

静止方位限定可能な GPS の新規提案と 個性的な関心を重視する教育支援システムへの応用検討

高橋 正人^{*1*2}

Proposal of a Novel Wearable GPS with Azimuth Limitation Ability and
Focus-driven Outdoor e-Learning Applications using it

Masato Takahashi^{*1*2}

Abstract – As to a pedestrian with Global Positioning System, it has been hard to steadily acquire his bearing just using GPS. In this paper, a novel practical method is proposed to acquire his azimuth instantaneously with a new wearable user segment of GPS even in his stillness. This is able to be used as an ideal input for the position and the orientation of the user. A novel educational system is also proposed using this device. It assists a student who focuses on a certain azimuth range in his stillness, supposing his focus is on the constellations at the bearing in the sky, by inquiring him whether he would like to have educational stories including Greek Myths, history of sciences related to the constellations on his focus.

Keywords : Global Positioning System, Azimuth, Elevation, Orientation, Education

1 はじめに

教育には、他者の助力の下に遂行される過程としての側面と、個性的な関心に基づく自発的発展の過程としての側面とがある。一方に偏ることなく、両者に注目するとき、望ましいダイナミズムが生まれる。もしそうであるならば、教育される側に真に適切なタイミングで、教育する側が助力を行おうとする姿勢も、その内容と同時に、大切となってくる。このような発想は、教育される側の個性に関連する興味がどのように展開して行くかを、教育する側が関心を持ちつつ見守ることが、大切になってくるという考えに繋がる。価値創造の過程としての教育を考えると、教示を行うのに、適切なときが熟したことの認識は、内容と方法とともに、大切となる、という考え方である。教育哲学者であった木村素衛の「教育とは、精神の自覚的自己発展が、他人の助力の下に遂げられるという根本的に矛盾した概念である」との指摘 [1] は、このダイナミズムを表現したものとも考えられる。

本稿では、教育される側の興味の収束を、教育する側が関心をもって見守りつつ、最適なタイミングで助力を提示するシステムの研究開発を目指して、それを可能とする要素技術の新規提案と、システムへの応用

検討を行う。ある時刻に、ある位置において、ある方位に、自然な関心が向いている際に、つまり適切なときが熟した際に、その関心を拡充することに有用な芸術作品、物語、自然科学史、自然科学的知見、などの提示の要を照会できるシステムを提案する。知識の効率的な獲得を目指して構築された計画に使用者が合わせるものでなく、使用者の自由な活動にシステムの方が呼吸を合わせていくこと、すなわち、時が熟すまで、「待つ」ことを前提とする。このようなシステムには、小型軽量性、装着性が求められる。これを支える技術的背景や社会情勢として、携帯型衛星測位 GPS 装置と携帯型音響再生装置の普及は、活用可能になってきたのではないかと考える。前者は時刻と位置の検出に、後者は提示出力に活用可能である。しかし、残念ながらこれだけでは不十分で、関心尊重型教育システムにおける関心方向の検出に、従来技術では、問題があることを指摘する。つまり、従来の方位情報の信頼性不足を補填するための複雑な環境知覚照合や試行移動の外的要請と、関心対象への集中のための注視や静止という内的要請との、二律背反に行き当たらざるを得ない。この二律背反を克服するために、全く新しい方法の方位情報取得方法が求められていることを示し、上記の技術背景に適した形で、そのような方法を提案することになる。

本稿では、陸上、それも人間の歩行に基礎を置いた状況を、対象とし、以降、特に断らない限り、これを前提としたい。時刻と位置は、全地球衛星測位システ

^{*1}東京大学 大学院 工学系研究科 先端学際工学専攻

^{*2}独立行政法人 情報通信研究機構 第一研究部門 新世代ワイヤレス研究センター 宇宙通信ネットワークグループ

^{*1}The University of Tokyo, Graduate School of Engineering

^{*2}National Institute of Information and Communications Technology

ム (GPS; Global Positioning System) により取得できる。その誤差範囲程度は、RMS(Root mean square: 平均二乗偏差) 等のような値として、システム仕様として既知であるため、それに見合った使用をする限り、改めて誤差範囲程度を都度検証なしに、一定の有用性がある。たとえば、GPS の位置精度は十数 m であるから、遠方の景観や建築物等の同定の、自己位置とする限り一定の有用性がある。

しかし方位情報取得の従来技術は、陸上のそれも歩行者が用いる水準のものは、信頼性が低く、その欠点の補償のため、複雑な追加的検証プロセスを強いることとなり、関心の収束を阻害することが多かった。例えば、地磁気センサ (微弱な地磁気以外のいわゆる外乱成分としての陸上の雑多な磁気を排除して計測する機能を欠く) やレートジャイロ (人の緩急多様な運動における角速度の時間積分時の累積誤差を排除してゆく機能を欠く) は、誤差範囲程度自体の都度の変動が不規則で大きい。この都度の誤差範囲程度を検証するプロセスが要請されるが、この検証プロセスの作業負担は、不思議なことに、使用者に転嫁され、人の高次機能 (環境知覚・認知・方位情報を含む空間情報との照合) や運動機能等 (GPS 測位差分方式の歩行移動等による実施) により、遂行されることが慣習化してきたことをまず指摘したい。このような方法は、空間情報活用が活発化する今日、次の欠点がより注目されてくるであろう。つまり、従来の方位情報の信頼性不足を補填するための複雑な環境知覚照合や試行移動というプロセスを外的要請として使用者に転嫁される作業負担が、(1) 関心対象への集中のための注視や静止という内的要請と、二律背反を生じ、人の関心の自然な収束を妨げる (2) 高齢者・障害者等には高い実施障壁となり、時に実現不可能となる (3) 濃霧時や荒天時や夜間等環境によって実施が困難になったり不可能になる (4) 健常者にさえ継続実施は高負荷あるいは繁雑と感じられ、使用に抵抗を生じる (5) 遭難環境かその直前状況にあり、一時的な視覚機能や歩行機能の低下を来たしている者には困難になったり不可能になる、といった諸問題に導いてしまうのである。

特に、使用者の本来の関心の収束に必要な知覚照合機能や身体運動機能と、方位の誤差範囲程度の追加的検証にのみ要請されているはずの従属的な知覚照合機能や身体運動機能が、資源競合し、使用者の本来の関心の収束を妨げることになることは無視できない。このような分析の下、本稿では、関心を重視する教育支援システムに組み込まれても、使用者の本来の関心の収束を妨げることのない、方位情報取得の新しい方法を提案する。ついでその評価を行う。最後に、それを用いたシステムの提案と応用検討を行う。

2 方位取得の従来方法と提案方式の優位性

本節では、陸上で、主に歩行や静止回転を行う人の使用を前提として、方位情報の従来技術の問題点を分析し、提案方式が備えるべき優位性を明らかにする。

2.1 地磁気センサ

地表面各地での偏差 [2] の存在に加え、微弱な地磁気以外のいわゆる外乱成分としての陸上の雑多な磁気を排除して計測する機能を欠くとの機能的問題がある。海上や空中と異なり陸上では、誤差範囲程度は随時大きく変動する。その誤差範囲程度を、この方法自体の枠組み内において、簡便に知することは原理的に不可能であった。そこで別の検証方法が必要になったものの陸上歩行での適切な自動化方法は見出されず、信頼性不足を補填するための複雑な環境知覚照合や試行移動というプロセスが外的要請として使用者に転嫁された。その際の作業負担が、対象への自然な関心の集中を妨げる、など、前記の諸問題に帰着した。

2.2 ジャイロスコープ

角度を計測する姿勢ジャイロと、角速度を計測するレートジャイロに分類できる。前者は、航空機、ヘリコプターの姿勢制御や慣性航行に使用される。高価で大型であり、保守を要するものが多い。陸上の歩行を主とする者の使用には適さない。後者は、角速度を検出する。コリオリの力を使うもの等がある。角速度の時間積分により角度を得て、初期条件に加算することで、方位値を推定する。不規則な人の歩行時では、角速度の時間積分において、角度に累積され続ける誤差が無視できない。その誤差範囲程度を、この方法自体の枠組み内において、簡便に知ことは原理的に可能であった。そこで別の検証方法が必要になったものの陸上歩行での適切な自動化方法は見出されず、信頼性不足を補填するための複雑な環境知覚照合や試行移動というプロセスが外的要請として使用者に転嫁された。その際の作業負担が、対象への自然な関心の集中を妨げる、など、前記の諸問題に帰着した。

2.3 GPS 測位差分方式

GPS の搬送波位相差から方位を推定する方法は宇宙機等で使用される。しかし開発コストが高価になり陸上での実用に適さない。GPS の普及型の使用者部分 (User Segment) は静止時に方位を取得する能力を有さないため、数十mの移動を伴う GPS 測位差分方式の枠組みにより、人の運動機能の供与により解決されてきた。この際、移動能力だけでは不十分で、例えば、身体座標表現での起点方向の記憶の意識的保持等の能力は、運動機能とは別にこの方式実施の前提となることも指摘しておきたい。この高次機能を伴う移動機能の遂行というプロセスが外的要請として使用者に転嫁された。その際の作業負担が、対象への自然な

関心の集中を妨げる、など、前記の諸問題に帰着した。

以上示した、共通の問題を持つ従来技術を複合させ、構成した最新技術も、環境知覚照合や試行移動というプロセスが、外的な要請として、明示的に、使用者に転嫁される仕様を取る (例えば [3] 等)。やはり従来技術の枠組みを超えていないことを意味しており、その結果、対象への自然な関心の集中を妨げる、など、前記の諸問題に帰着する。

2.4 提案する方位取得方式が備える優位性

ここまでの従来技術の問題点の分析を踏まえ、新しい方位情報取得方式を提案する。それは、(a) 陸上で、主に歩行や静止回転を行う人の使用を前提として、(b) 信頼性向上のために人の身体運動機能や知覚照合機能の発動を要請することなく、(c) 衛星測位機器との機能共有できる構成で、(d) 身体等への快適な装着性を維持し、(e) 小型・軽量・廉価な構成で、(f) 迅速かつ簡便な操作感で、(g) 全地球表面可用性を保持しつつ、(h) 方位情報をその誤差範囲程度と共に即時的に取得できる、方位情報取得方法でなければならない。近年は 50g 程度の手のひらに優に乗るサイズで GPS アンテナ・受信機一体型モジュールが実現され、他の方式に比べても、遜色ない小さな容量で実現できる。後述のように、一つでも衛星信号を受信できれば、方位情報の誤差範囲程度を得られる特徴もある。限界としては、衛星信号を一つも観測できない上空閉鎖環境等では、方位情報が得られない点を挙げることができよう。

3 全地球衛星測位システム (GPS)

GPS は使用者部分 (User Segment) が 4 機以上の衛星信号を捕捉すると、地表上のどこにいても位置と時刻を特定できる。全地球衛星測位システムは、宇宙部分、管理部分、使用者部分から構成される [4]。測位衛星システムの宇宙部分 (Space Segment) と管理部分 (Control Segment) は、現在では、重要な社会基盤と目されるに至った。

宇宙部分は、衛星高度約 20,183km、赤道面軌道傾斜角 55 度、昇交点赤経が 60 度ずつ異なる 6 つの軌道面に 4 から 5 機ずつ、合計 24 機以上の衛星が配備される。各衛星からは、地表面に向けて航法メッセージ (Navigation Message) を含む信号が発信される。複数の周波数帯において信号が送信されるが、L1 波 (1575.42 MHz) を搬送波とする C/A コード [5] は民生用に利用が開放される。送信信号は各衛星に固有の擬似雑音符号 (PRN: Pseudo Random Noise Code) を用いて拡散変調されている。使用者部分側において同一の擬似雑音符号によって同期・復調 (逆拡散) されることで情報として抽出できる。

管理部分は、各衛星が自らの精密な軌道情報 (Ephemeris

Data) を常々送信できるように、軌道の精密決定を行い、各衛星上のデータを一日に数度の頻度で更新する。

使用者部分は、アンテナと受信機等から構成される。アンテナには数 cm 径の平面パッチアンテナが用いられることも少なくない [6]。受信機はデジタル信号処理装置 (DSP: Digital Signal Processor) チップをその中核とする。よって、アンテナと受信機は、もともと小型・軽量・薄型に構成可能な上、標準測位サービスで用いられている L1 波 C/A コード受信機の急速な普及を背景に、小型高性能化が一層促進されている。使用者部分はまずアンテナから衛星信号を取り込む。測位衛星は上空に散在するため通常半球ビームを持つアンテナが用いられる。取り込まれた信号は、複数チャネルに分配される。測位衛星から送信される信号は、疑似雑音符号によるスペクトラム拡散通信方式を用いているために、周期 1023 チップの Gold 符号である疑似雑音符号によって拡散変調されている。各チャネルは、選択した疑似雑音符号を併走させて、衛星信号の、同期、復調を試みる。

同期確立に成功したチャネルは特定衛星の航法メッセージを抽出する。航法メッセージは、信号送信衛星における信号送信時刻と、信号送出位置を含む。(と同時に、全衛星の概略軌道情報も含む。後述するように本稿ではこれは大切な要素となる。) 4 個以上のチャネルで同期成功すると、つまり、4 衛星以上の航法メッセージの抽出に成功すると、次の測位演算のフェーズに進む。次の、測位演算のフェーズでは、4 衛星の航法メッセージから抽出した 4 つの信号送信時刻 t_1, t_2, t_3, t_4 と 4 つの信号送信位置 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3), (x_4, y_4, z_4)$ および光速 c を既知数として、4 元連立方程式を立てる。4 変数は、使用者部分の現在位置 (x, y, z) (3 変数) および正確な現在時刻 t (1 変数) である。普及型の受信機は衛星の原子時計 (周波数安定度は 10^{-12} から 10^{-13} 程度) のように高精度な時計を装備せず、水晶振動子 (周波数安定度は 10^{-6} 程度) を基礎とする廉価な時計を持つに過ぎない。このため受信機内部の時刻も、ずれを含むものとして、変数として扱うのである。以上の 4 変数から成る 4 元連立方程式を解く。現在位置 (正確にはアンテナ中心の位置) (x, y, z) と時刻 t が特定できる。

$$\begin{aligned}(t - t_1)c &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\(t - t_2)c &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\(t - t_3)c &= \sqrt{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2} \\(t - t_4)c &= \sqrt{(x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2}\end{aligned}$$

ここで、あまり注目されていないことであるが、本稿で後に提案することになる方法に重要な意味を持つ事実を指摘しておきたい。既述の演算から明らかなように、4 元連立方程式を解いた際は、現在位置と時刻に加え、

現在位置から観測される、全衛星の方位角が、取得可能であることを、指摘する。これは、同期に成功した航法メッセージから、その信号送信衛星についての詳細情報のみならず、全衛星の概略軌道要素 (Almanac Data) が抽出され得る事実に起因する。現在位置と時刻が明らかとなった瞬間に、全衛星の概略軌道要素を活用して、全衛星の概略位置が明らかとなり、自己位置からの差分としての方位も算出され得る。

4 新しい方位情報取得方法の提案

本節では、既述の従来技術の分析から、洗い出された要件の全てを同時に実現できる、実用的な、方位情報取得方式を、新たに提案する。関心の収束を大切にするという目的の実現のため、方位限定と方位特定概念を、新たに措定し、区別してゆく。

「方位特定」とは、ある具体的な特定方向に対して、ある方位角値を一意に対応づけることを意味するものとする。「方位限定」とは、ある具体的な特定方向に対して、ある開始方位角値とある終端方位角値とある回転方向により規定される扇形状の方位角値範囲に対応づけることを意味するものとする。方位情報取得とは、方位特定と方位限定の両者の概念を含むものとする。

方位特定に比較して、方位限定がきわめて迅速にできる場合、方位限定という行動に実際的な有用性があるといえる。必要に応じて、迅速な方位限定と、正確な方位特定の双方が同一の装置により簡単な操作で可能となればさらに実用性が高い。即ち、正確さを優先させる場合には方位特定を、迅速さが優先される場合には方位限定を行えば良いのである。

4.1 天空の分割の原理

まず、図1に基づいて、方位限定の原理を説明する。第1平面パッチアンテナ (図中1a) および第2平面パッチアンテナ (図中1b) は、相互に背向させつつ平行に、かつ、水平面に垂直に設置する。この際図中5を計測方向と呼ぶ。

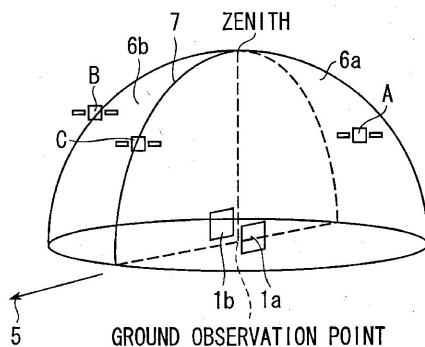


図1 天球とアンテナの配置
Fig. 1 Configuration of the antennas and the sky hemisphere.

第1, 第2平面パッチアンテナには、衛星測位システムの標準測位サービスで用いられているL1波 (1575.42 MHz) の右旋円偏波に対応する半球型ビームパターンを備えるものを用いる。両平面パッチアンテナのそれぞれの実質上の覆域は、天頂を通過するある大円として上空を2分割する。

測位衛星から発信される標準測位サービス用のL1波の信号は、1575.42 MHzの周波数を使用する。このため光と同様に直進性が優れている。よって受信時の信号同期の有無を元に、衛星の存在領域を判定できる。測位衛星システムでは測位演算成立時に全衛星の方位角も同時に算出され得ることについては、全地球衛星測位システムの節の、最終段落で記した。この特徴を活かし、測位演算完了時に、即座に、方位限定を実施する [7]。図1の測位衛星Cのように、天頂通過大円上に衛星が存在する時は、計測方向を方位特定できる。

半球よりも若干広い立体角形状のビームを持つアンテナを使用する場合は、図1における大円が線ではなく、若干の幅を持った帯領域となる。幅があっても実用に支障はない。不要な感度部分を除去するために、裏側に電波遮蔽材を配置しても良い。半球よりも狭いビームの場合は、方位限定は可能で、方位特定ができなくなる。その他には、問題は生じない。設計時の構成部品にこのような自由度があることは、実際的な製造コスト観点から好ましい。標準的なGPS L1波帯の平面パッチアンテナは半球ビームパターン [8] を取るものが多い。

4.2 機器構成

図2は、アンテナ、L1波C/AコードGPS受信機部、方位情報取得部、出力部の接続の関係を示す。

GPS受信機は次のデータ列を毎秒以下の周期で出力する。測位結果データとしての、緯度、経度、高度、現在時刻、直近の測位演算成立時刻、衛星データとしての、チャンネル1に割り当てられた衛星番号、衛星仰角、衛星方位角、チャンネル状態、チャンネル2に割り当てられた衛星番号、衛星仰角、衛星方位角、チャンネル状態、…、チャンネルnに割り当てられた衛星番号、衛星仰角、衛星方位角、チャンネル状態である。第1平面パッチアンテナを通して第1GPS受信機は衛星信号に対する同期・復調を試み、そして測位を試みる。第2平面パッチアンテナを通して第2GPS受信機も同様の試みを行う。以上の構成と出力は、標準的なGPS受信機とアンテナで実現できる。本方法は、標準的な標準測位サービス用GPS受信機の急速な普及に際して培われた小型軽量化・高性能化・安定化・低コスト化の技術を継承し享受できる。

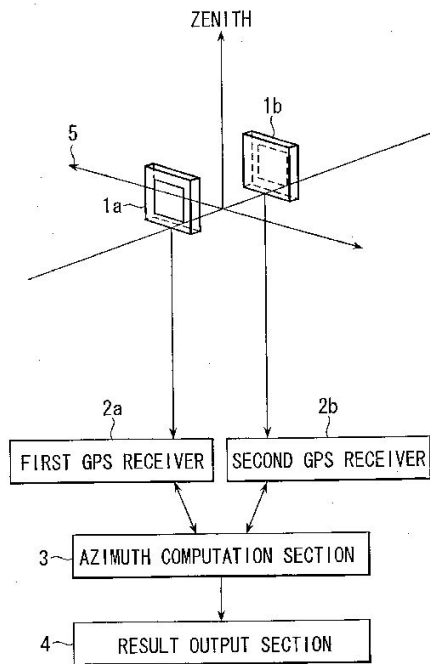


図2 アンテナ, GPS 受信機, 方位情報取得部
および出力部の相互関係

Fig.2 Block diagram of the azimuth acquisition device.

4.3 方位情報取得データ表の作成と更新

両 GPS 受信機からの各データを用いて、方位情報取得部 (図中 3) は、方位情報取得用データ表を構成する。方位情報取得用データ表の、各行は各測位衛星に対応し、最大行数は GPS 受信機のチャンネル数に一致する。データ表の各列は次に示される諸値で、周期的に更新される。1 列目は衛星番号、2 列目は衛星方位角、3 列目は衛星仰角、4 列目は第 1GPS 受信機で得られた同期の有無を示すチャンネル状態、5 列目は第 2GPS 受信機で得られた同期の有無を示すチャンネル状態、6 列目は高仰角排除あるいは地物遮蔽排除のためのフラグ、7 列目は衛星存在領域を格納する。4 列目、5 列目は同期の成立を示す。全地球衛星測位システムの節で既に述べたように、測位衛星受信機内部の各チャンネルにおいては、同期が取れると、広い周波数帯に拡散していた信号が、狭い周波数帯に絞り上げられるため、約 40dB の電力変動と共に検出される [9][10]。

アンテナ垂直設置の具現化である頭部装着時等には多少の傾きがあった際にも、方位情報が影響を受けないように、次の簡単な工夫により、効果的に対処する。つまり、高仰角衛星除去のフラグを 6 列目に立てる。3 列目の衛星仰角がきわめて高い (天頂に近い)、例えば仰角 85 度以上の、衛星はその後の処理に用いないとする。6 列目には、この地形・地物遮蔽に相当する排除判定のフラグを立てても良い。4 列目、5 列目の両アンテナシステムの受信機におけるチャンネル状態がとも

に同期を示さない場合、該衛星は地物遮蔽ないし地形遮蔽されている可能性が高く、方位情報取得に用いることは適切ではない。

7 列目には、4 列目と 5 列目、即ち同期成立の様相に基づき衛星の存在領域の判定を行う。片方のアンテナシステムの測位衛星信号受信機のチャンネル状態のみが同期を示し、他方が示さない衛星は、前者のアンテナの覆域に存在すると判定する。この場合、7 列目には前者のアンテナの番号を格納する。両アンテナシステムの衛星測位信号受信機のチャンネル状態がともに同期を示す場合は、衛星はアンテナ背向面の外延が構成する、天頂通過大円上に存在するとして、7 列目には例えば、0 のように立てる。2 列目の衛星方位角により、昇順に整列させる。この際、6 行目に既述の除外フラグのない衛星が対象となる。以上の手順に従い、方位情報取得部は、方位情報取得用データ表を構成し、GPS 受信機の出力周期ごとに最新の情報に更新する。方位情報取得部では、その後、7 列目、即ち、領域判定結果を、上から下に読み下す。既に方位角について昇順に整列済みであるから、北を基点に時計回り方向での方位角の昇順に基づく、衛星の領域判定結果の、例えば、0,1,2 を要素とする、円環の数列 (以降 R と呼ぶ) ができる。

方位情報取得部では、R の内部構造を検査し、その結果に基づいて後続処理を分岐する。R を構成する数列を簡単に表記する目的で、 S_i を「全ての項が整数 i であって、項数が 1 以上の数列」等と定義する。例えば $i=1$ のとき S_1 は $\{1, \dots, 1\}$ という数列となる。R の内部は S_0, S_1, S_2 の並びによって表現される。R の状態は、その内部構造である S_i の個数と順序の検査によって、(a) 方位限定が可能な状態、(b) 方位特定が可能な状態、(c) 前二者いずれでもない状態、に分類される。実際の生起確率は前二者でほとんどを占め最後の事象が生じる場合は完全に上空が遮蔽されている等の特殊な場合のみである。これらの事象の生起確率や性質の分析は Takahashi[11] に詳しい。

4.4 GPS による方位限定の実例

図 3 は、方位限定を行う際の上空 GPS 衛星配置と 2 つのアンテナとの関係の例を示す。図 3 における同心円状の図面は、使用者上空の天頂を中心とする半球を、さらに上から見た図である。小円は、GPS 衛星である。そのうち、灰色は、既述のいずれかの理由により処理から除外された衛星、黒は、第 1 平面パッチアンテナ (図中 1a) の覆域に、白は、第 2 平面パッチアンテナ (図中 1b) の覆域に、存在領域判定を受けたことを示す。

図 3 に相応する、方位情報取得データ表の例を図 4 に、その表からの方位情報抽出例を図 5 に示す。方位

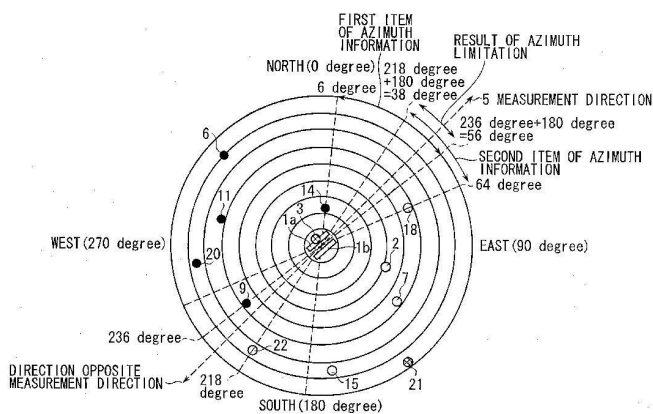


図3 方位限定が可能な上空衛星配置の例
Fig. 3 Satellites and the antennas in azimuth limitation.

情報取得部は、方位情報取得用データ表を作成した後、Rの内部構造をSiの存在様式により解析し、方位限定が可能なことを認識する。Rの構造検査から、計測方向は、 $L(S1) \prec z \prec \bar{F}(S1)$, $\bar{L}(S2) \prec z \prec F(S2)$ となる。 z は計測方向方位角、 $F(Si)$, $L(Si)$ は数列Siにおける初項、最終項に対応する方位角を抽出する関数、 $\bar{a}$ は方位角aの正反対方位角を得る関数、 $a \prec b \prec c$ は方位角a,b,cが時計回りにこの順序性を保持する事実の表現、である。演算の詳細はTakahashi[11]を参照されたい。計測方向は、開始方位角38度、終端方位角56度、時計回り方向、により規定される範囲に限定され、使用者に通知される。

Column 1 Satellite ID	Column 2 Satellite azimuth (deg)	Column 3 Satellite elevation (deg)	Column 4 Channel Status in first GPS receiver	Column 5 Channel Status in second GPS receiver	Column 6 Exclusion decision	Column 7 Region discrimination
14	6	68	Sync.	-	-	1
18	64	32	-	Sync.	-	2
2	110	49	-	Sync.	-	2
7	128	31	-	Sync.	-	2
15	177	15	-	Sync.	-	2
22	218	13	-	Sync.	-	2
9	236	32	Sync.	-	-	1
20	262	12	Sync.	-	-	1
11	285	28	Sync.	-	-	1
6	313	9	Sync.	-	-	1
3	340	86	Sync.	-	High elevation angle exclusion	-
21	144	4	-	-	Ground feature blocking exclusion	-

図4 方位限定が可能なデータ表の例
Fig. 4 An example of the data table in azimuth limitation.

図3の両矢印を持つ複数の円弧は、上の演算を図解する。開始方位角6度から終端方位角56度まで時計回りにより規定される範囲と、開始方位角38度から終端方位角64度まで時計回りにより規定される範囲が示されている。両者の積集合から、計測方向は、開始方位角38度から終端方位角56度まで時計回りにより規定される範囲内に限定され、使用者に通知される。

Region discrimination	Finite sequences	Satellite azimuth (deg)	Case ID/State ID	Available function in this case	Result
1	↓ S1	6	6/A	Azimuth limitation	$38 < z < 56$ clockwise
2	↓ S2	64			
2		110			
2		128			
2		177			
2	↓ S1	218			
1	↓ S1	236			
1		262			
1		285			
1		313			

図5 方位限定が可能なデータ表からの方位情報抽出例
Fig. 5 An example of the azimuth extraction from the data table in azimuth limitation.

4.5 GPSによる方位特定の実例

方位限定が得られた後、必要と判断した場合にのみ、続けて、方位特定を行う。既知の方位限定幅以下の回転を実施するだけで良い。回転の結果、衛星9の存在方向と反計測方向が一致する。その瞬間の状態を、図6は示している。記法は図3と同一である。方位情報取得部では、方位情報取得用データ表を、更新、検査する。Rの内部構造を検査し、方位特定可能であることを検出し、水平回転の停止と、方位特定の結果を、使用者に通知する。

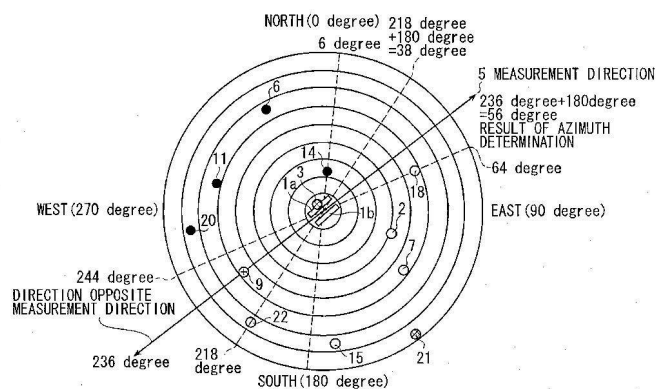


図6 方位特定が可能な上空衛星配置の例
Fig. 6 Satellites and the antennas in azimuth identification.

図6に相応する、方位情報取得データ表の例を図7に、その表からの方位情報抽出例を図8に示す。Rの構造検査から、この場合の、衛星番号9の衛星方位角は、反計測方向と合致していることが、容易に判別される。計測方向は56度と特定され、使用者に通知される。

図3の状態から図6の状態へ、状態を遷移させるための回転の上限の明瞭さは、方位特定に要する時間上限の事前見積もりを可能にし、方位特定実施の是非の

Column 1 Satellite ID	Column 2 Satellite azimuth (deg)	Column 3 Satellite elevation (deg)	Column 4 Channel Status in first GPS receiver	Column 5 Channel Status in second GPS receiver	Column 6 Exclusion decision	Column 7 Region discrimi- nation
14	6	68	Syn.	-	-	1
18	64	32	-	Syn.	-	2
2	110	49	-	Syn.	-	2
7	128	31	-	Syn.	-	2
15	177	15	-	Syn.	-	2
22	218	13	-	Syn.	-	2
9	236	32	Syn.	Syn.	-	0
20	262	12	Syn.	-	-	1
11	285	28	Syn.	-	-	1
6	313	9	Syn.	-	-	1
3	340	86	Syn.	-	High elevation angle exclusion	
21	144	4	-	-	Ground feature blocking exclusion	

図 7 方位特定が可能なデータ表の例
Fig. 7 An example of data table in azimuth identification.

判断の根拠を、使用者に与える。例えば、あまりに大きい限定幅だった場合は、思い切って 90 度異なった新たな方向に計測方向を変更して、再度方位限定を実施した方が、自らの今回の需要には実際の、などといった、現実的な判断の根拠となりうる。地磁気コンパスや、ジャイロスコプ等の、目的信号以外の雑多な信号を排除する機能を欠く方法では、この有用性は生じ得ない。方位限定は、PRN 符号の同期に依拠するため、目的以外の信号を排除する能力が高く（自己相関ピークが鋭く）、なにか別の信号を計ってしまったのではないかとの懸念を実際には一切持たなくて済む。この目的外信号排除性能の高さのため、方位限定幅の大小に関わらず、別法の追加的検証の併用なしに、次の行動決定になんらかの意味で必ず貢献できるとの、有用性を維持できる。

Region discrimination	Finite sequences	Satellite azimuth (deg)	Case ID / State ID	available function in this case	Result
1		S1	6		
2		64			
2		110			
2		128			
2		177			
2		218			
0		236			
1		262			
1		285			
1		313			

図 8 方位特定が可能なデータ表からの方位情報抽出例
Fig. 8 An example of the azimuth extraction from the data table in azimuth identification.

5 本提案の装着例

二枚の平面アンテナの並行設置構造という、本方法の Low-Profile 特性（突起部が少なく目立たないこと）は、人体の形状等にも自然に適合し、装着製に富み、アンテナ間結合を抑制する効果も期待できる。

図 9 の右図のように着衣や身体への装着に好適に適

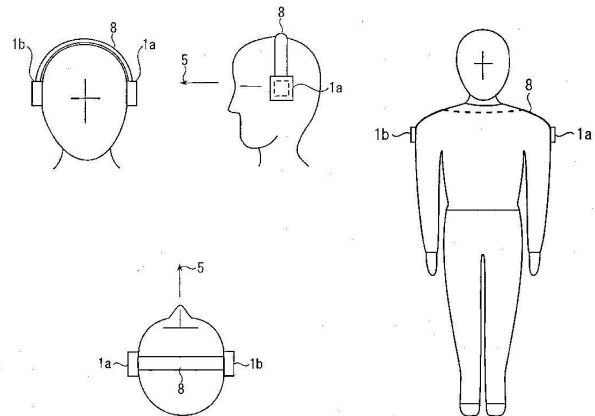


図 9 人体の頭部あるいは胴部への装着例
Fig. 9 An example of the wearable application on the head or body.

合する上、左図に見られる帽子を含む頭部への装着は次の利点を生む。(1) 顔面正面方向を計測方向を一致させ易く、方位情報の取得・活用に利便性が高まる。(2) 地物、自己身体、同道他者の身体等の遮蔽による影響（主に精度劣化）を最小化できる。(3) Headphone, Earphone 等、社会生活に普及している頭部装着型機器と形状が共通する。生活場面装着にも好適に適合する。(4) 方位限定に操作らしい操作を要さない。方位特定時に唯一要する上限の明瞭な回転も、単に眺望するかのよう、自然な動作で可能である。(5) 携帯型音楽再生装置の Headphone, Earphone 等の構造部分を本方位情報取得方法のアンテナ部分に流用できる。本提案の主要部品は通常の GPS 受信機すなわち DSP である。これは携帯型音楽再生装置と同様であり、好適に統合可能である。(6) 帽子、眼鏡、頭髮結束装飾具（カチューシャ等）等着脱可能な物品にも配備できる。

6 本提案の評価

6.1 シミュレーションによる方位限定期待値

ここでは、前節で提案した方式で、平均的にどの程度の精度の方位限定が成され得るかを検証する。計算機シミュレーション評価の結果を示す。衛星配置の時刻変動を評価に反映させることを企図し、東京の日比谷公園中心部（北緯 35 度 40 分 14.9 秒、東経 139 度 45 分 33.4 秒）において、ある日の 1 時間間隔の複数の離散的な時刻（0 時から 11 時までの各定時刻）に、上空に期待される衛星の運行を、衛星軌道情報を用いて再現し計測方向を毎回、無作為に設定する条件で、各時刻毎に 1000 回の試行を実施し、方位限定の幅を検証した。地物遮蔽の影響を受けやすい仰角 5 度以下を利用不可能と前提した。85 度以上の衛星も利用しないとの、本稿で既述の高仰角衛星を除外する制約を用い

た．共通覆域は，計測方向を中央に 2.5 度ずつの帯幅を持つものと仮定した．

結果，全 12000 回 (12 時刻 × 1000 回) の試行となり，無作為の設置のまま，計測方向で 1 つ以上の衛星を捉え，即座に方位特定できることもあった．その確率は，9.9%であった．各方位限定の限定幅の，平均値としては，30.8 度が得られた．本方法は，上空半球に，天頂を通過する，無作為な補助線を描いて，どの GPS 衛星とどの GPS 衛星の間を，それが偶然，通過したかを調べ，方位限定の情報を集積してゆくという，シンプルな新しいアイデアであったが，生活で実用される 4 方位 (各 90 度) ないし 8 方位 (各 45 度) を超えて，12 方位 (30 度) に匹敵する有効性を秘めていることが分かった．簡便・迅速・廉価さの中に，高い有用性を潜在させていることを示すものと言える．

なおここでは以下の前提を置いた．GPS の公式文書 Interface Control Document は，GPS 衛星信号強度を規程している ([12], 3.3.1.6 節)．使用者側で受信される L1 波帯 C/A コードの信号電力は，最小でも -160.0 dBW 以上となるように，衛星側が設定することとされている．これは，(a) 衛星仰角が 5 度以上，(b) 衛星の配向は (電力を減少させる向きに) 最悪のケース，(c) 3dB_i の直線偏波使用者側受信アンテナの地表設置，を仮定した値である．同文書は衛星仰角の関数としての L1 波の地表使用者側受信最小電力の参考値も示している ([12], 6.3.1 節)．GPS 衛星が，5 度および 90 度では -160.0 dBW，40 度では -158dBW として，40 度付近にピークを持つ形状である．これは，2.0dB の大気伝播損失等の仮定がさらに追加されている．以上から，地表使用者側受信最小電力として -160.0 dBW が保障される．また代表的な GPS 受信装置 (例えば SONY IPS 5000 等) の最低受信感度は (仕様上の最低保障信号強度の) -160dBW あるいはそれ下として設計されている．そこで半球ビームを持つ一般の GPS L1 波帯 アンテナおよび GPS 受信機を既述の配向と接続関係で用いれば，受信に特段の問題は生じないことは，仕様の示すところにより保障される．

上記の共通覆域は普及品に多く見られる GPS L1 波帯のアンテナパターン [8] を前提として，次の事実 (現実の受信信号の方が仕様の既述よりも実際は強い) を考慮すると，現実的であると考えられた．代表的な GPS 受信機で計測すると，仕様に記載された -160dBW (仰角 5 度) や -158dBW よりも，4dB 程高い値が観測されることが多い ([8], 10 章等)．理由は，上記の仕様値より，送信出力が高いことによる．加えて実際の大気経路損失が仕様の設定よりも小さい (大気伝播損失は 2.0dB をの仕様では仮定するが，実際の値は 0.3dB 以下 [8]) 等の事実に基づく．

6.2 マルチパスへの方位の耐性の検証

スペクトラム拡散通信方式は時分割多重方式等に比較して，マルチパスやフェージングの影響を受けにくい [13]．理由は以下の 2 点に集約される．(1) 遅延時間がチップ幅 (C/A コードでは，約 300m つまり 1 μ 秒) より長い長遅延マルチパスの場合，Gold 符号の自己相関性能がその影響を無効化する [8]．(2) 遅延時間がチップ幅より短い短遅延マルチパスが方位値へ与える影響は 10^{-3} 度程度となり実質上無視できる．測距誤差の大きさは，直接波より 12dB 弱い振幅のマルチパスを仮定すると，相関器幅が 1.0 の時に約 35m [14]，相関器幅が 0.1 の時に約 4m である [15]． 2.0193×10^4 km (仰角 90 度時) あるいは 2.5237×10^4 km (仰角 5 度時) の距離を隔てる観測者と衛星の位置差分から方位を算出する際に，上記の測距誤差 (高々 35m 程度) が，方位値に及ぼす影響は，高々 2.0×10^{-3} 度あるいは 1.6×10^{-3} 度となり，無視しうることが分かった．

7 自然体験教育機会への活用例提案

提案した方位情報取得方法の方位限定機能の限定幅が備える，星空観望等の教育支援システムへの適合性について検討する．国際天文学連合 (The International Astronomical Union; IAU) は 1928 年の国際天文学連合第 3 回総会において，全天を 88 の星座に明快な境界線と共に公式に分割した．この 88 星座は，古代ギリシア時代の星座を基礎とする Ptolemy の 48 星座 (オリオン座，白鳥座，おとめ座，アンドロメダ座など現在も著名な星座の殆どを含む) を核とする．

星空観望の実際では，少なくとも 17 世紀以降に追加された 32 星座を除いた 56 星座を対象とする考えにも妥当性がある．この 32 星座とは，Lacaille, Bayer, Hvelius により南半球ないし，北半球星座間の隙間を埋める目的で新設された星座である．面積も小さく，暗い恒星が中心で，幾何学的識別も困難で．神話等を付与される歴史を当然持っていない．天体観望でも意識される機会がないと考えてよい．

88 星座の広さの平均を計算すると，468.8 平方度 (標準偏差 336.7) であり，21.7 度四方の正方形の面積に相当する．56 星座の場合は (広さは 592.1 平方度) 正方形を仮定すると 24.3 度四方に相当する．図 10 に，実際の星座の広さ (平方度) を平方根した値の度数分布を示した．横軸の階級値は 2 の指数である．図中の例えば，2 の階級は 0 度以上から 2 度未満を示す．白色の棒グラフは，全 88 星座を示す．灰色の棒グラフは，17 世紀以降に追加された星座を除いた 56 星座を示す．図 10 の度数分布によると，16 度から 32 度四方の星座とみなせるものが最も多い．また面積の極めて小さい星座というものも殆どないことがわかる．迅

速に 30 度程度の限定を行い、必要とあれば、一層正確に絞り込みも簡易にできる、本方位情報取得方法の好適な適合性が示唆された。

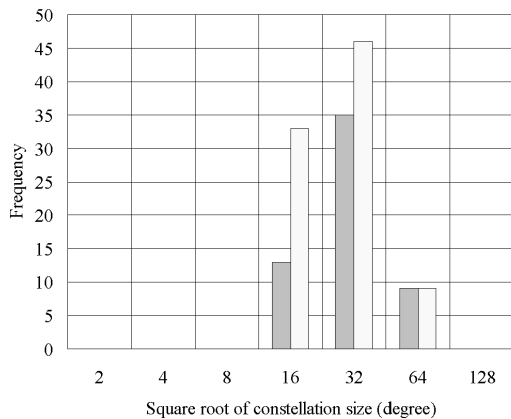


図 10 星座の大きさの平方根値の度数分布
Fig.10 Histogram of the Square root of the size of the celestial constellations

天体観望の支援システムはこれまでも、有る程度はあった。星座早見版はその一例である。現在位置である緯度・経度の大きく異なる場所、特に逆半球での活用性に乏しかった。視覚的注視を一旦実際の天体から離さざるをえず、関心の収束を妨げる課題が残された。CCD(Charge-Coupled Device) カメラ撮像を、追加情報と重畳し、HMD(Head Mounted Display) で視覚提示するシステムは、机置きサイズの機器を要し、実用化に向けた軽量化と、操作性の改善が課題とされた[16]。また星からの微弱な光を直接肉眼で観察できなくなる点は、直接体験を重視する自然体験教育機会での支援としては、課題となった。

提示内容は、関心方位範囲での星座の見つけ方やそれに関連する物語が望ましい。星座に関連する神話、科学史、世界史、天文学、宇宙航空工学、地理学、地球物理学、言語学、文学、人類史、文化史、科学史等が考えられる。同時に、比較的頻繁に生じ、観測し易く印象に残る、イリジウム衛星や国際宇宙ステーションのフラッシュ現象(人工衛星の太陽光反射現象。)や、流星雨の事前予報等も興味深い。時刻と位置を取得する既存の GPS の枠組みに、提案方法は必要な方位取得能力を低いコストで付与できる。星座や衛星等の天体は全地表面から費用なく観察可能であり、これらに関して高い普遍的価値を有する人類の共通財産とも言える芸術・文化・科学的な複数の内容を、英語等の高普及率の複数言語を選択出力可能とすることにより、GPS の全地表可用性および、本方法の簡素・廉価な実装性に支えられ、提案する本教育支援システムは、国際的な教育に貢献できる潜在力と普遍性を備えたプ

ラットフォームとして活用されうる。

教育される側の個性と関連する基本的な学習様式の傾向と教示方法の有効性の研究も近年重視されている。例えば、Kolb[17] は、教育される側の個性に応じた、教育の提示内容や提示方法の最適化が、教育の結果に影響を与える事実を見出した。DSP を中核とする本方位情報取得方法は、平常は携帯型音楽再生機器として機能し、関心を検出したときにのみ、教示を発現するという使用法に一定の現実性がある。日常での装着の中での、関心の収束の記録化と、その記録に基づく関心収束過程の分析等にも活用でき、関心を重視する教育研究の新領域を拓くツールとしての発展性にも富む。

提案する教育システムが、従来の教育システムに対して備える優位性は、提案方位情報取得方法の従来方法への優位性に平行である。自発的な関心が見られる貴重な機会を、方位の情報を確定させるためだけの、強制的な歩行や、周囲の観察と照合などの要請等によって、いたずらに攪乱することがなく、しかも、その関心対象に対する一定の確度を持つ情報を供与することができる点に、本提案方法の優位性が存在する。関心を重視する教育支援システムは、体系的な知識を「教える」ことに相補的な役割を果たすことも期待される。個別的な関心やそれに基づく創造性が「育つ」またはそれを「育てる」ことにも適している可能性があり、その際、コンテンツは、芸術作品(音楽・文学等)が適切な事であろう。「教える」ことと「育つ」または「育てる」ことの、双方の重要性に注目することは「教育」に望ましいダイナミズムを齎すと考えられる。

「創造的な人材の育成を強化するとともに、個々の人材が有する意欲と情熱をかき立て、創造力を最大限に発揮させる科学技術システム改革に取り組む」[18]とのわが国の方針の下、本研究は、科学技術創造立国に資する創造的人材育成に必要な、要素技術と教育支援システムとして定位されうる。

今後の課題には、機器構成の variation の有効性の検証、視覚・触覚等提示への適合性、記録に基づく教育される側の関心の収束の様相の範疇化の検討、教育される側の認知スタイル・学習様式の範疇に適した提示様式の検討、本方位情報取得方法の援用による位置・方位の同時記録による撮像録音等記録の価値・活用性の向上に係る研究、および上記にあげた各領域での応用研究予定も含む。

8 おわりに

従来の方位取得方法は、陸上、それも歩行や静止回転を主とする条件下では、問題があることを明らかにした。方位の不確定な誤差範囲程度を知るために人の運動機能や高次認知機能の発動を要請した。そこで、

人の本来の関心に基づいて集中して用いられるべき運動機能や高次認知機能と、資源競合してしまう。

本稿では、これらの問題を生じない方位情報取得方法を新たに提案した。使用者の運動や高次認知を前提とせずに、使用者が「静止」したまま(追加的な運動を要請することなく),ある対象を「注視」したまま(追加的な認知や照合を要請することなく),方位を、位置と、時刻とともに、即時与え得る。自然体験教育機会等において、従来の方位取得方法を採用のシステムに比べ、教育される側の興味の収束を妨げることが無く、被教育者の関心を尊重した教示が可能となる。

本稿で提案した測位衛星信号による方位限定という新しい機能は、今回の簡素な構成にも関わらず、計算機シミュレーションによると、30度程度の平均値が期待できることが分かった。星座の視野角の統計的分布を検討した結果、星座の観望に必要な方位限定範囲に好適に適合することが示唆された。本提案を端緒として、方位限定の範疇においてより優れた精度を齎す構成および適合アプリケーション提案を予定している。

本方位情報取得方法の小型・軽量・薄型に構成できる性質や、人体構造への優れた装着性、衛星測位システムや携帯型音響再生機器との機能兼用可能性の高さにも鑑みると、本システムを用いた自由な歩行と静止回転に基づく自然体験教育の記録化や、それに基づく関心収束過程の分析等にも活用でき、関心尊重型の教育研究の新領域を拓くツールとしての発展性にも富む。

謝辞

本研究に関し貴重なご示唆をいただきました情報通信研究機構理事長長尾眞博士および法務省大臣官房小菅美穂氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 木村素衛, 国家に於ける文化と教育, 岩波書店, 1946
- [2] 若月昇, “簡易で連続制御に適したセラミックスセンサとその応用”, TIC 出版, February 2000
- [3] GeoVector, <http://www.geovector.com>
- [4] Scott Pace, et al, “The Global Positioning System”, prepared for the Executive Office of the President, Office of Science and Technology Policy, Published by RAND, U.S., 1995
- [5] Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr. (Ed.), “Global Positioning System: Theory and Applications Volume I”, AIAA press, 1996
- [6] 羽石操, 平澤一広, 鈴木康夫, “小型・平面アンテナ”, (社)電子情報通信学会, 1996
- [7] 高橋正人, “方位情報取得方法”, 日本国特許庁, 特許登録 3430459 号, March 2000
- [8] Pratap Misra and Per Enge, “Global Positioning System -Signals, Measurements and Performance-Second Ed.”, Ganga-Jamuna Press, March 2006
- [9] Masato Takahashi, et al., “An effective method to evaluate intermittent blocking probability on

- land mobile satellite communications”, IEEE 50th International Vehicular Technology Conference, pp.2735-2739, Amsterdam, September 1999
- [10] Masato Takakashi, “Vehicle Satellite Interactivity Database with GPS Blockage Collected in the Civil Activities”, IEEE 17th Intern. Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp.466-450, Helsinki, Finland, September 2006
- [11] Masato Takahashi, “Method of Acquiring Azimuth Information”, United States Patent Office, Patent Resigtered No.6442480, August 2002
- [12] Interface Control Document for Global Positioning System, ICD-GPS-200, Revision C, IRN-200C-004, pp.45-47, April 2000
- [13] 山内雪路, “スペクトラム拡散通信 第2版”, 東京電機大学出版局, July 2001
- [14] Braasch, Michael S. Multipath Effects, in Global Positioning System; Theory and Applications, Vol. I, Parkinson et al., AIAA press, pp.547-568, 1996
- [15] Van Dierendonck, A.J., et al., Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver, Navigation, vol. 39, no.3 pp. 265-283, 1992
- [16] 伴好弘他, ウェアラブル拡張現実感のためのナビゲーション情報呈示に関する検討 -天体観察支援システムを用いて-, TVRSJ, Vol.6, No.2, pp.89-98, 2001
- [17] Kolb, D. A., Experiential learning: Experience as the source of learning and development. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984
- [18] 内閣府総合科学技術会議, 第3期科学技術基本計画, March 2006

(2006年7月7日受付)

著者紹介

高橋 正人 (正会員)



1988年東京大学教養学部基礎科学第一学科卒業,1990年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了,1995年国家公務員採用I種試験合格,1996年郵政省通信総合研究所(現 独立行政法人情報通信研究機構)入所,現在に至る。主任研究員。1999年第3回国連宇宙空間平和利用会議 Space Generation Forum 日本代表。国際チーム勧告「衛星観測・衛星通信技術の国際協調活用による減災」が国連 Vienna 宣言に公式採録される。2000年より1年間オーストラリア連邦政府科学技術研究機構電気通信部門客員研究員併任,2003年より2年間内閣府科学技術政策統括官付参事官補佐併任。2003年第1回産学官連携功労者内閣総理大臣賞制度創設等を主導。2004年特許庁特許出願技術動向調査機関選定委員。同年第1回重要情報基盤保護日米専門家会合日本代表団。2005年東京大学大学院再入学。総務省認定第一級陸上無線技術士,同第一級海上無線通信士,同航空無線通信士。文部科学省認定実用英語技能検定1級取得者,同工業英検1級取得者。国際連合公用語英検A級取得者。経済産業省認定第一種情報処理技術者。衛星通信,衛星測位,福祉医療工学等に関する研究に従事。米国電気電子学会 IEEE 等の会員。2000年度オーストラリア連邦科学アカデミー科学技術賞受賞。