

車載型センサーを用いた地図修正手法に関する調査研究

Development of Road Positioning System with Inertial Measurement Unit (IMU) for Land-Vehicle

測図部 齋藤秀勝・大木章一・橘悠希子

Topographic Department Hidekatsu SAITO, Shoichi OKI, Yukiko TACHIBANA

環境省 水田良幸

Ministry of the Environment Yoshiyuki MIZUTA

要 旨

地形図修正作業において、車載型のDGPSを用いた測位方法は、道路形状等を高精度かつ効率的に計測するための有効な手段である。しかし、上空視界が十分に確保できない状況での測位データの欠損、またディファレンシャル補正電波（ビーコン）の受信が困難な地域があるなど、必ずしも保証された精度で測位可能とは限らない。このようなDGPS測位における問題点を解決する上で外的な要因に左右されない測位センサーである慣性計測装置及び車速センサーをDGPSと組み合わせた車載型測位システムによる地形図修正手法に関する調査研究を実施した。

1. はじめに

2万5千分1地形図のリアルタイム修正作業では、従来の定期修正作業のような空中写真を使用した図郭単位の面的な修正ではなく、基本情報調査の変化情報による、地物単位の修正が主として行われる。この変化情報の多くは道路に関する情報で、道路管理機関から提供される詳細な工事平面図をもとに修正作業が行われるが、図面の縮尺・表示範囲によっては地形図への標定地物が不十分で精度の劣化を生じることや、リアルタイム作業が必要なことから、空中写真の使用が期待できない状況での資料と現地との相違による誤表示の可能性がある、現地確認と、現時確認と同時に実施する車載型DGPS装置でのデータ取得が従来以上に重要と考えられる。

DGPSの測位精度は、塚崎（2003）、橘・中南（2003）により、良好な観測条件が確保できれば2万5千分1地形図修正への適用は精度的に問題ないことが報告されている。しかし、GPS信号受信に必要な上空視界が全く取れないトンネル・高架下の道路、樹木・地形あるいは高層建築物によって上空視界が制限される山間部・都心部での利用方法が課題として残されている。

一方、慣性計測装置は一般にジャイロと呼ばれる角速度計と加速度計から構成され、移動体の姿勢（Yaw角・Roll角・Pitch角）と移動距離を求めることができ、DGPSとの補完による計測方法がカーナビゲーションでも利用されている。しかし、加速度計による距離計測精度が不十分なことから、自動車のスピードメータ等にも使用される車速センサーで補い精度を保つ必要がある。

本調査研究では測位データの欠損・マルチパスによる

測位精度の劣化というDGPS測位における問題点を、慣性計測装置と車速センサーで補い、2万5千分1地形図修正へ利用することを目的として、慣性計測装置・車速センサーの調査、3種の車載型センサーの組み合わせによる測位方法の検討、3種の車載型センサーを用いた測位システムの試作及び計測試験を行った。

2. 慣性計測装置に関する調査

2.1 慣性計測装置の性質および原理

慣性計測装置は、航空機やロケットの誘導装置として利用されている慣性航法装置（INS：Inertial Navigation System）や宇宙ロケットの慣性誘導装置（IGS：Inertial Guidance System）の技術を応用したものである。この慣性航法装置は、移動する際の加速度変化を計測する加速度計と、角速度変化を計測する角速度計（ジャイロ）で構成され、力学的な原理に基づき、角度変化と加速度から任意の点の位置座標を求める方式である。

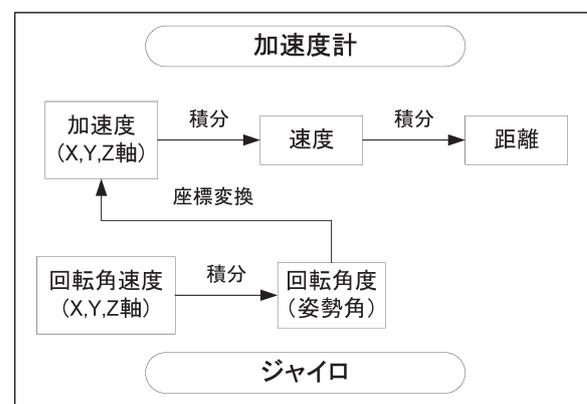


図-1 慣性計測装置の計測原理

装置の移動時に発生する加速度は、時間で1回積分することにより速度、更にもう1回積分することにより移動距離になる。この加速度計を3軸方向に設置し、その出力を時間で2回積分することで移動距離が算出できる。装置の移動中の姿勢は角速度計で計測する。角速度計を3軸方向に設置し、出力される角速度を時間で1回積分することで姿勢角（傾き）が算出できる。この姿勢

角により、加速度計を水平・垂直成分へ座標変換する。

2.2 使用した慣性計測装置

本調査研究では、精度的には慣性計測装置単独での計測ではなく、DGPSの補完用であること、費用的には地方測量部等への導入が現実的であること、さらに車載に適した筐体サイズ・耐久性を検討し、米Crossbow社製AHRS400Cを購入（価格約150万円）し使用した。

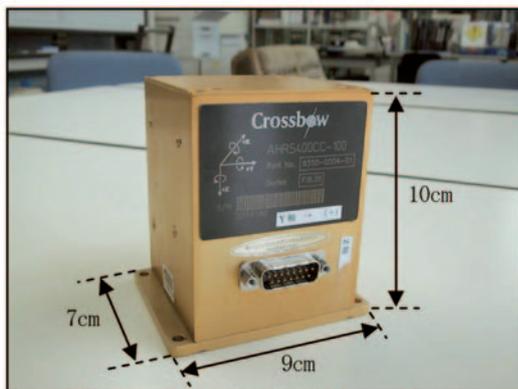


図-2 慣性計測装置 (AHRS400C)

本機種はストラップダウン式の慣性計測装置で、主に自動車・船舶・航空用の試験計測に使用される。それぞれ3軸の加速度計・角速度計・磁気センサー及び温度センサーから構成され、シリアル通信でユーザコマンドの送信と加速度・角速度・磁気方位データの出力が可能である。装置の仕様は以下のとおりである。

更新レート	> 60Hz		
起動時間	< 1sec		
安定化時間	< 60sec		
動作温度	-40~+71°C		
重量	770g		
	角速度	加速度	方位 (磁北)
検出範囲	$\pm 100^\circ/\text{sec}$	$\pm 2g$	± 180 度
ゼロ点	$< \pm 1.0^\circ/\text{sec}$	$< \pm 0.5\text{mg}$	
分解能	$< 0.025^\circ/\text{sec}$	$< 0.25\text{mg}$	$< 0.1^\circ \text{ rms}$
ランダムウォーク	$< 2.25^\circ/\sqrt{\text{hr}}$	$< 0.1^\circ/\sqrt{\text{hr}}$	

3. 車速センサーに関する調査

3.1 車速センサーによる補正の必要性

理論上は慣性計測装置により移動距離の測位は可能であるが、距離を算出する際の加速度の2回の積分（加速度→速度→距離）計算の中に、角速度計の誤差・加速度計の計測誤差、さらには自動車の振動による誤差など、積分誤差が時間とともに累積し測位精度を低下させることから、一般に、実用的な精度を得ることは困難であ

る。そのため移動距離算出には、自動車の走行距離計測・スピードメータに利用されている車速センサーからの情報を用いる方法を検討した。

3.2 車速センサーの検討

車速センサーは、通常、車の駆動軸に取り付けられており、駆動軸の回転数から走行距離・走行速度を算出するもので、回転数は電気信号（車速パルス）としてエンジンコントロールユニットやスピードメータに送られる。この信号を利用する方法としては、①信号を配線から分岐させて直接車速パルスを利用する方法、②車両の故障診断コネクタを介して、車速パルスから計算された車速信号を利用する方法の2種類があり、車速パルス信号、車速信号の両方について調査を行った。

3.2.1 車速パルス方式

車速パルス信号は0.5V程度のパルスで、駆動軸に取り付けられたセンサー数に比例した周波数を持っている。この周波数は自動車の車種により異なるが、駆動軸1回転当たり4~20パルス程度の車が多い。パルス当たりの走行距離は4パルスタイプで約40cm、1秒当たりのパルスカウント数は高速走行時には、約80~400パルスとなる。一般に車種別のパルス情報は自動車メーカーから公表されていないことから、1パルス当たりの走行距離を求めるには独自に既知距離を走行しキャリブレーションを行う必要がある。車速パルス計測用のカウンタについては、調査した限りでは適当な市販品が見つからなかったため、一般工業用のパルスカウンタを使用した。距離計測はタイヤの回転（=駆動軸の回転）計測に拠るため、タイヤサイズの他、摩耗状態、空気圧、積載荷重により変化するので注意が必要である。車速センサーは殆どの車に搭載されているので、新たにセンサーを取り付ける必要は無いが、車速パルスを取得するための配線接続作業には、ある程度の自動車専門知識が必要となる。



図-3 車速パルス配線 (左) 及びパルスカウンタ (右)

3.2.2 車速信号方式

車両の点検などに利用される故障診断コネクタ (OBD-II) からの車速信号を取り出して利用する方法で、走行時の速度情報を得ることができる。本調査研究では市販の燃費計算機を改造して速度情報を取得した。この方式ではメーカー・車種が異なっても、ほぼ規格化されてい

る故障診断コネクタを利用するため、取り付けは非常に簡単で、車速パルスのような、配線作業などは必要とせず、外注作業・レンタカーでの使用が可能である。データ取得間隔は100ms、車速分解能は1 km/h である。診断コネクタからの速度情報は基本的に車速パルスから算出しているため、正確な計測にはキャリブレーションが車速パルス方式と同様に必要となる。



図-4 診断コネクタ (左)・車速信号取得装置 (右)

3.3 車速センサーの精度比較

2種類の車速センサーの距離計測精度の比較を行うため、車速パルスについては、国土地理院構内にトータルステーション計測による簡易キャリブレーションサイトを設け、約100mの走行を繰り返し、パルス当り距離の計測を行った(表-1)。精度比較は、国土地理院構内道路(1周約1.4km)で実施し、周回計測の安定性と走行速度の違いによる安定性を比較した(表-2)。(使用車種:トヨタカローラ(車両型式NZE12 1NZ))

表-1 車速パルスのキャリブレーション

走行回数	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目
走行距離 (m)	104.80	101.60	102.36	102.96	102.43
パルス数	275	266	268	270	269
距離/パルス (cm)	38.11	38.20	38.19	38.13	38.08
平均					38.142
標準偏差					0.052

表-2 車速センサーの精度比較

走行速度	10km/h	20km/h	30km/h	40km/h
車速信号計測距離 (m)	1312	1337	1354	1358
車速パルスカウント数	3591	3595	3594	3590
車速パルス走行距離 (m)	1368.1	1369.6	1369.3	1367.8
標準偏差	車速信号			20.92
	車速パルス			0.91

精度比較から、車速信号方式は走行速度により距離計測値が不安定になることが判明した。原因として車速情報の分解能が1 km/h であるため、特に低速時の分解能が相対的に低くなることが考えられる。一方、車速パルス方式の計測は安定しており、走行速度の違いによる距

離計測への影響は見られない。カウント数も地形図精度に対しては十分に安定している。以上から本調査研究では車速パルス方式による走行距離を使用する。

4. 車載型センサーを用いた道路測位システムの試作

4.1 試作システムの概要

試作した測位システムは①慣性計測装置、②車速パルスカウンタ、③DGPS、④データ取得用PC、で構成される。構成図を図-5に、各装置の特徴を以下に示す。

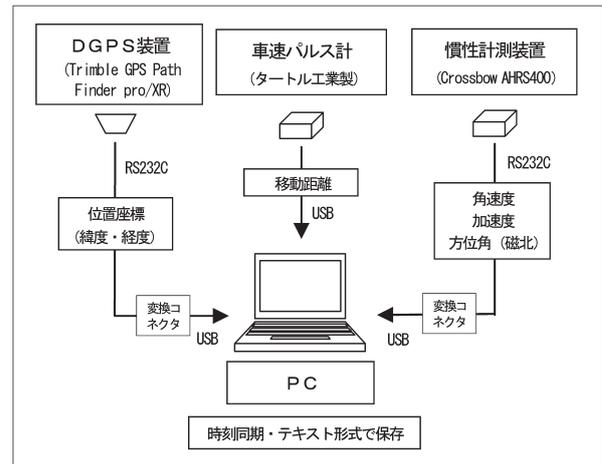


図-5 試作システム構成図

4.1.1 慣性計測装置

米 Crossbow 社製 AHRS400CC (図-2) を使用。装置は自動車の回転軸上への固定が望ましいが、今回の試験計測作業では運転席と助手席の間にテープで固定し使用した。慣性計測装置から出力するデータは、装置内部でアナログ信号をデジタルデータに変換し技術単位に換算したモードを使用した。本装置では、さらに角速度を角度に独自の方法で補正計算したデータ出力も可能であるが、Yaw 角を磁気センサーでリアルタイム補正するため、局所的な磁気異常の回避が困難と判断し使用していない。

4.1.2 車速センサー用パルスカウンタ

タートル工業製 TUSBN1 (購入価格約 ¥28,000、図-3) を使用。PC への接続は USB 専用。PC プログラム作成用の関数及びサンプルコードが付属しており、ユーザによるログ取得プログラム作成が可能である。一般工業計測用のため感度が高く、計測中に車内(シガーソケットに接続した電源)・車外(送電線・高圧線)のノイズから異常なパルスカウントを記録したため、ローパスフィルターによるノイズ対策を施し使用した。

4.1.3 DGPS装置

Trimble 社製 Pathfinder Pro/XR を使用。同型式は全地方測量部に作業用として導入されている。ディファレンシャル補正は海上保安庁のビーコンによる DGPS で

実施。ログ取得はNMEA-GGA及びGSAとし、衛星状態の確認を計測後に行えるようにした。

4. 1. 4 データ取得用PC

車内での使用のためノート型を使用。慣性計測装置及びDGPS装置との接続にはシリアルポートが必要となるが、通信インターフェイスはUSBが主流のため、シリアル-USB変換ケーブルを購入し使用した。

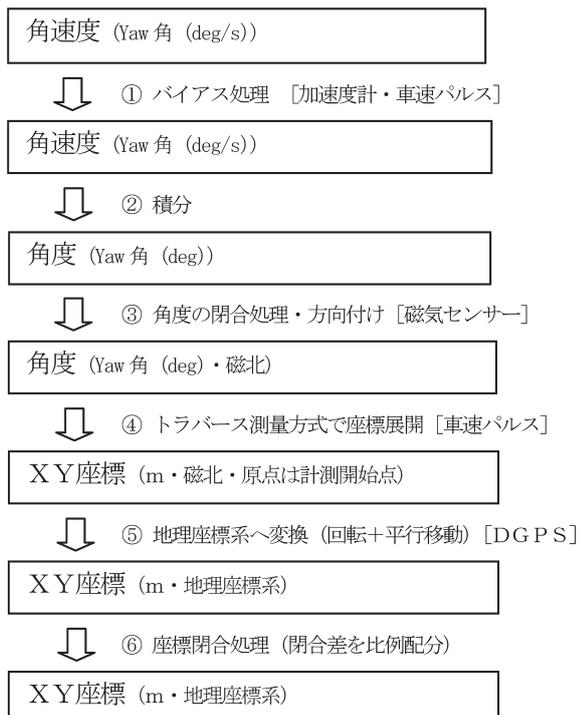
4. 2 測位データの処理

4. 2. 1 データ取得方法

慣性計測装置・車速パルス・DGPSは各々独立した計測装置であり、各データ間の関係付けが必要となる。今回は、各データがPCに入力された時刻をミリ秒単位で付与してログ取得を行うソフトウェアを開発し時刻同期を行った。また、各装置のデータ出力間隔は、慣性計測装置：60～120Hz・車速パルスカウンタ：最大400Hz程度、DGPS装置：1Hzとそれぞれ異なることから、装置毎にインターバル調整が可能な仕様とした。さらなる精度の向上には、各装置からのデータ出力遅延時間・PCとの通信速度の補正が必要だが、今後の課題とする。

4. 2. 2 データ処理方法

位置情報は、慣性計測装置の誤差処理後、走行方向は角速度（Yaw角）の積分から、走行距離を車速パルスのカウントにキャリブレーション結果を乗じたものからそれぞれ計算し、方向と距離から座標展開し、さらにDGPS計測値から地理座標系への変換を行うことで取得できる。慣性計測装置の角速度データから地理座標データ算出までの処理フロー及び処理内容を以下に示す。



① バイアス処理

慣性計測装置で計測される角速度にはバイアス成分（静止時の角速度≠0）が含まれ時間経過により微小変化する。さらに自動車のエンジン振動の影響などの誤差成分が加わり、停止時にも角度変化が計測される。これらのバイアスを消去するため、車速パルス及び加速度センサーから車両の停止時間帯を算出しゼロ点補正を行う。走行時のバイアス計測は困難なので、停止時のバイアス値から線形補正処理を行った。

② 積分計算

角速度（Yaw角）を時間で積分し角度を算出する。

③ 角度の閉合処理

角速度の計測誤差・積分誤差・バイアス補正誤差などからYaw角に累積誤差が生じることから、慣性計測装置の磁気センサーから得た磁北方位角に閉合させ、累積した角度誤差を比例配分するとともに、磁北に対する方向付けを行う。

④ 座標展開

時刻同期された、Yaw角（方向）と車速パルスからの距離を、トラバース測量の要領で繋ぎ合わせて座標展開する。（地理座標系無し・原点は始点となる）

⑤ 地理座標系への変換

時刻同期されたDGPS計測値との対応位置から、平行移動・回転を行い、地理座標系への展開を行う。

⑥ 座標閉合処理

DGPS計測値との較差を、計測点全体に走行距離に比例配分し閉合処理を行う。

4. 2. 3 DGPSデータの欠損区間の補正方法

GPS信号の欠損区間の補正は以下の要領で行う。

- ・DGPS信号が正常に受信可能な場合は、DGPSによる測位結果を使用する。
- ・GPS信号が途絶した場合には、慣性計測装置と車速パルスデータにより補正して使用する。
- ・DGPS計測によるマルチパスは、作業者が不適切な計測点を判断し、欠損区間とみなして補正する。

5. 試作システムによる道路測位試験

測位試験はつくば市の筑波山周辺地区・国土地理院周辺地区及び国土地理院構内で実施した。前述の方法でデータ処理を行い、DGPS欠損区間を補正した結果を以下に示す。測位結果は都市計画図（1:2,500）上に展開し比較を行った。使用した都市計画図は以下のとおり。

つくば市作成 1:2,500 都市計画図（DMデータ）

IX-JE26-4（平成14年作成）図-6

IX-JE36-2（平成14年作成）図-7・8

つくば市作成 1:2,500 研究学園都市計画図

IX-JE55-2（平成10年測図）図-11

IX-JE65-2（平成8年測図）図-12・13

IX-JE66-1 (平成10年測図) 図-10

5.1 筑波山周辺地区 (山間部の補正例)

都市計画図との比較から、図-6では道路幅以内に、図-7では図上計測の最大較差約9mで、2万5千分1地形図修正図化の標定較差制限(12.5m)以内に補正が行われているが、図-8では図上計測較差が約16mで制限値を超えている。

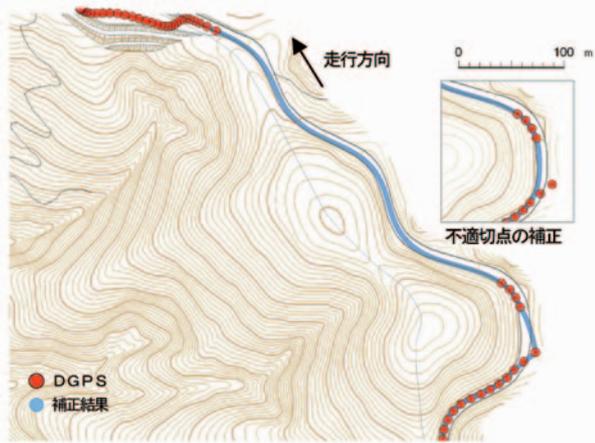


図-6 表筑波スカイライン (補正距離 約380m)

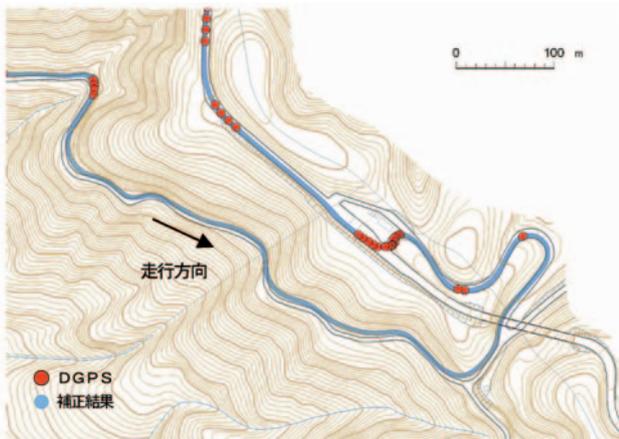


図-7 表筑波スカイライン及び山間部の道路 (補正距離 約780m)

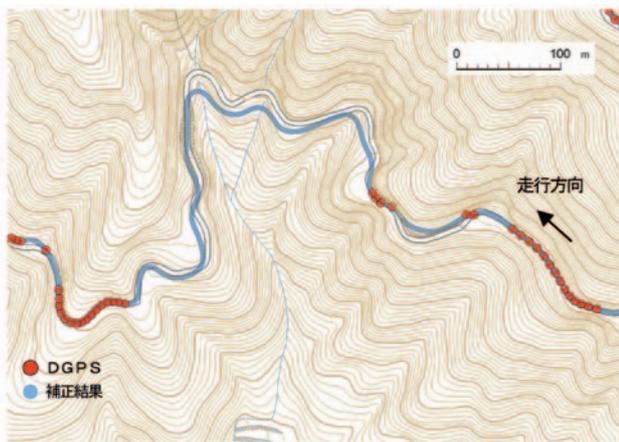


図-8 つくば市山口付近の山間部の道路 (補正距離約580m)

図-9に筑波山地区のDGPS欠損補正の可否状況を示す。補正の可否は、都市計画図の道路との図上計測較差が地形図修正図化の標定制限内(図上0.5mm・地上12.5m)か否かで判定した。結果として、DGPS欠損区間の9割以上を補正処理で補うことができる。

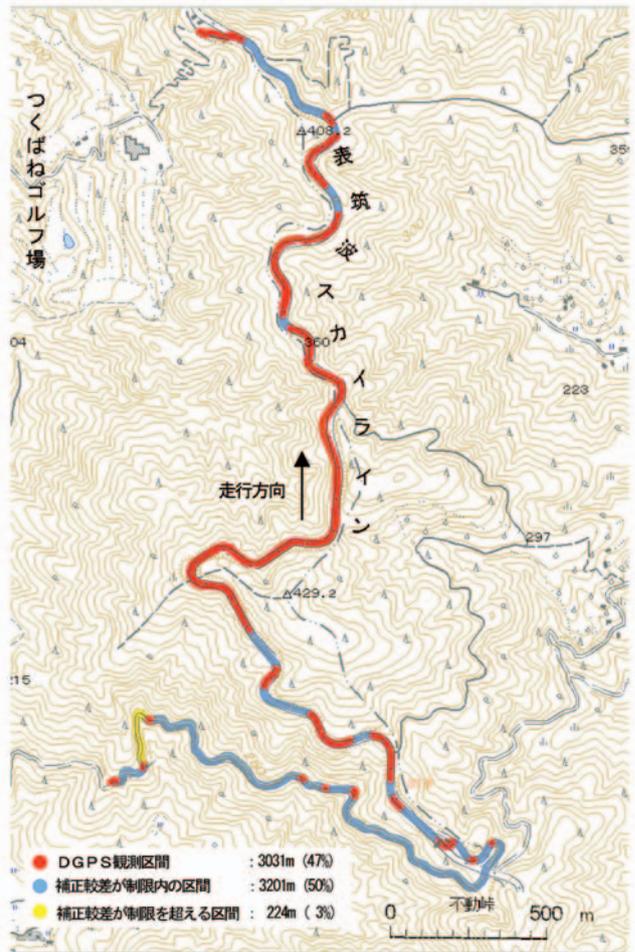


図-9 筑波山地区のDGPS欠損補正の可否

5.2 国土地理院周辺地区 (平野部の補正例)

図-10・11に国土地理院周辺地区での補正例を示す。どちらも良好に補正が行われている。

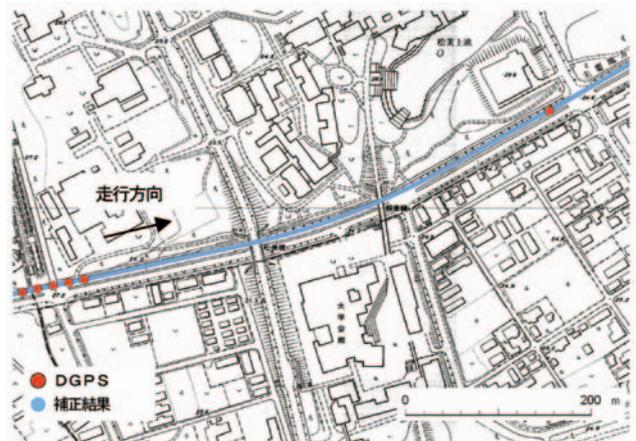


図-10 つくば市天王台地区 (補正距離 約540m)