

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2012

課題番号：21241043

研究課題名（和文）VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎研究

研究課題名（英文）The developments of space-time information certification system using VLBI correlation processing

研究代表者

市川 隆一 (ICHIKAWA RYUICHI)

(独)情報通信研究機構・電磁波計測研究所時空標準研究室・研究マネージャー

研究者番号：40359055

研究成果の概要（和文）：3次元な位置情報と時間情報と合わせた時空情報の正当性を客観的な手法で検証する技術を確立するために、2地点で受信した雑音信号を相関処理してその時間差を検出するVLBI技術を応用した開発を進めた。開発したGNSSフロントエンド、GPGPU相関処理ソフトウェア、及び解析ソフトウェア等により、GPSなどの測位衛星等の相関処理と2m精度での測位に成功し、この手法が時空情報の正当性検証に有効であると結論づけた。

研究成果の概要（英文）：We have developed techniques to certify the time and position information for public users using correlation processing of GNSS signals by applying the VLBI technique. We succeeded to detect group delay fringes for several satellites using state-of-art GPGPU software. We estimated unknown site position using the new processing software based on the obtained group delays and satellite orbit derived from International GNSS Service (IGS). The estimated site position is consistent with that routinely obtained by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) within 2m accuracy. We concluded that the VLBI technique is applicable to certify time and position information.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	19,100,000	5,730,000	24,830,000
2010年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2012年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	36,900,000	11,070,000	47,970,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・社会システム工学・安全システム

キーワード：信頼性工学、時空認証、GNSS、VLBI、相関処理

1. 研究開始当初の背景

研究開発を開始した当初、GPSに代表される衛星測位技術(GNSS:Global Navigation Satellite System)や携帯電話・スマートフォン等の通信端末による測位など、一般の市民が簡易な端末で3次元な位置情報を入手するのが容易な時代となっていた。また、屋内においても無線タグなどを利用した位

置情報サービスが実現されていた。

こうした位置情報は、私的レベルの簡易な測量、船舶や航空機、トラックなどの運輸交通システム管理、農畜産物、加工食品などのトレーサビリティ確保、防犯などのカーナビ機能の拡張など、ありとあらゆる社会生活面でそのニーズを見ることができ、IT社会を実現する重要な技術要素としても認識される。

一方で、得られた位置情報が果たして本当に信頼に足るものなのか？、また、一定の信頼があるとしても、どの程度の確からしきで決められた位置情報なのか？といったいわゆる認証を客観的に行う仕組みは必ずしもまだ充分とは当時言えなかった。さらに、多くの場合、位置情報は、その位置が決定された時刻とセットの4次元情報として利用され、双方を一体化した運用を前提とするのが不可欠であるが、その仕組みも不十分であった。さらには、当時既に GPS そのものの脆弱性を指摘する報道もなされていた。

2. 研究の目的

本課題では、「不特定多数のユーザーが、いつでも、どこでも、その場所の正当性を客観的な手法で知るための技術」、言い換えれば、正確な位置情報と、それが取得された正確な時刻をセットにした時空情報の信頼性を担保する技術の開発を目的とした。

「どこでも」とは、文字通り地球上のあらゆる場所を意味し、また、「いつでも」という時刻情報と組み合わせることで、ユーザが手にした空間と時間の双方の4次元情報を取り扱うことをイメージする。また、将来的には国家標準にトレーサブルな時空情報を証明することを想定し、国家標準周波数と日本標準時を業務として決定・維持・配信する立場にある情報通信研究機構(以後`NICT')と、国家位置基準を定める立場にある国土地理院(以後`GSI')を中核として、横浜国立大学、及び一橋大学を加えた連携のもとで時空情報の正当性を評価するための研究開発を主眼とした。

なお、「位置情報の正当性評価」を端的に表現すれば「位置認証」ということになる。しかしながら、「位置認証」とは、公的な機関が業務として行うイメージが強いため、ここでは前者の語を用いることとした。

3. 研究の方法

本研究では、「ユーザが持つ端末の位置情報の正当性を評価するにあたり、「その場所でしか取れないデータをユーザに記録させる」ことを念頭に置いた。したがって、正当性を評価する側のシステムでは、そのデータが偽装されたものか否かを見抜くことが必要とされる。

ここでは、数 1000km 離れた 2 地点にある電波望遠鏡間の距離と方向をミリメートルの精度で決定可能な「VLBI 技術(図 1 参照)」を応用し、GPS の脆弱性に起因する位置偽装も見逃すことのない技術の開発を考えた。

この VLBI 技術を応用して、同一の電波源

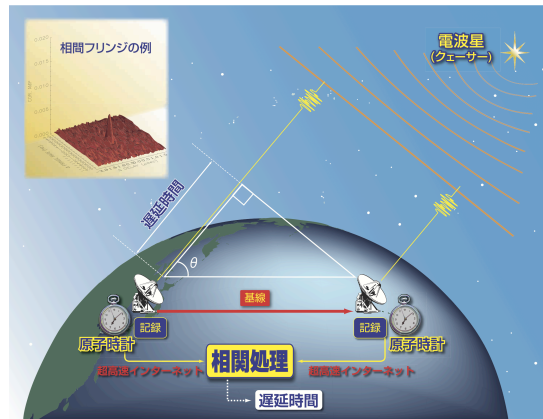


図 1 VLBI 技術の概念図

から送信される信号を時空情報評価センターとユーザ側の双方で受信し、双方の信号の相関処理をすることを考える。VLBI 相関処理では、個々の電波望遠鏡の 3 次元位置の概略値(精度的には数 m 程度、すなわち通常のカーナビ程度の測位精度で良い)を用いて到達時刻差の予測値計算を必ず行う。この予測値が相関処理可能なデータ幅の範囲外となるほど間違っていれば相関フリッジの検出に失敗し、逆に範囲内であればフリッジ検出に成功する。つまり、なりすまし等何らかの偽装により偽装された位置情報が提供された場合は、フリッジ検出に失敗するため、その

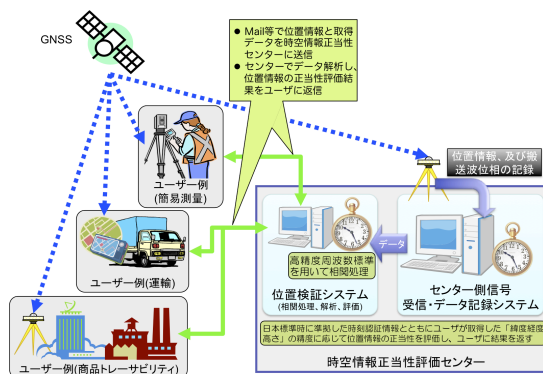


図 2 時空情報正当性検証システムのイメージ

位置情報の正当性を担保できないという判断が容易にできる。

実際の信号源として、ここでは、全世界規模で受信可能な、GNSS 信号を用いた。ユーザ側の端末では、GNSS の搬送波位相を受信すると同時に、その位置情報を記録し、その搬送波位相データと位置情報を評価センターにインターネット経由で伝送する。ユーザ提供の位置情報が正しければ、双方の信号の相関処理によりフリッジ検出に成功するはずであり、その場合、得られた位置情報は認証に値する有効なデータとみなせる。これらをまとめた VLBI 技術を応用した時空情報正当性検証システムのイメージを図 2 に示す。

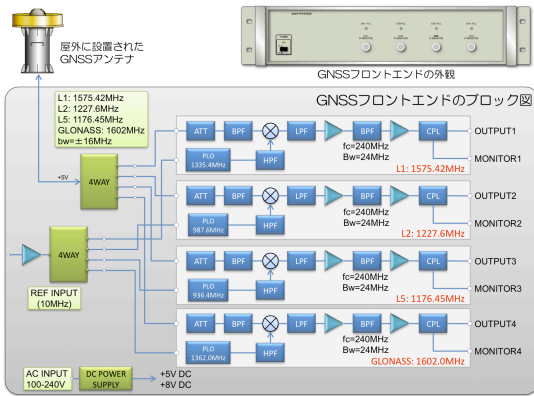


図 3 開発した GNSS フロントエンド

また、GNSS 以外でも、地上デジタル放送や BS・CS 衛星放送の電波を同時に複数箇所を受信して、それらの信号の相互相関処理によるフリッジ検出判定で同様にユーザから提供された位置情報評価ができる。GNSS、地上デジタル、及び BS・CS 衛星放送のそれぞれで、利用出来る電波の周波数や帯域幅は異なるため、フリッジ検出によって得られる遅延時間の決定精度もそれぞれ異なるが、これを応用してユーザが求める精度に応じて正当性評価を行うという運用も可能となる(表 1 参照)。

表 1 位置情報評価の様々なレベル

	3次元認証の様々なレベル		
	低	精	高
	認証レベルA (m)	認証レベルB (cm)	認証レベルC (mm)
VLBI	○	○	◎
GNSS	○	○	◎
ワンセグ	○	—	—
CS,BS	○	△	—

本システムを構築するために、開発が必要な要素技術は、

1. GNSS 信号の搬送波位相記録装置(ユーザ端末と評価センターの双方で必要)
 2. ユーザ端末で利用可能な高安定周波数標準信号発生装置
 3. 同搬送波位相の相関処理ソフトウェア
 4. 相関処理結果に基づくユーザ端末の測位解析ソフトウェア
 5. 各種データ記録や解析を担う各種サーバ群
- である。

4. 研究成果

研究の開始当初は、5のサーバ開発の他、先に述べた、2の「ユーザ端末で利用可能な高安定周波数標準信号発生装置」について、

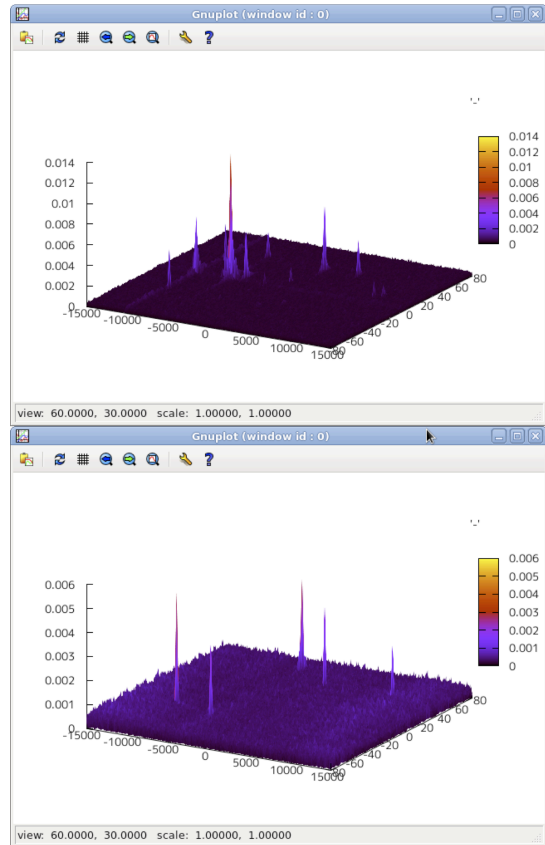


図 4 小金井-つくば GNSS 信号受信実験での相関処理結果。上は GPS の L1 信号、下は GLONASS 信号の相関処理結果である。

通信衛星を介した標準信号の供給を想定していた。しかしながら、充分短い積分時間であれば、現行の VCXO の出力に二次関数のフィッティングをかける位相補償を行うことで相関処理可能なことが2年目の実証実験で確認できたため、その後は開発の優先順位を下げた。そこで、研究期間の後半では、研究の要となる1、3、及び4に集中し、技術開発と実証試験を進めた。

まず、評価センターシステムに必要な GNSS フロントエンドを新規に開発した(図 3)。本機にマルチ GNSS タイプアンテナからの RF 信号を入力すると、GPS の L1 信号、及び L2 信号、次世代 GPS で利用が予定されている L5 信号、及び GLONASS 信号が4つのチャンネルから 24Mhz の帯域でそれぞれ出力される。

NICT と GSI が協力し、小金井-つくば基線(約 120km)、及びつくば-沖縄基線(約 1300km)で GNSS 信号受信を実施した。取得したデータは、横浜国立大学が開発した「CUDA GPU 並列セル FX 相関法」により従来方法に比べて 184 倍の速度での相関処理がなされ、GPS、GLONASS、及び準天頂衛星「みちびき」の各衛星からの信号を各々識別しながらの相関処理に成功した(図 4)。

さらに、測地技術解析ソフトウェア「c5++」を一橋大学が機能拡張して行った解析により、小金井一つくば基線から推定される遅延時間差と遅延時間率、及び国際 GNSS 事業から提供される精密軌道情報を用いて、位置の妥当性を評価する場所として想定したつくば局の位置を 5 秒毎に推定した。その結果、わずか 1 分以下のデータから、つくば局の位置が約 2m の誤差で国家測量成果と整合することを確認した。また、東京タワーと東京スカイツリーの双方からの地デジ信号サイマル放送を GNU-Radio と USRP により受信した際のデータを横浜国大により相関処理した結果、双方の送信機間での地デジ変調の遅延時間差検出にも成功し、時空情報正当性評価に地デジ電波の応用が可能であることも確認した。時間認証の仕組を組み合わせた時空情報評価システムの構築、及びユーザー側簡易端末の開発が課題として残ったものの、当初想定した成果をほぼ達成することが出来た。今後、実用化を視野に入れ、成りすましや位置情報の漏洩等セキュリティ上の対策や国家標準へのトレーサビリティを取り込んだ研究が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 44 件)

- ① Thomas Hobiger, D. Piester, P. Baron, A correction model of dispersive troposphere delays for the ACES microwave link, *Radio Science*, 査読有、48 巻、2013、131-142、DOI: 10.1002/rds.20016
- ② 田中秀磨、準同型暗号技術による位置情報認証、電子情報通信学会論文誌 D、査読有、2013 印刷中
- ③ Fujinobu Takahashi, Satoshi Kubota, Takuto Shimizu, Hirokazu Sato, Toru Kajiwara, Tetsuhisa Furumoto, Yusuke Kito, Takashi Takahashi, Mitsugu Ohkawa, Norihiko Katayama, Toshio Asai, Major Results of Medical ICT WINDS Experiments by Full Utilization of Open Source Software (OSS)、*信学技報*、査読有、112 巻、2012、111-116
- ④ Ryuichi Ichikawa, Thomas Hobiger, Yasuhiro Koyama, Tetsuro Kondo, Impact of Atmospheric Delay Reduction using KARAT on GPS/PPP Analysis, *Geodesy for Planet Earth, International Association of Geodesy Symposia*, 査読有、136 巻、2012、781-787 DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1
- ⑤ Thomas Hobiger, Jun Amagai, Masanori Aida, Hideki Narita, A real-time GNSS-R system based on software-defined radio and graphics processing units, *Advances in Space Research*, 査読有、49 巻、2012、e1180-e1190 DOI: 10.1016/j.asr.2012.01.009
- ⑥ 高島 和宏, 市川 隆一, 高橋富士信, 大坪 俊通, 小山 泰弘, 関戸 衛, 瀧口 博士, ホビガー トーマス, VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎研究(第 3 年次)、*国土地理院平成 23 年度調査研究年報*、査読無、2012、116-119, http://www.gsi.go.jp/REPORT/TECHNICAL/H23kenkyu-nenpo-h23_list.html
- ⑦ 王 立華, 田中秀磨, 市川隆一, 岩間 司, 小山泰弘、電波を使った位置情報認証、第 34 回情報理論とその応用シンポジウム SITA2011、査読無、2011、e234-e239 jglobal.jst.go.jp/public/20090422/201202250103900763
- ⑧ 高島 和宏, 市川 隆一, 高橋富士信, 大坪 俊通, 小山 泰弘, 関戸 衛, 瀧口 博士, ホビガー トーマス, VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎研究(第 2 年次)、*国土地理院平成 22 年度調査研究年報*、査読無、2011、G-45~G-46 http://www.gsi.go.jp/REPORT/TECHNICAL/H22kenkyu-nenpo-h22_list.html
- ⑨ Toshimichi Otsubo, Hiroo Kunimori, Hiroto Noda, Hideo Hanada, Hiroshi Araki, Masato Katayama, Asymmetric dihedral angle offsets for large-size lunar laser ranging retroreflectors, *Earth Planets and Space*, 査読有、63 巻、2011、e13-e16, DOI:10.5047/eps.2011.11.00, 2011.12.12
- ⑩ Thomas Hobiger, Youhei Kinoshita, Shingo Shimizu, Ryuichi Ichikawa, Masato Furuya, Tetsuro Kondo, Yasuhiro Koyama, On the importance of accurately ray-traced troposphere corrections for Interferometric SAR data, *Journal of Geodesy*, 査読有、84 巻、2010、537-546 DOI: 10.1007/s00190-010-0393-3
- ⑪ Thomas Hobiger, Toshimichi Otsubo, Mamoru Sekido, Tadahiro Gotoh, Toshihiro Kubooka, Hiroshi Takiguchi, Fully automated VLBI analysis with c5++ for ultra-rapid determination of UT1, *Earth Planets and Space*, 査読有、62 巻、2010、933-937 DOI: 10.5047/eps.2010.11.008
- ⑫ Thomas Hobiger, Seiichi Shimada,

Shingo Shimizu, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Tetsuro Kondo, Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 査読有、72 巻、2010、262-270

DOI: 10.1016/j.jastp.2009.11.018

- ⑬ 秦野 拓哉, 高橋 富士信, 梶原 透, 塩沢 賢児, 近藤 哲郎, 他、WINDS 衛星電波を利用した Ka バンド電波干渉計システムの研究、信学技報、査読無、110 巻、2010、65-67
<http://www.ieice.org/ken/paper/20100827POa6/>
- ⑭ Toshimichi Otsubo, Hiroo Kunimori, Hiroto Noda, Hideo Hanada, Simulation of optical response of retroreflectors for future lunar laser ranging, Advances in Space Research, 査読有、45 巻、2010、733-740
10.1016/j.asr.2009.12.003
- ⑮ Thomas Hobiger, Seiichi Shimada, Shingo Shimizu, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Tetsuro Kondo, Improving GPS positioning estimates during extreme weather situations by the help of fine-mesh numerical weather models, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 査読有、72 巻、2010、262-270
10.1016/j.jastp.2009.11.018
- ⑯ Thomas Hobiger, Tadahiro Gotoh, Jun Amagai, Yasuhiro Koyama, Tetsuro Kondo, A GPU based real-time GPS software receiver, GPS Solutions, 査読有、14 巻、2010、207-219
10.1007/s10291-009-0135-2
- ⑰ Thomas Hobiger, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Tetsuro Kondo, Computation of troposphere slant delays on a GPU, IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing, 査読有、47 巻、2009、3313-3318 DOI: 10.1109/TGRS.2009.2022168

[学会発表] (計 133 件)

- ① Thomas Hobiger, Troposphere delay modeling -status quo and future trends, 2012 AGU Fall Meeting (招待講演)、2012 年 12 月 03 日~2012 年 12 月 8 日、米国サンフランシスコ市モスコニーセンター
- ② 高島和宏, 市川隆一, 高橋富士信, 大坪俊通, 小山泰弘, 関戸衛, 瀧口博士, ホビガー トーマス、VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎

研究、第 56 回宇宙科学技術連合講演会、2012 年 11 月 20 日~2012 年 11 月 22 日、大分県別府市別府国際コンベンションセンター

- ③ Thomas Hobiger, 大坪俊通, 関戸衛、c5++を用いた観測レベルの宇宙測地統合解析-2010 年のチリ地震の地殻変動、第 118 回日本測地学会講演会、2012 年 11 月 01 日、宮城県仙台市福祉プラザ
- ④ Toru KAJIWARA, Fujinobu TAKAHASHI, Kazuhiro TAKASHIMA, Ryuichi ICHIKAWA, Toshimichi OTSUBO, Yasuhiro KOYAMA, Mamoru SEKIDO, Thomas HOBIGER, Hiroshi TAKIGUCHI、Development of the space-time information justification verification system of the GNSS satellite using VLBI correlation、地球惑星科学連合 2012 年大会、2012 年 05 月 25 日、千葉県千葉市幕張メッセ
- ⑤ Natsuki KINUGASA, Takuto Shimizu, Tatsuhiro Muto, Fujinobu TAKAHASHI、TEC measurements using propagation delay difference of two-frequency signal of QZS、電子情報通信学会 2012 総合大会、2012 年 3 月 20 日、岡山県、岡山大学
- ⑥ 高島和宏, 市川隆一, 高橋富士信, 大坪俊通, 小山泰弘, 関戸衛, 瀧口博士, ホビガー トーマス、VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証システムの開発、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 24 日、千葉県、幕張メッセ国際会議場
- ⑦ Toru Kajiwara, Fujinobu Takahashi, Tetsuro Kondo, Research on the parallel processing of VLBI USB samplers by using virtualization OS、日本惑星地球科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 23 日、千葉県、幕張メッセ国際会議場
- ⑧ 大坪俊通, ホビガー トーマス, 後藤忠広, 久保岡俊宏, 瀧口博士, 関戸衛, 竹内央、宇宙測地技術解析ソフトウェア c5++ の開発 その 2、日本地球惑星科学連合 2011 年大会、2011 年 5 月 23 日、千葉県、幕張メッセ国際会議場
- ⑨ 高島和宏, 市川隆一, 高橋富士信, 大坪俊通, 小山泰弘, 関戸衛, 瀧口博士, ホビガー トーマス、時空情報正当性検証データ取得ユーザ端末の開発、第 10 回 IVS 技術開発センターシンポジウム、2011 年 2 月 23 日、NICT 鹿島宇宙技術センター(茨城県)
- ⑩ 市川隆一, 石井敦利, 瀧口博士, 岳藤一宏, 氏原秀樹, 小山泰弘, 近藤哲朗, 栗原 忍、三浦優司, 谷本大輔、距離基準超小型 VLBI システムによる測地観測成果、第 114 回日本測地学会講演会、2010 年 11

- 月 8 日、京都大学(京都府)
- ⑪ Ryuichi Ichikawa, Thomas Hobiger, Yoshinori Shoji, Yasuhiro Koyama, Tesuro Kondo、Atmospheric Delay Reduction using Ray Tracing Technique through Meso-scale Numerical Weather Data for Space Geodesy、European Geosciences Union General Assembly 2010、2010 年 5 月 6 日、ウィーン国際会議場(オーストリア)
- ⑫ Thomas Hobiger, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Tesuro Kondo、Troposphere slant delay corrections from numerical weather models - status and outlook、European Geosciences Union General Assembly 2010、2010 年 5 月 6 日、ウィーン国際会議場(オーストリア)
- ⑬ 高島和宏、市川隆一、高橋富士信、大坪俊通、小山泰弘、関戸衛、瀧口博士、ホビガー・トマス、VLBI 相関処理技術を利用した時空情報正当性検証に関する基礎研究、第 112 回日本測地学会講演会、2009 年 11 月 4 日、茨城県つくば市産業技術総合研究所
- ⑭ Kazuhiro Takashima, Ryuichi Ichikawa, Fujinobu Takahashi, Toshimichi Otsubo, Yasuhiro Koyama, Mamoru Sekido, Hiroshi Takiguchi, Thomas Hobiger、Fundamental research about the space-time information certification using VLBI correlation technique、IVS e-VLBI workshop、2009 年 6 月 22 日、スペイン、マドリッド、スペイン国立天文台
- ⑮ Thomas Hobiger, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, Tesuro Kondo、Computation of troposphere slant delays on a GPU、EGU General Assembly 2009、2009 年 4 月 20 日、オーストリア、ウィーン、ウィーン国際センター

[図書] (計 1 件)

- ① 杉本末雄、朝倉書店、GPS ハンドブック、2010、87-95

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称：位置情報認証方法
 発明者：王立華、田中秀磨、小山泰弘、市川隆一、岩間司
 権利者：同上
 種類：特許
 番号：特開 2012-156636
 取得年月日：2012 年 08 月 16 日

国内外の別：国内

[その他]

ホームページ等

国土地理院 調査研究年報
<http://www.gsi.go.jp/REPORT/TECHNICAL/gsiryo1.htm#kenkyu>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

市川 隆一 (ICHIKAWA RYUICHI)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所
 時空標準研究室・研究マネージャー
 研究者番号：40359055

(2) 研究分担者

小山 泰弘 (KOYAMA YASUHIRO)

(独) 情報通信研究機構・国際推進部門国際
 連携研究室・室長
 研究者番号：30359054
 (H21→H23)

関戸 衛 (SEKIDO MAMORU)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所
 時空標準研究室・主任研究員
 研究者番号：60359057
 (H21→H23)

トーマス ホビガー (THOMAS HOBIGER)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究所
 時空標準研究室・主任研究員
 研究者番号：20533798

瀧口 博士 (TAKIGUCHI HIROSHI)

(独) 情報通信研究機構・新世代ネットワー
 ク研究センター光・時空標準グループ・専
 攻研究員

研究者番号：20435788

(H21→H22)

高島 和弘 (TAKASHIMA KAZUHIRO)

国土地理院・地理地殻活動研究センター・
 主任研究官
 研究者番号：30510937

高橋 富士信 (TAKAHASHI FUJINOBU)

横浜国立大学・未来情報通信医療社会基盤
 センター・教授
 研究者番号：50358818

大坪 俊通 (OHTSUBO TOSHIMICHI)

一橋大学・社会学研究科・教授

研究者番号：70358943

(3) 連携研究者

雨谷 純 (AMAGAI JUN)

(独) 情報通信研究機構・電磁波計測研究
 所・沖縄電磁波技術センター・センター長
 研究者番号：30358949