

D-GPS と 3 軸角度センサの統合による 3 次元走行軌跡の計測

田中 誠, 山肩 伸太郎, 胡 振程 (熊本大学大学院自然科学研究科)
内村 圭一 (熊本大学工学部), 脇阪 信治 ((株)ゼンリン)

自動車を安全でスムーズに運転するために、自律走行や安全運転支援のためのプロジェクトが進められている。自律走行を実現させるに当たっては、走行道路の曲率や片勾配などのデータを利用した自動車のステアリング、スロットル、ブレーキなどの制御が必要であるため、道路地図データを効率よく収集し、正確な 3 次元デジタル道路地図作成データの整備が重要となる。本稿では、計測車両に D-GPS 装置及び 3 軸角度センサを搭載し、道路を走行しながら位置データを収集した後、これらのデータを併用して補正を行い、3 次元走行軌跡データを作成する手法について述べる。

Measurement of 3-D Running Track by Combination of D-GPS and Gyro Sensor

Makoto Tanaka, Shintarou Yamakata, Zhencheng Hu
(Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University)
Keiichi Uchimura (Faculty of Engineering, Kumamoto University)
Shinji Wakisaka (Zenrin Co.)

In order to drive a car safely and smoothly, the project for an autonomous run or safe operation support is advanced. In making the realization of the autonomous run, control of steering, throttle, and brake of the car, etc is necessary. Therefore, the maintenance of a highly precise three dimensions digital road map data is very important. In this paper, the position data are collected with carrying a D-GPS and a gyro sensor on the vehicle and running through the road. The compensation is carried out by the combined use of this data and the technique that makes three-dimensional running track data is described.

1. まえがき

近年、自動車社会の進展とともに、交通事故・渋滞・環境汚染などの様々な自動車交通問題が深刻な社会問題となっている。その対策として、ITS に関する研究が促進されている。なかでも、自動車を安全でスムーズに運転するために、自動車やドライバーの運転支援に関する研究が近年盛んに行われている。特に、「安全運転の支援」と呼ばれる自律走行や安全運転支援のためのプロジェクトが進められている[1][2]。このようなシステムを実現するために、本研究室では、“VICNAS”(Vision Car Navigation Systems)”という新しいカーナビゲーションシステムを提案している。最終的には自律走行を目指しているが、自律走行を実現させるに当たっては、走行道路の曲率や片勾配などのデータを利用した自動車のステアリング、スロットル、ブレーキなどの制御が必要であるため、道路地図データを効率よく収集し、正確な 3 次元デジタル道路地図作成データの整備が重要となっている[3]。

本稿では、計測車両に D-GPS 装置及び 3 軸角度センサを搭載し、道路を走行しながら位置データを収集した後、これらのデータを併用し

て補正を行い、走行軌跡の位置情報(緯度・経度及び高度)から、高精度の 3 次元走行軌跡データを作成する手法について述べる。

2. D-GPS の計測誤差と補正

2.1. D-GPS の計測誤差

D-GPS は 4 個以上の衛星から信号を受信することにより現在の自車の緯度、経度、高度等の路上位置データを測定するシステムで、現在カーナビゲーションシステムをはじめ、広く用いられている。

本研究室で用いた D-GPS(トリプル製 AGGPS)の静止点精度を図 1 に示す。図 1 は、捕捉衛星数 7 個、ディファレンシャル測位時の、静止した状態での測定結果である。図より、D-GPS は信号の受信状態が良好な場合には、非常に精度の高い路上位置測定が可能である。

しかし、図 1 の精度は常に保証されているわけではなく、D-GPS の信号の受信状態に大きく左右され、特に以下のような条件下においてその誤差は顕著である。

- 1: 捕捉衛星数の不足
- 2: 捕捉衛星の配置(DOP 値)

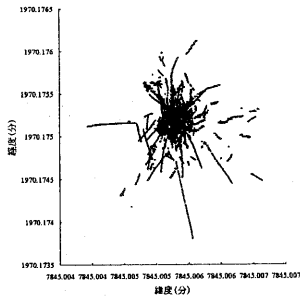


図 1: 静止時の D-GPS 測位時の緯度, 経度の測位結果
(場所: 熊本市北バイパス,
日時: 2000 年 2 月 4 日 14:30~15:00)

- 3: ディファレンシャル信号が捕捉できない
- 4: 固定局の変化

D-GPS では, 4 個以上の衛星を捕捉可能な場合には緯度, 経度, 高度の路上位置の計測が可能であるが, ビル街, 高圧線下等では, その衛星数を確保することが出来ない場合がある。また, 4 個以上の衛星を捕捉していても, その衛星の配置によってはデータの精度が低下する場合がある。これは, D-GPS のデータの 1 つである DOP 値として表されている。

ディファレンシャル信号も, 設置されている場所に限りがあるため, ビル街等の受信環境が悪い場所では受信できない場合が多くある。また, 固定局の補正データは固定局それぞれで多少異なるため, 捕捉しているディファレンシャル信号を発信している固定局が変化すると数 m の誤差を生じる場合がある。

2.2. 従来法の問題点

従来の 3 次元走行軌跡の計測としては, 主に車測センサからのデータを用いることにより, D-GPS データを補正して計測する手法がある[4]。しかし, 車測センサによる補正データには坂道等で生じる勾配に対する補正データは含まれていない。そのため坂道を走行する際, 実際に自車が走行した距離を L , 坂道の勾配を θ_x とした場合, 実際の地図平面上の移動距離は $L \cos \theta_x$ となる。そのため, 1 回の補正に対して $L(1 - \cos \theta_x)$ の誤差が生じる。これは補正毎に生じ累積するため, 最終的には実際とは異なる路上位置を出力してしまう。

2.3. 3 軸角度センサを用いた D-GPS データの補正

次の条件下において補正を行う。

- 1) D-GPS と 3 軸角度センサの方位角の誤差
3 軸角度センサから得られるデータを真値とし, D-GPS の方位角と, 3 軸角度センサのヨ

一角の差分が 10 度を越えた場合に補正を行う。

- 2) 衛星ステータス
可視衛星数が 4 個以下の場合, もしくは DOP 値が 2 以上の場合に補正を行う。
- 3) ノード間の移動距離
自車が静止状態でも, D-GPS のデータは微妙に動いている。そのため静止時には方位角が定まらず, 自車の現在方位が分からない。そのため, D-GPS の緯度, 経度が出力できる桁以下の移動距離, 本稿では 30cm 以下の場合には, 自車は静止していると判断し, 緯度, 経度, 高度, 方位角を固定させる。
- 4) 出力文字列の完全性

D-GPS の出力データは文字列として得られるが, 全ての時間のデータが完全な形で得られるとは限らない。高架下やトンネルに入った場合など, 完全にデータが得られない場合には, その間の補正も行う必要がある。(本稿では出力文字列の補正法については割愛する。)

以上の条件に当てはまる際は, 誤差が生じる前の信頼できる D-GPS データを基準として, 3 軸角度センサによる相対測位を行う。補正対象となる D-GPS データは, 緯度, 経度, 高度の 3 個である。この 3 つのステータスを補正するために, 以下の手順を踏む。(詳細は文献[5]を参照)

- 1) 修正対象ノードが基準ノードに対して, 実際はどの方向に進んだかを求める。
- 2) 基準ノードから修正対象ノードまでの, 実際の移動距離を求める。
- 3) 1) の方向と 2) の移動距離から緯度, 経度を推測し, 2) の移動距離と 3 軸角度センサのピッチ角から高度を推測する。

3. 3 次元走行軌跡データの作成

補正によって特定された地図上のノード位置から新たにノードを道路に沿って一定間隔毎に作成することによって, 3 次元走行軌跡データを表現する。新たなノードデータには緯度, 経度, 高度および 3 軸角度センサから得られるピッチ角, ロール角のデータが含まれる。

3.1. D-GPS データ補正時の累積誤差の修正

D-GPS のデータを 2.3 に従って補正を行う場合, その間は 3 軸角度センサによる相対測位データとなる。補正開始ノードを N_i , D-GPS データが信頼性を回復したノードを N'_{i+k} , N'_{i+k} と同時刻まで補正計算を行った場合のノードを N_{i+k} とする。補正を行うにあたり 3 軸角度センサの

計測毎に生じる誤差が累積し、トンネル走行時のような長時間補正を行う場合には、少なからぬデータの誤差が生じてしまい、図2のように同時刻では一致すべき N_{i+k} とノード N'_{i+k} が一致しない場合が生じる。

このような場合に、2つのノードデータの緯度、経度、高度がそれぞれ等しくなるように補正データの再補正を行う。

緯度、経度データの再補正法を以下に示す。

- 1) 各ノードの緯度、経度を N_i を原点とした秒座標に変換する。
- 2) 式(1)および式(2)を計算する。

$$\cos \omega_i = \sin \phi_i \sin \phi_{i+1} + \cos \phi_i \cos \phi_{i+1} \cos(\varphi_i - \varphi_{i+1}) \quad \dots\dots(1)$$

$$L_{i+1} = \frac{R \cos \omega_i \times \pi}{648000} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 (ϕ_i, φ_i) : N_i の緯度、経度

$(\phi_{i+1}, \varphi_{i+1})$: N_{i+1} の緯度、経度

ω_i : 地球の中心から見た N_i と N_{i+1} の間の角

R : 地球の半径(=6370000m)

L_{i+1} : N_i と N_{i+1} の間の距離(m)

- 3) N_i を基準に北から時計廻りに N_{i+1} までの角度 θ_i 、同様に N_{i+k} までの角度 θ_{i+k} を求める(図2参照)。
- 4) 3)で得られた角度の差 $\Omega(=\theta_i - \theta_{i+k})$ を求め、補正データの緯度 lat'' および経度 lon'' を式(3)を用いて求める。その点を N''_{i+k} とする(図3参照)。

$$\begin{cases} lat''_{i+k} = L_{i+k} \cos(\theta_{i+k} + \Omega) / Slat & \dots\dots(3) \\ lon''_{i+k} = L_{i+k} \sin(\theta_{i+k} + \Omega) / Slon \end{cases}$$

ここで、 lat''_{i+k} : N_i を原点とした回転後の緯度

lon''_{i+k} : N_i を原点とした回転後の経度

L_{i+k} : N_i から N_{i+k} までの距離

$Slat$: 1秒当たりの緯度の距離(30.81840487m)

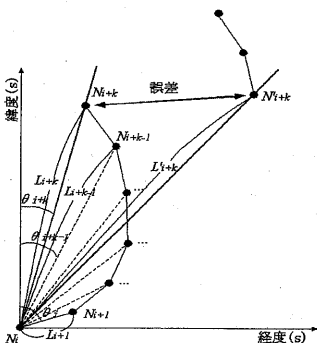


図2 : D-GPS データ補正後の累積誤差とノード N_i から見た補正ノードの距離と方位角

$Slon$: 1秒当たりの経度の距離(30.92208783m)

- 5) N''_{i+k} を N'_{i+k} の座標に一致するように拡大、縮小するため、式(4)を用いて倍率 β を求める(図3参照)。

$$\beta = L'_{i+k} / L_{i+k} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 L_{i+k} : N_i から N_{i+k} までの距離

L'_{i+k} : N_i から N'_{i+k} までの距離

- 6) 式(5)のように、 N''_{i+k} の緯度、経度を拡大、縮小することにより補正された各ノードの緯度、経度のデータ $N'''_{i+k}(lat'''_{i+k}, lon'''_{i+k})$ を求める。

$$\begin{cases} lat'''_{i+k} = lat''_{i+k} \times \beta \\ lon'''_{i+k} = lon''_{i+k} \times \beta \end{cases} \quad \dots\dots(5)$$

ここで、 lat'''_{i+k} : N_i を原点とした再補正後の緯度

lon'''_{i+k} : N_i を原点とした再補正後の経度

- 7) 再補正された N'''_{i+k} の座標を N_i の座標に加えることにより、再補正された緯度、経度を求める。

高度データの再補正法を以下に示す(図4参照)。

- 1) N_{i+k} の高度 H_{i+k} と N'_{i+k} の高度 H'_{i+k} を求める。
- 2) 1)で得られた高度 H_{i+k} および H'_{i+k} から、倍率 χ を式(6)により求める。

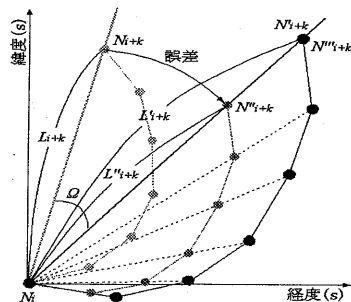


図3 : データ補正時の方位角の誤差と緯度、経度の再補正の倍率

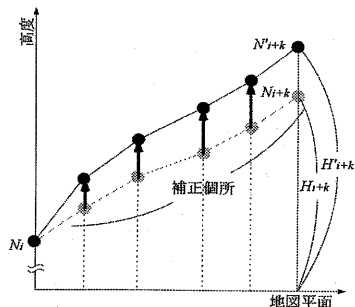


図4 : 高度データの再補正法

$$\chi = H'_{i+k} / H_{i+k} \quad \dots\dots(6)$$

3) 2)で求めた倍率を用い、ノードの高度のデータを拡大，縮小することによって，高度の再補正を行う。

3.2. 等間隔ノードの作成

ここまで補正してきた D-GPS の路上位置データのノード間隔は，自車の速度により決定されるため一定ではない．ある一定間隔 Δl 毎にデータを作成するためには，D-GPS データノードから 3 次元走行軌跡データノードのステータスを推定する必要がある．その作成手順を以下に示す．

- 1) 最初の D-GPS データノードを最初の 3 次元走行軌跡データノードとし，速度データより道路に沿った Δl の地点を計算する．
- 2) 図 5 のように，計算された 3 次元走行軌跡データノードが，D-GPS データノード N_i とノード N_{i+1} の間に出来た場合には，前後 2 つのノードデータの変化量に比例したノードデータを式(7)を用いて作成する．

$$\begin{cases} lat_i = lat'_{i-1} + (lat'_i - lat'_{i-1}) \times l_i / L_i \\ lon_i = lon'_{i-1} + (lon'_i - lon'_{i-1}) \times l_i / L_i \\ high_i = high'_{i-1} + (high'_i - high'_{i-1}) \times l_i / L_i \end{cases} \quad \dots(7)$$

ここで， $lat_i, lon_i, high_i$: 等間隔ノードの緯度，経度，高度

$lat'_{i-1}, lon'_{i-1}, high'_{i-1}$: 作成する等間隔ノードの直前の D-GPS データノードの緯度，経度，高度

$lat'_i, lon'_i, high'_i$: 作成する等間隔ノードの直後の D-GPS データノードの緯度，経度，高度

L_i : D-GPS データノード N_i と N_{i+1} 間の距離

l_i : 作成する等間隔ノードの直前の

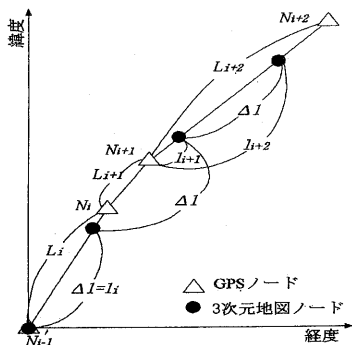


図 5 : 3 次元走行軌跡データノードの作成

D-GPS データノードから作成する等間隔ノードまでの距離

3) 2)の手順を繰り返しながら，等間隔のノードを作成していく．

以上の手法を用いることにより， Δl 間隔で道路の緯度，経度，高度，さらに，道路の状況を示すピッチ角，ロール角のデータを持つ 3 次元走行軌跡データを作成することが出来る．

4. 3次元走行軌跡データ作成結果

4.1. 3軸角度センサを用いた D-GPS データの補正結果

2.3.における 3 軸角度センサを用いた D-GPS データの補正法を用いた実験結果を図 6 及び図 7 に示す．図 6(a)では，矢印の個所にデータの誤差が生じている．これは，基地局が若宮から，瀬戸に変化したために生じた誤差である．補正した同図(b)では，同図(a)に現れた誤差が，矢印の個所に補正出来ていることが分かる．

図 7(a)では，受信状況が悪かったため，データが 1 つ消失している．補正した結果を同図(b)に示す．

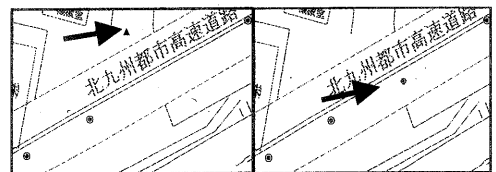
4.2. 3次元走行軌跡データ作成

4.2.1. D-GPS データ補正誤差の修正結果

ここでは，3.1.で示した D-GPS データ補正誤差の修正結果を示す．図 8 に累積誤差が生じた詳細図を示す．図 8 では，33 秒間の補正後，100m 弱の誤差を生じてしまった．このデータを再補正した結果を図 9 に示す．累積誤差を修正することによって，連続した測位データを得ることが出来ている．

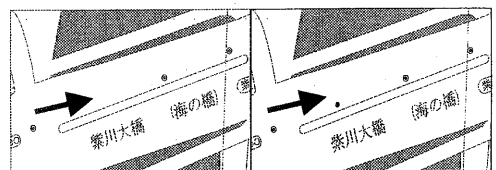
4.2.2. 3次元走行軌跡データ作成結果

等間隔ノードの作成結果を図 10 示す．ここでのノード間隔は 10m である．



(a):D-GPS の計測誤差 (b):補正結果

図 6 : D-GPS の計測結果



(a) : データの消失 (b) : 補正結果

図 7 : データの消失

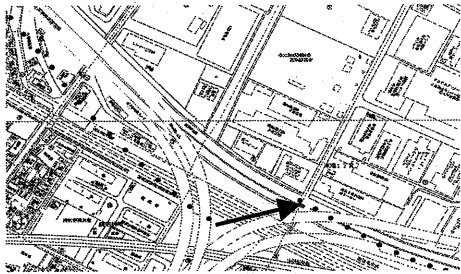


図 8：累積誤差

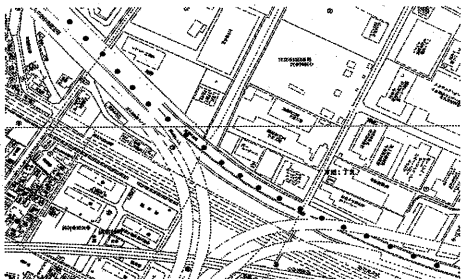
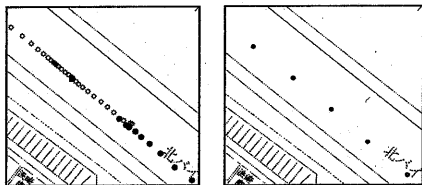


図 9：累積誤差再補正結果



(a)作成前 (b)作成後
図 10：等間隔ノード作成

熊本北バイパス道路上を平均時速 60km で走行し、その軌跡を提案手法により作成した結果を図 11 に示す。往路復路とも道路上にノードが等間隔にプロットされている。図 12 に熊本北バイパス(往路)の高度を計測後、補正した結果を示す。参考のため、同図に建設省工事図面に記載された高度を示している。これらの高度差を図 13 に示す^{*1}。この結果、平均高度差は 0.21m、高度差の分散は 1.06m であった。

図 11 では、道路周辺の高層建造物、谷あい走行などの影響がなく、D-GPS 補正捕捉にとって好条件下であるために、D-GPS 測位データのみで高精度に測位できた。そこで、D-GPS 測位データが 3 秒間欠損した場合のデータを故意に作成し、走行軌跡を推定した結果を図 14 に示す。緯度、経度、高度の D-GPS 測位データと

*1 建設省工事図面による高度 H_k と D-GPS 測位による高度 H_D には、 $11.8628m(H_k - H_D)$ の差があったので、補正した。

補正結果との比較をそれぞれ図 15、図 16、図 17 に示す。これらの結果、平均移動差は 0.55m、平均高度差は 0.16m であった。

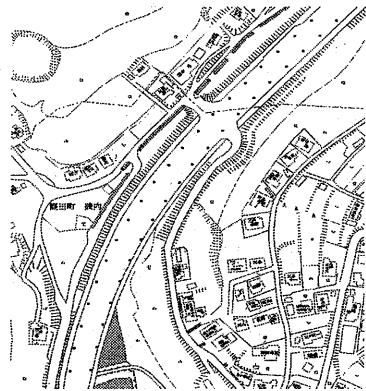


図 11：3次元走行軌跡データ（熊本北バイパス）

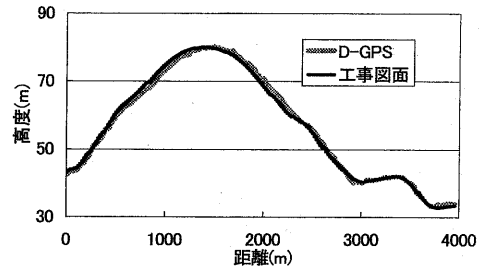


図 12：3次元走行軌跡データと工事図面との比較

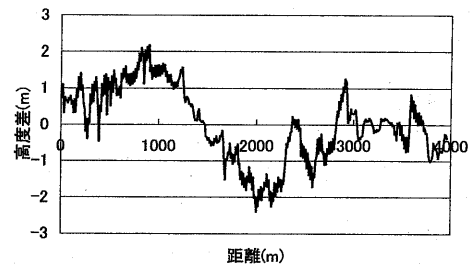
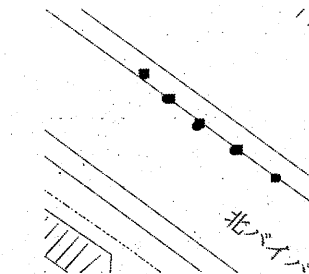


図 13：工事図面と 3次元走行軌跡データとの高度差



●D-GPS 測位データ ■補正結果
図 14：D-GPS 測位データと補正結果

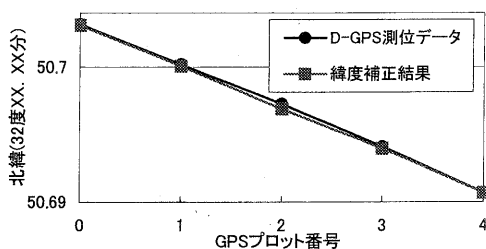


図 15: D-GPS 測位データと補正結果(緯度)

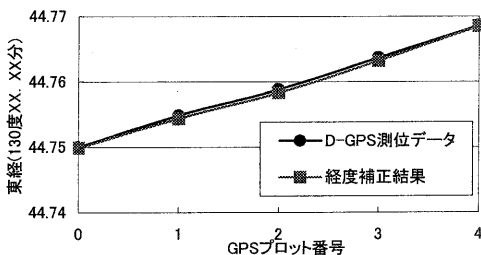


図 16: D-GPS 測位データと補正結果(経度)

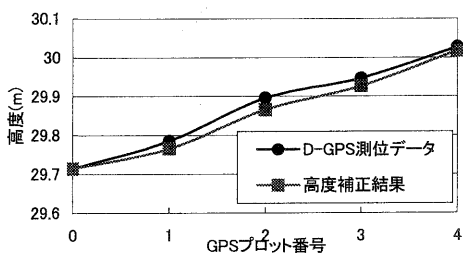


図 17: D-GPS 測位データと補正結果(高度)

4.3. 考察

4.1. において, D-GPS データに誤差がある場合, D-GPS 測位データが消失している場合共に, 短時間の補正に対しては図 6, 図 7 に示されるような優良な結果を得た. しかし長時間の補正を行った際には, 3 軸角度センサによる累積誤差と, 自車の速度を履歴から推測しているために生じる誤差のために[5], 図 8 のような誤差を生じてしまう場合があった. 3 軸角度センサを用いることによる誤差はそれほど大きくはないと思われるが, 車速に推測値を用いているということは, 特に, 自動車が頻繁に加減速を行うような場所での補正の際に, 自車の速度を推測する際に大きな誤差を生じさせてしまう. この誤差は, 車速を推測値ではなく, 車速センサ等の機器から得ることによって小さくすることができると思われる.

4.2. において, 3 次元走行軌跡データを道路に沿った 10m 間隔で作成した. 結果は, すべての

ノードが不慣れた挙動を示さずに道路上に配置された. また, 作成した 3 次元走行軌跡データの高度データと工事図面の高度データとの間に平均高度差 0.21m, 高度差の分散は 1.06m となった. また, データ補正に対する修正では, 図 15 ~ 図 17 に示したように平均移動差は 0.55m, 平均高度差は 0.16m であった. 平均 60km/h での走行実験を考慮すれば, 今回作成した 3 次元走行軌跡データは良好であるといえよう.

5. むすび

本稿では, 3 次元走行軌跡データの作成原理を示し, その有用性を示した. 地図の作成に当たっては, 高精度に緯度, 経度, 高度を測定することが可能である D-GPS を用いた. 既存の手法では, 山道のような縦断勾配の存在する 3 次元の道路走行時に補正を行うと誤差を生じてしまう問題点があることから, 3 軸角度センサも用いることにより補正を行った. しかし, 3 軸角度センサのような相対測位を行う機器による計測は, 潜在的に誤差を生じる可能性を秘めていることから, 補正を行っても多少の誤差を生じてしまう. そこで, D-GPS 及び 3 軸角度センサのそれぞれ連続した 3 個のデータを用いることにより誤差の補正を行い, より高精度なデータを作成した. また, ノードを道路に沿って等間隔に作成することにより, 3 次元走行軌跡データを作成した.

今回は後処理によるデータの補正と 3 次元走行軌跡データの作成を行ったが, 今後は車速センサ等を用い, リアルタイムに, かつ, 高精度に 3 次元走行軌跡データを作成する予定である.

参考文献

- [1] 知的交通計測調査専門委員会編, "知的交通計測," 電学技報, 第 512 号, 1994.
- [2] NAHSC, "Automated Highway System(AHS) System Objectives and Characteristics," NAHSC, Washington, D.C., Nov. 1995.
- [3] 山肩伸太郎, 胡振程, 内村圭一, 脇阪信治, "VICNAS を用いた精密な路上位置測定", 道路交通研究会資料, RTA-99-17, 1999
- [4] 脇阪信治, 中村孝広, 藤田秀勝, "移動基地局型 DGPS/自立航法統合地図データ収集システムの開発", 第 9 回 AM/FM International, pp.73-80, 1998.
- [5] 田中誠, 山肩伸太郎, 胡振程, 内村圭一, 脇阪信治, "VICNAS を用いた 3 次元デジタル道路地図作成", 情報処理学会九州支部研究会, pp163-170, 2000.
- [6] 国立天文台編, "理科年表-1999 年度版", 丸善.