そのため、このような端末を擬似基準局として捉え、各衛星についてのバイアス誤差を計算し、周囲の端末に通信で知らせる。このとき、擬似基地局と周囲の移動局との距離は非常に小さいため、バイアス誤差にさらに誤差が発生することはない。高い建物がある場所などでは、ごく近くの端末でも衛星の捕捉状況は大きくことなるため、このバイアス誤差の情報を用いることで、少ない衛星からの擬似距離を用いた場合でも精度を向上させられると考える。

次にマルチパスによるランダム誤差について削減することを考える。マルチパスによって反射した信号は、同じ信号を直接受信した場合と比較して SN 比が低くなる。捕捉している衛星数が 4 より十分多い場合は、マルチパスで到達した信号により擬似距離の重みは相対的に小さくなり測位精度に大きく影響されないが、捕捉している衛星数が少ない場合にはその信号の重みは相対的に大きくなり、測位精度に大きく影響を与える。ここでも上記と同様に、見通しの良い場所で多くの衛星を捕捉し、良好な環境で高精度で測位している端末が、それぞれの衛星からの信号の直接波の SN 比を周囲の端末に知らせることで、周囲の端末は自身が受信している端末が直接波であるのか反射波であるのか判断できるようになる。捕捉

できている衛星数が少ない場合でも、反射波であれば測位に使わないようにするなどして、ノイズが入るのを避けることで測位精度を向上させられると考える。

5. 従来の GPS 単独測位での測位実験と考察

現在のスマートフォンに内蔵されている GPS 端末の測位誤差を調べるために簡単な実験を行った。

実験に使ったスマートフォンは NTT DoCoMo GALAXY S II SC-02C である。場所は、静岡大学浜松キャンパス内の以下の 2 箇所で行った。

- 見通しがよく多数の衛星を捕捉できる場所として、キャンパス中央の噴水付近 (図 1)
- 建物の遮蔽によって捕捉できる衛星数が限られる場所として、情報学部 2 号館入り口付近 (図 2)

実験手順は、スマートフォンを上記の場所に静止させ、1Hz のサンプリングレートで GPS の測位値を 1 時間分取得した。期間は、2012 年 3 月 28 日の 15 時から 17 時までである。



図 1 見通しの良い噴水付近

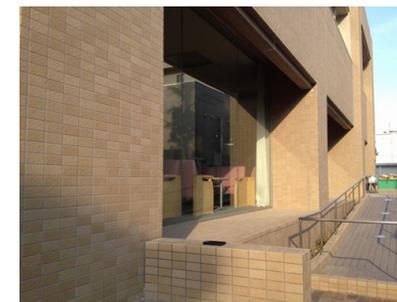


図 2 情報学部 2 号館入り口付近

実験の結果を図 3-6 に示す。

図 3-4 は噴水と建物付近の測定位置をプロットしたものである。図 5-6 は、噴水と建物付近でのそれぞれの測定結果について、GPS が捕捉している衛星数、そのうち測位に使った衛星数、緯度の測位結果である。



図 3 噴水付近の測位結果のプロット



図 4 情報学部 2 号館入り口付近の測位結果のプロット

図 3, 図 5 の結果より, 見通しの良い噴水付近では, 常に 8 以上の衛星が捕捉できており, 全くぶれずに正しい位置で測位できていることが分かる. このときの測位誤差はほぼ 1m 以内であった.

対して, 図 4, 図 6 の結果より, 建物のそばでは, 端末が静止しているにもかかわらず, 測位結果が移動した. これは, 天球上で衛星が移動しているために, 端末が静止していても捕捉できる衛星数が変わるためである. 捕捉できている衛星数は測位できる下限の 4 付近であり, 特に後半では 4 未満になり測位精度が非常に悪化している. また, 衛星の動きによって建物で反射するマルチパスの角度や到達距離も異なるために測位結果がぶれたと思われる. 図 6 では測位した緯度を示しているが, このときの真値は 34.7257 度であり, この場合は常に北側にずれるバイアス誤差のような偏った誤差があり, 単純に平均を取っても真値に近づかないということが分かる.

図 7 は, 情報学部 2 号館入り口付近の測位誤差の分布である. 遮蔽物に対して並行方向のぶれは 10m から 20m 程度, 垂直方向は 150m 程度であった. 誤差の標準偏差は緯度方向

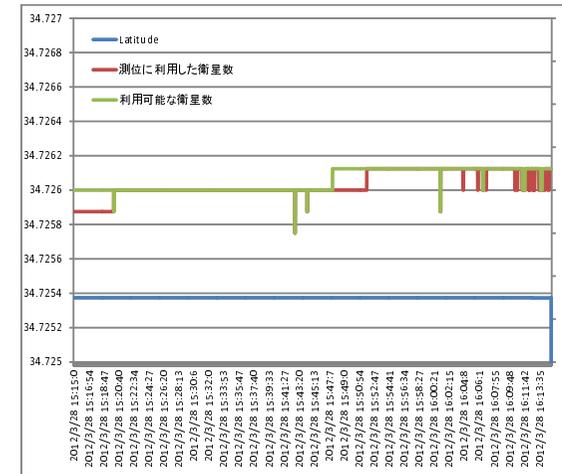


図 5 噴水付近の測位結果

に 27.90m, 経度方向は 6.575m であった.

このように, 従来の GPS 単独測位では, 建物に遮蔽されて十分な数の GPS 衛星が捕捉できないときに位置推定精度が著しく悪くなる.

6. ま と め

本稿では, GPS の単独測位時に発生するバイアス誤差を, 複数の端末が測位情報を通信で共有することによって, 測位誤差の分散を小さくする手法について検討した. 捕捉している衛星数が十分多い GPS 受信機では, ほぼ正確な測位ができ, それゆえ各衛星のバイアス誤差について計算して特定できる. そのため, その端末を DGPS における基準局のような役割をさせることで, 他の端末の位置推定精度を向上させられると考えられる. 今後の課題として, 提案した手法を実際に GPS 端末に実装して, 実際にどの程度の精度向上が達成できるのか調査する.

謝辞 本研究は科研費若手研究 B (23700073), 科研費若手研究 B (24760294) の助成を受けて行った.

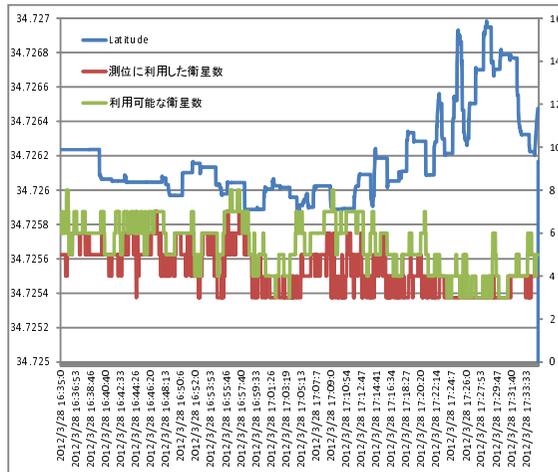


図 6 情報学部 2 号館入り口付近の測位結果

参 考 文 献

- 1) Misra, P., Enge, P., 日本航海学会 GPS 研究会誌：精説 GPS 改定第二版，測位航法学会 (2009).
- 2) 鈴木崇史：GPS 測位におけるマルチパス波の影響とその低減に関する研究，修士論文，東京商船大学大学院商船学研究所 流通情報工学専攻 (2004).
- 3) 佐田達典：GPS 測量技術，オーム社 (2003).
- 4) 坂井丈泰：GPS のための実用プログラミング，東京電機大学出版局 (2007).
- 5) 湯 素華，筒井英夫，大山 卓，三浦 龍，小花貞夫：都市部における高精度車車間相対測位手法，信学技法，Vol.SANE2010-159, pp.1-6 (2011).
- 6) 湯 素華，筒井英夫，大山 卓，大橋正良：協調測位における擬似距離相関性の判断，2012 年電子情報通信学会総合大会（基礎・境界講演論文集），pp.A-17-13 (2012).
- 7) 筒井英夫，湯 素華，大山 卓，大橋正良：屋外での GPS 受信ログを用いた協調測位方式の評価，2012 年電子情報通信学会総合大会（基礎・境界講演論文集），pp.A-17-14 (2012).
- 8) 藤井彩恵，山口弘純，東野輝夫，金田 茂，高井峰生：車車間通信を用いた協調型位置推定手法，情処研報，Vol.2010-MBL-56/2010-ITS-43, No.4, pp.1-8 (2010).

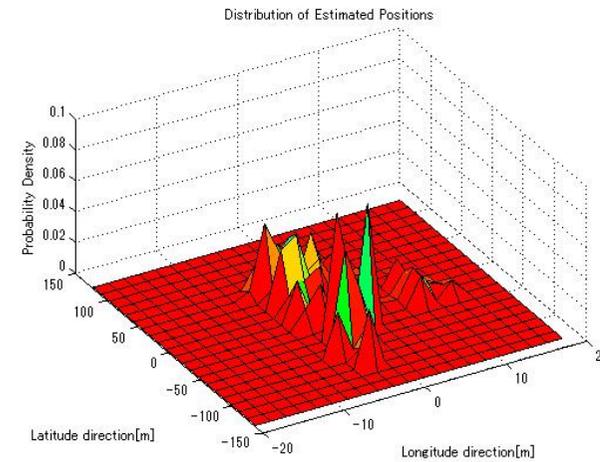


図 7 情報学部 2 号館入り口付近の測位誤差の分布