

# 自動車用航法システム序論

沖 喜 久 雄

The Introductory Analysis of Navigation System for the Car

Kikuo OKI

## Abstract

Recently for the performance enhancement of the car, the navigation system is under development. But it has some difficult problems in angular velocity sensors of a car.

In this paper, the author develops the theory of the system by introducing the differential equation of a car's motion. In particular, he discusses the effect of earth's angular motion to car's intertially measurable angular velocity sensors and the error of this system which is induced by earth's angular motion.

This work supplies the theoretical background for the system.

自動車は動力によって走る乗物としては殆んど完成の域に達した。次の発展の段階としては、誰でもが、特別な運転技術をもたなくとも、より安全に、快適に運転ができる乗物にすることである。つまり無機物質的で、単に走る乗物から、少しは神経のかよった走り方を車自体で出来る乗物にすることである。

かつて馬から自動車に代った時、それまで生きものである馬自体の判断によって走っていた部分も、すべて操縦者の負担になり、人が判断しなくてはならいことになった。それを運転の楽しみとした時代があったかも知れないが、長距離で複雑な道路網上の、はげしい交通状態で、楽しみと云うより事務的な交通機関となった現在では、再び車自体が何らかの判断力をもち、人はその煩わしさから解放されることを望んでいる。

この点に近代エレクトロニクス技術を中心とする自動制御技術が取り入れられる基盤がある。取りわけマイコンと云う頭脳も開発されるに及んで、この傾向にますます拍車がかかっているのが現状である。

そこで比較的条件が明確で、実現し易いエンジンまわりに、そう云う装置が多い。例えば、電子制御燃料噴射装置、点火時期制御装置、これらを総合的に行うエンジン総合制御システム等が開発され、更に運転操作系についても、自動変速機、スキッドコントロール装置、速度感応型パワーステアリング等、多くの自動制御装置が開発されてきた。

しかし、これらはいずれも、車自体の運転操縦に関す

る装置であって、航法の自動化システムではない。交通機関としてシステマ的に扱い、運用効率をあげるための、云わゆる航法システム自動化装置ではない。このことに関しては、最近、交通状況を情報として無線装置により伝え、渋滞をさけて能率のよい運転を目的としたシステムが国家的規模で考えられ、研究されて実用化にむかっている。

このように他の施設からの援助によるものでは、どうしても場所の制約を受けるから、航空機用慣性航法装置のような、車に内蔵される航法システム (Navigation System) が待望されている。それによって、車の走行した道程、及び現時点の位置を知り、更に取りべき最適経路の選定が可能になれば、航走時間の短縮と共に、エネルギー節約、運転による疲労の軽減等に役立つことは言うまでもない。

航空機では、慣性航法装置が発達し、航行安全はもち論、航空路も正確にえらぶことができ、従って所要時間も短縮される。その時々刻々の時点の位置の誤差は、装置の性質上航行した距離ではなく、飛行時間によって増大するが、最新の高性能のものでは1時間当りの誤差200米のものも試作されている。

車は車輪を通じて大地に接し、地球表面とは云へ道路である線上を走る。2次元上にありながら、実際には巾の限られた線上になければならず、従って道路線上では或る程度の誤差は許されても、道路巾については極めてきびしい正確度を要求され、航空機の広い空間に於ける誤差と同じように論ずることはできない。

そこでこの論文では、或る種の仮定をおいて、車の運

動方程式を求め、車上で得られたデータ、つまり速度計とか走行距離から得られる車の対地速度値、及び角速度計による車の鉛直軸まわりの角速度値を基礎として、走航ルートを推定し、その結果、現在地点の位置を知る航空機に於ける慣性航法システム様の航法システムを取りあげ、特に角速度計から生ずる誤差について考察した。

### 1. 車の運動方程式

車は地球表面上の道路を走るとは云え、平らな2次元上の道路ではなく、正確には3次元面上にあるとすべきであろう。しかし本質を見失わず、考察を単純化するために、ここでは平面上にあって、その運動範囲は大地が球面であるための影響を無視できる程度とする。出発時及び停止時に当然考えられる加速、減速、及び走行中もアクセルによる速度変化があるから、速度は必ずしも一定ではないが、操舵による車体の鉛直軸まわりの回転は時間おくれはなく、進行速度も変らないものとする。

車体は大きさのない質点として扱うが、実際車体の前後軸は進行速度ベクトルの方向と一致しているとして、次のように運動方程式をおく。

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = v^2 \quad (1.1)$$

$$\frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \tan\left(\alpha_0 + \int_0^t \omega dt\right) \quad (1.2)$$

$x, y$ : 地上に取った直交座標

$\omega$ : 車の重心を通る鉛直軸まわりの回転角速度 (方位角速度)

$v$ : 前進速度ベクトルの絶対値

$\alpha_0$ : 車の出発時方位角 (向き)

$t$ : 時間

(1.1)式は走行運動、(1.2)式は車体の鉛直軸まわりの回転運動に相当する。従って、回転角速度 $\omega$ は運転者のハンドル操作に関係するが、それにはふれない。

この両式から明らかなように、車の速度ベクトルは常に車の前後軸と一致し、かつ横滑りもないとしてあるから、車は走行する道路曲線の接線方向をむいている。これが操縦と云うことに対応する。従って操縦は道路の形状によってきまるので、ここには代表的な道路をとって操縦との関係を見よう。

#### a) 直線道路

第1図のような直線道路で簡単化するために、出発点

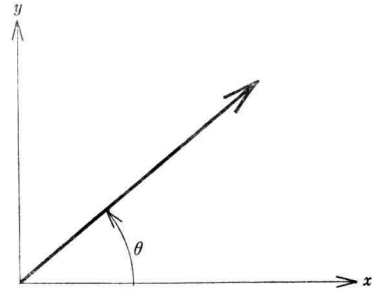


Fig 1. Straight line route

を原点にとれば、道路の式は次のようにおくことができる。

$$y = mx \quad (1.3)$$

ただし

$$m = \tan \theta$$

従って式(1.2)より

$$\tan \theta = \tan\left(\alpha_0 + \int_0^t \omega dt\right)$$

この解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 &= \theta, \quad \omega = 0 \\ x &= v_0 t \cos \theta \\ y &= v_0 t \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

これらの式から、車は車軸の向きを変えずに直進することが分る。運転者はハンドルを固定したまゝにしている。

#### b) 円形道路

第2図に於て、 $x$ 軸上のA点より、これに直角方向

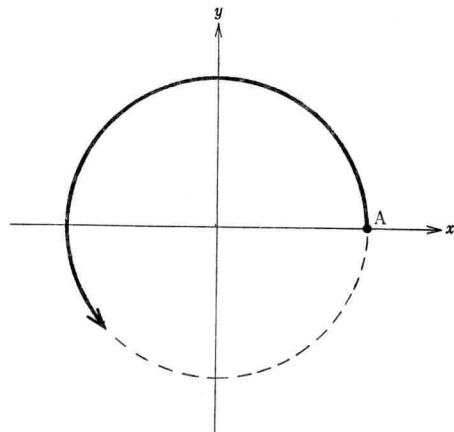


Fig 2. Circle line route

$(\alpha_0 = \frac{\pi}{2})$  に出発し、次式にて示される円形道路上を走るものとする。

$$x^2 + y^2 = a^2 \quad (1.5)$$

$a$ : 半径

これを微分して

$$x \frac{dx}{dt} + y \frac{dy}{dt} = 0 \quad (1.6)$$

上式と (1.2) 式より次式を得

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -a\omega \sin\left(\int_0^t \omega dt\right) \\ \frac{dy}{dt} &= a\omega \cos\left(\int_0^t \omega dt\right) \end{aligned}$$

従って (1.1) 式より

$$a\omega = v$$

つまり、車は  $a/v$  なる角速度で、むきを連続的にかえながら走り、運転者はこのような車体の角速度に対応するように、ハンドルを定位置にとっておく必要がある。

一般の道路は上述の2種の道路を連結したものと考えられるから、操縦法もこの両方式を適宜組合せたものである。

このように道路の形状が定まれば、車の走行速度に対して、車体の回転角速度が規定されるから、運転者はそのような回転角速度になるように、ハンドルの取ればよい。

次に、(1.1) 式、(1.2) 式を時間についてといて次式を得

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 + \int_0^t |v| \cos\left(\alpha_0 + \int_0^t \omega dt\right) \cdot dt \\ y &= y_0 + \int_0^t |v| \sin\left(\alpha_0 + \int_0^t \omega dt\right) \cdot dt \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

ただし  $(x_0, y_0)$  は出発点の座標。

この (1.7) 式は車上で速度  $v$ 、及び車のむきの回転角速度  $\omega$  を得れば、道路は地面上の直交座系の座標  $(x, y)$  として求められることを示している。簡単な場合を例にとってみよう。

a)  $\alpha_0 = \theta$  (一定値),  $\omega = 0$

走行速度は一定値とし  $v_0$  とおき、出発点を原点とすれば、(1.7) 式より

$$y = \tan \theta \cdot x$$

つまり、この式は (1.3) 式と同じであり道路は第一図に示した直線道路である。

走行速度が一定値でなく、任意の時間関数としても、

道路の形状は変わらないが、車の座標は次式にて示される。

$$\begin{aligned} x &= \left(\int_0^t v \cdot dt\right) \cos \alpha_0 \\ y &= \left(\int_0^t v \cdot dt\right) \sin \alpha_0 \end{aligned}$$

b)  $\alpha_0 = \pi/2$ ,  $\omega = v/a$  ただし  $a$  は常数。

走行速度  $v$  を常数とすれば、初期値を  $x=a$ ,  $y=0$  として (1.7) 式は次のように計算される。

$$x = a \cos \frac{v}{a} t,$$

$$y = a \sin \frac{v}{a} t,$$

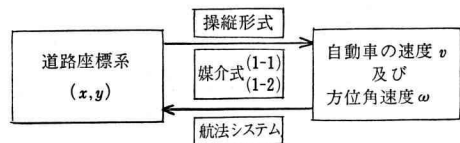
従って

$$x^2 + y^2 = a^2$$

故に第2図に示した円形道路である。

このように、車の運動方程式 (1.1) 式、(1.2) 式により、走行する道路がきまればその操縦法、或は、車の走行状態が分り、又一方、車の走行時の対地速度及び車体の鉛直軸まわりの角速度が知られれば、時々刻々の車の座標値  $(x, y)$  が計算され、これに適当な縮尺度を乗じて、地図上にプロットして行けば、車の走行しつつある道程が地図上に示され、航法システムを構成することができる。故に (1.1) 式及び (1.2) 式は航法システムの原理式でもある。

これを図式で示すと次のようになる。



## 2. 車の航法システムの機構

前節に述べたように、(1.1) 式、(1.2) 式を具体化すれば自動車用航法システム装置ができる。その際取りあげべきデータとしては、対地速度計又は走行距離計より前進速度を知り、レートジャイロ、振動ジャイロ、或いはガスレートセンサ、もし高級な測定器であるならば、レーザジャイロ等の角速度計を用いて、車の方位角速度値を知り、これより計算によって走行中の道路を地図上に展開することができる。

第3図にこの装置のブロック線図を示した。車の方位角速度を知って、これを積分し、時間の関数として車の

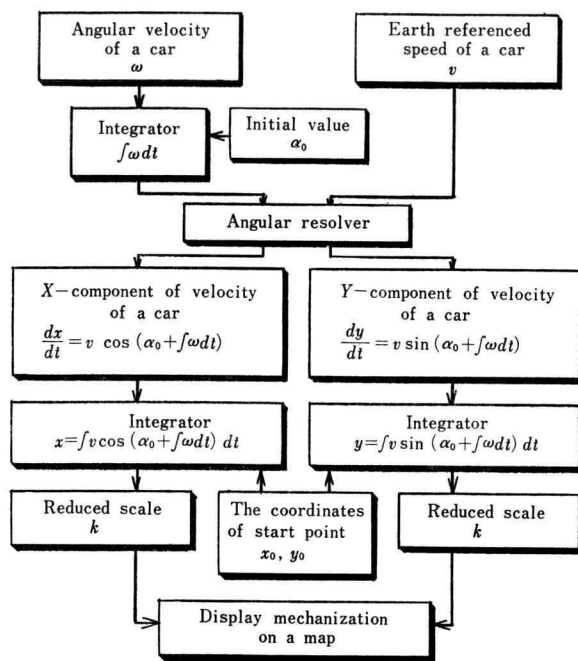


Fig 3. The navigation system of a car

むきを求め、このむきにより車の進行速度をあらかじめ定めた地面上の直交軸 ( $x, y$ ) 座標成分にわけけるために、角度レゾルバに方位角及び走行速度値を導入する。その結果、 $x$  軸  $y$  軸に対する対地分速度が得られ、これを積分した後、適当な縮尺度を乗じて地図上にプロットし、地図上のルートとしての車の走行道程が示され、同時に現在位置も明らかにされる。

更に目的地に到達するための最適ルートを予め地図上に指定しておけば、それに沿って進行して道に迷うこともなく、最短ルートを取ることができるから、燃料節約もできる。何よりも走行しているルートに運転者は自信をもつから、運転中左顧右べんすることなく、安全な運転ができるであろう。

この方式の装置の中心は車の方位角速度計である。走行距離の誤差は道路にそっての位置誤差になるから、多くの場合道をまちがえる程の誤差にはならない。かりに走行距離に 1% 誤差があったとしても、50 km 走って 500 米の誤差になり、5 万分地図上では 10 耗であり、隣接する他の道路と取りちがえることなく、走行道路上の位置誤差として判断がつくであろう。これと比較すると、角速度計の誤差は、道路巾からはずれるばかりでなく、時としては、その時点で走行している道路を取り違える可能性すらあり得る。従って角速度計の誤差につい

ては慎重でなくてはならない。

例えば、直線道路について、この種の誤差の影響をしらべてみよう。簡単化するために  $x$  軸にそった直線道路を取り、これを  $v$  なる速度で  $x$  軸の正方向に走っているとすれば、方位角は変らないから、角速度計の出力はない。しかしドリフトが極微量  $\varepsilon$  だけあるとすれば、この場合、 $x$  軸、 $y$  軸の速度成分は次のようになる。

$$\frac{dx}{dt} = v \cos(\varepsilon t)$$

$$\frac{dy}{dt} = v \sin(\varepsilon t)$$

$v$ : 前進速度で常数

座標原点から出発したとして、

$$x = \frac{v}{\varepsilon} \sin(\varepsilon t)$$

$$y = \frac{v}{\varepsilon} (1 - \cos(\varepsilon t))$$

$\varepsilon$  は極めて小さく、時間  $t$  は  $1/\varepsilon$  より極めて短い時間として展開すれば

$$x = vt$$

$$y = \frac{1}{2} \varepsilon vt^2$$

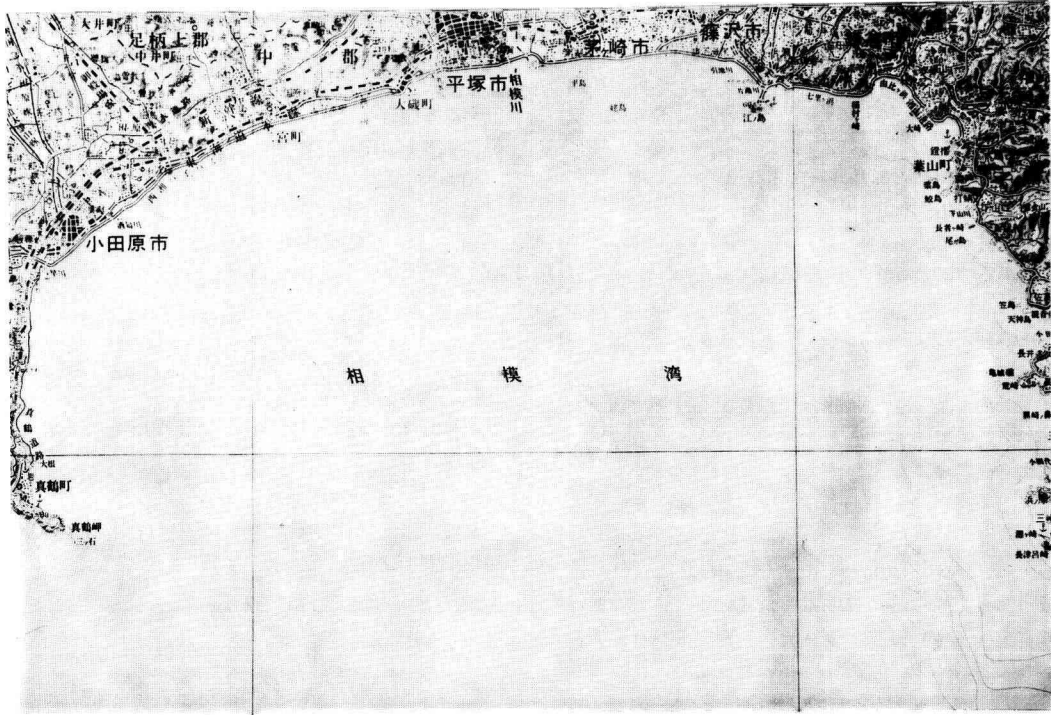


写真 1

かりに毎時 60 km の車は於て、ドリフト  $\varepsilon$  が毎秒 0.001 度の時、10 分間走ると横方向に 52 米道路よりづれることになる。従って、この形式の航法システムの性能は角速度計によって左右される。

### 3. 角速度計に基づく誤差

航法システムの中心機能を果すべき角速度計の選定はむづかしい。極めて小さい角速度まで測定する必要があるが、それによって別の難点、つまり地球自転の影響を受けることも考えられる。その点について考察する。

#### a) 最小感度について

半径  $R$  である円形道路を一定速度  $v_0$  で走っている時車の方位角速度  $\omega$  は前に述べたように次式で示される。

$$\omega = \frac{v_0}{R}$$

この際角速度計の最小感度がこの値に達しなければ、この航法システムは円形道路として記録しないであろう。

実例として、写真に示した藤沢から平塚をへて小田原に行く海岸道路を取ってみよう。第4図に示したように、この道路は約 40 km 半径の円形道路と見なせ、その

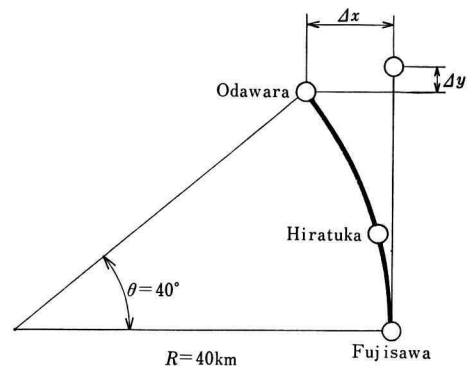


Fig 4. The skeleton map of Odawara

円周距離 28 km, 中心に含む角度は  $40^\circ$  である。今この道路を西湘有料道路の制限速度毎時 70 km で走るとすれば、車の方位角速度  $\omega$  は次のようになる。

$$\omega = 4.9 \times 10^{-4} \text{ rad./sec } (\approx 0.028^\circ/\text{sec})$$

更によく渋滞することを考えると、角速度計の最小感度及び分解能は相当小さくしなければならぬことが理解されよう。

この場合この微小角速度を検出できなければ直線道路としてプロットされる。かりに走行速度に誤差が無いとすれば小田原はこの円形道路の藤沢に於ける接線上にあることになって、図示した誤差が生ずる。計算すると次の値になる。

$$\Delta x = 40(1 - \cos 40^\circ) = 9.30 \text{ km}$$

$$\Delta y = 28 - 40 \sin 40^\circ = 2.29 \text{ km}$$

5 万分地図上では

$$\Delta x = 187 \text{ mm}, \quad \Delta y = 46 \text{ mm}$$

このように、道路から外れる誤差  $\Delta x$  が道路線上の誤差  $\Delta y$  より大きく、又好ましくないことは前に述べた通りである。

ゆるやかな円形道路でも追従可能であるためには方位角速度測定を厳密に行うより方法がない、これは極めて困難なことで、渋滞を考慮して平均速度を毎時 30 km とすれば、対応する方位角の角速度は更に小さく次のようになる。

$$\omega = 0.00021 \text{ rad./sec} (\approx 0.012 \text{ deg./sec})$$

このような値になると、自動車用角速度計として考えられる振動ジャイロ、或いはガス流式角速度計では不十分で、特別高感度な角速度計を用いねばならない。しかし、高感度角速度計は地球自転の影響を受けるので、この点について述べる。

#### b) 地球自転角速度の影響

上述したような航法システムでは、車の前進速度を、車の走行方向によって直角座標成分にわけて積分し、走行軌跡を求める。その際車の方向は車内に設備された回転角速度計により測定し検出された角速度を積分して求める。この場合速度計は対地速度を測定するのに対し、回転角速度計は慣性空間に於ける角速度であるから、正確に云うと車の回転角速度と地球自転角速度のベクトル和である。普通後者は小さいと考えられ、省略されるが、車の方位角速度が小さくなると地球自転角速度も無視できない。

この自転角速度  $\Omega$  を考慮に入れて、航法システムの原理式を書きかえると

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = v^2 \quad (3.1)$$

$$\frac{dy}{dx} = \tan \left( \int_0^t \omega dt + \int_0^{\Sigma t(v>0)} \Omega dt + \alpha_0 \right) \quad (3.2)$$

ただし自転角速度  $\Omega$  に関する積分  $\Sigma t(v>0)$  は車の走行中のみ積分することを示す。

自転角速度  $\Omega$  と車の方位角速度  $\omega$  の相対的大きさにより、影響は異なるので最も影響の大きい直線道路上を走るものとしよう。速度を一定値  $v_0$  とすれば、地図上に画かれる道程は (3.1) 式、(3.2) 式より、直線道路を  $x$  軸にとると、 $\alpha_0 = 0$  であるから次式が得られる。ただし  $\omega = 0$

$$\frac{dx}{dt} = v_0 \cos \Omega t, \quad \frac{dy}{dt} = v_0 \sin \Omega t$$

これを積分して

$$x = \frac{v_0}{\Omega} \sin \Omega t, \quad y = \frac{v_0}{\Omega} (1 - \cos \Omega t)$$

ただし出発点を原点として軸上を正方向に走るものとしてある。従って地図上の軌跡は次の円形になる。

$$x^2 + \left(y - \frac{v_0}{\Omega}\right)^2 = \left(\frac{v_0}{\Omega}\right)^2$$

ここに云う地球自転角速度  $\Omega$  はその鉛直成分であるから緯度に関係し、東京近辺では北緯 35 度とすると

$$\Omega = \frac{15^\circ}{3600} \sin 35^\circ = 0.0024 \text{ deg/sec} \\ (\approx 0.000042 \text{ rad/sec})$$

従って 1 時間以内ならば  $\Omega t$  は小さいから 第 5 図に示す誤差  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  は次の式になる

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= v_0 t - \frac{v_0}{\Omega} \sin \Omega t \approx 0 \\ \Delta y &= \frac{1}{2} \Omega v_0 t^2 = \frac{1}{2} \Omega L t \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$L$ : 走行距離

誤差  $\Delta y$  は一定速度で走行すれば走行時間の自乗に比例し、速度をかえて同じ長さの道路を走る場合は所要時間に比例する。従って徐行運転すると誤差は増大する。

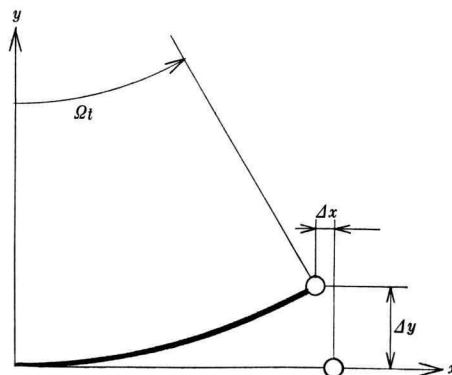


Fig 5. Deflection of the straight route by earth's rotation

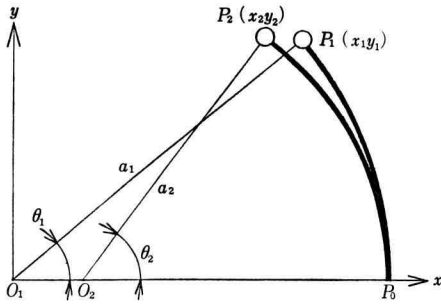


Fig 6. Deflection of the circle route

円形道路について第1節において、運動方程式 (1.1) 式, (1.2) 式の適用例として、その詳細を述べた。つまり (1.5) 式で示される円形道路で、前進速度  $v$  と車の方位角回転角速度  $\omega$  との間に、次の関係式があることを示した。

$$a\omega = v$$

$a$ : 円形道路半径

この場合、回転角速度  $\omega$  は対地角速度であることに注意しなくてはならない。

第6図についてみると、 $P_0P_1$  を円形道路にとり、 $P_0$  を出発点、 $P_1$  を帰着点とし、その中心  $O_1$  に含む角を  $\theta_1$ 、半径を  $a_1$  とすれば道路長は  $a_1\theta_1$  となる。この道路を速度  $v$  で車が走行し、その方位角速度  $\omega$  が対地角速度であれば、前述の通り当然式が成立する筈である。

$$a_1\omega = v$$

上式に於て速度  $v$  は必ずしも常数とは限らない。又円形道路は次式で示される。

$$x^2 + y^2 = a_1^2 = \left(\frac{v}{\omega}\right)^2$$

この場合、角速度計は慣性空間に於ける角度を検出するので、地球自転角速度  $\Omega$  の影響を受け、車上で観測される道程は  $P_0P_1$  ではなく、 $P_0P_2$  であり、これは (3.1) 式 (3.2) 式より次のように得られる。

$$x^2 + \left(y - \frac{\Omega}{\omega(\omega + \Omega)}v\right)^2 = \left(\frac{v}{\omega + \Omega}\right)^2 \quad (3.4)$$

第6図の  $P_0P_2$  曲線は、この円周上の円弧であって半径  $a_2$ 、及び中心座標は次式にて示される。

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\Omega}{\omega(\omega + \Omega)}, & y &= 0 \\ a_2 &= \frac{v}{\omega + \Omega} \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

車の方位角速度  $\omega$  が大きく、自転角速度  $\Omega$  が省略でき

れば問題はないが、両者が接近した値になると誤差が生ずる。例えば、先にあげた藤沢、小田原間海岸道路を、毎時 30 km の速度で走れば、方位角速度  $\omega$  は毎秒 0.012 度である。地球自転角速度の東京近辺の鉛直成分は毎秒 0.0024 度であるから、(3.4) 式より半径  $a_2$  は計算される。

$$a_2 = \frac{v}{\mu + \Omega} \doteq 33.3 \text{ km}$$

第6図をこの海岸道路とすれば、次のように実測値が得られる。

$$\widehat{P_0P_1} = \widehat{P_0P_2} = 28 \text{ km}, \quad \theta = 40^\circ$$

これより計算して、 $\theta_2$  は約 48 角度。 $P_1, P_2$  の座標は次の通り

$$\begin{aligned} P_1 &\begin{cases} x_1 = 30.6 \text{ km} \\ y_1 = 25.7 \text{ km} \end{cases}, \\ P_2 &\begin{cases} x_2 = 29.0 \text{ km} \\ y_2 = 24.7 \text{ km} \end{cases} \end{aligned}$$

従って誤差  $\Delta x, \Delta y$  は次のようになる。

$$\Delta x = x_1 - x_2 = 1.6 \text{ km}$$

$$\Delta y = y_1 - y_2 = 1 \text{ km}$$

5 万分地図上で、 $\Delta x = 32 \text{ mm}$   $\Delta y = 20 \text{ mm}$  従って無視できない誤差である。

又走行速度を毎時 70 km としても、車の方位角速度  $\omega$  は先に示したように、毎秒 0.028 度であり、この場合の誤差は法のように計算される。

$$\Delta x = 0.6 \text{ km}$$

$$\Delta y = 0.4 \text{ km}$$

5 万分地図上では、 $\Delta x = 12 \text{ mm}$   $\Delta y = 8 \text{ mm}$ 、

このように、地球自転による誤差は無視できない。特に車自体の方位角速度が小さければ影響は大きい。一般に、直線道路の方が円形道路より影響を受け易いことは先に述べた。又地球自転角速度の鉛直成分は北半球と南半球では符号を異にするので、誤差も違ってあらわれる。例えば直線道路であると、進行方向に対して、北半球では左側にそれるとすれば、南半球では右側にそれることになる。

この誤差は、既に述べたように、回転角速度計は本来の車の方位角速度と地球自転角速度とのベクトル和として、計測されることから発生する。かりに、この自転角速度が車の走行範囲の地域内で一定と見なせるならば、この値をバイアス値として、角速度計の測定値から差し引くことによって解決される筈である。

それ故、次に車の移動による影響について考察しよう。

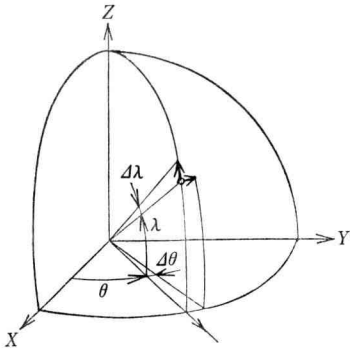


Fig 7. Small angle rotation geometry

## c) 車の移動による誤差

この場合車の移動する面は地球球面であることを考慮しなくてはならない。

第7図に於て、車は経度  $\theta$ 、緯度  $\lambda$  なる地点にあって、東に向って等緯度線上を走ると、子午線上を南北に走ることについて考察する。

先ず前者に於て、車は一定速度  $v_0$  で走るとすれば、次の関係式が成立する。

$$R \cos \lambda \cdot \frac{d\theta}{dt} = v_0$$

$R$ : 地球半径

この移動によって起きるこの地点の垂直線まわりの角速度  $\omega$  は次式で示される。

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \cdot \sin \lambda = \frac{v_0}{R} \cdot \tan \lambda \quad (3.6)$$

かりに、 $v_0$  を毎時 100 km の速度、地球半径  $R$  を 6400 km とすれば、緯度 45 度の地点に於ける  $\omega$  は次の値になる。

$$\omega = \frac{100}{3600 \times 6400} = 0.43 \times 10^{-5} \text{ rad/sec} \\ (\approx 2.5 \times 10^{-4} \text{ deg/sec})$$

同緯度の地球自転角速度の垂直成分は毎秒 0.0029 度であるから、車の移動による影響は、極めて高緯度の地点を除き、無視できる。

次に子午線上を南北に走ること、地球自転角速度垂直成分  $\dot{\alpha}$  は次式により示される。

$$\dot{\alpha} = \Omega \sin \left( \lambda_0 + \int_0^t \left( \frac{d\lambda}{dt} \right) dt \right) \quad (3.7)$$

$\Omega$ : 地球自転角速度 (毎時 15 度)

$\lambda_0$ : 出発地点の緯度

今、赤道上の一点 ( $\lambda_0 = 0$ ) より北に向って子午線上を走り出した車は、北半球であれば、この地球自転角速度

鉛直成分  $\dot{\alpha}$  の影響を受けて西側につれる。その量を  $\sigma$  とすれば、(3.1) 式、(3.2) 式より次の関係式を得る。

$$\frac{d\sigma}{dt} = v_0 \sin \left( \int_0^t \dot{\alpha} dt \right)$$

これを積分して

$$\sigma = v_0 \int_0^t \sin \left( \int_0^t \dot{\alpha} dt \right) dt \quad (3.8)$$

影響をしらべるために、実際の値を取ってみる。例えば、毎時 100 km で走ったとすれば

$$\frac{d\lambda}{dt} = 0.43 \times 10^{-5} \text{ rad/sec} = \varepsilon_0 \quad (3.9)$$

(地球半径は 6400 km としてある)

従って (3.7) 式は次のようになる。

$$\dot{\alpha} = \Omega \sin (\varepsilon_0 t)$$

この式を (3.8) 式に代入して

$$\sigma = v_0 \int_0^t \sin \left( \int_0^t \Omega \sin (\varepsilon_0 \tau) \cdot d\tau \right) \cdot dt \\ = v_0 \int_0^t \sin \left( \frac{\Omega}{\varepsilon_0} (1 - \cos \varepsilon_0 t) \right) \cdot dt \quad (3.10)$$

(3.9) 式より明らかなように、 $\varepsilon_0$  は極めて小さいので、時間  $t$  を長時間としない限り、(3.10) 式は次のように計算できる。

$$\sigma = v_0 \int_0^t \sin \left( \frac{1}{2} \Omega \varepsilon_0 t^2 \right) dt \\ \approx \frac{1}{6} v_0 \Omega \varepsilon_0 t^3$$

この式に次の値を用いて計算する。

$$v_0 = 100 \text{ km/hr}, \quad \Omega = 15 \text{ deg/hr.}$$

$$\varepsilon_0 = 0.43 \times 10^{-5} \text{ rad./sec}$$

$$t = 1 \text{ hrs.} = 3600 \text{ sec.}$$

この結果は次のようになる。

$$\sigma = 67 \text{ m}$$

5 万分地図上で 1 時間について 0.13 mm であり、無視できると思われる。

このように移動により起る緯度、経度の変化は地球自転角速度にも、車の走行課程にも影響しないと考えられる。従って自転角速度は一定に見なし、出発点に於けるその値を車の回転角速度計のバイアスとして、代数和をとるならば、地球、自転による誤差の問題は解決される。

## 4. ま と め

自動車用航法システムに於て、慣性航法の理論に従っ



て地図上に、車が走った道程を画かせようとすると、車の方位角速度を検出する角速度計に相当きびしい条件があることを述べた。地図上に走航道程は展開され、地図の縮尺度に応じて誤差は縮小されるから、目立たなくなる。特に道路に沿った長手方向では、予め定めた時間ごとに修正する方法を取れば、現在満足できる対地速度計、或は、走行距離計を入手できる。それは道路を走っている時、目じるしになる場所、例えば大きな道路の交差点、名所の建築物等を目じるしにしておけば、その時点で修正ができよう。

しかし道路に直角な方向に誤差が積算されると、道路巾を逸脱してしまう。これを防ぐには車の走行方向を正しく知らねばならぬことになり、この方法として、回転角速度計による航法システムが考案されている。我々はその角速度計が性能として持つべき最小感度を中心にして議論した。現在この種のセンサとしてヘリウムを用いたガスレートセンサ、或いは振動体を利用した振動ジャイロ等が取り扱い易く、比較的安価であることから、利用されているようである。これらセンサの最小感度は普通、毎秒0.05度程度であるから、この場合満足される結果をもたらすとは思えない。

走行方向を正しく知ることは角速度計によらなくとも、車内に不変の規準方向をつくっておけば可能である。磁気コンパスもその種の計器ではあるが、磁場の局地的異常性により影響を受けるので実用にはならない。自由ジャイロ<sup>1)</sup>によれば不可能ではないが、このジャイロは一般に角速度計に比較して機構は複雑になり、取り扱い難く、高価である。又そのスピン軸が地球自転の影響を受けることは、角速度計と同じようであり、これを避けるための機構を持たねばならず、ドリフトも大きくなり易いから、この種の航法システム用としては適さない。

元来、この自動車用航法システムは基本的な力学量、例えば車の対地速度と方位角回転速度のみを測定して、道程は計算により求める方式、つまりストラップダウン式<sup>2)</sup>であるから、センサ類の計測範囲は極めて広範囲、かつ直線性を必要とする。この場合、角速度計では最小感度も満たし、更に広範囲の測定を一樣にすることはできない。この点自由ジャイロは地球上の一点、例えば北極点に向って静止しており、これを規準とし車の方位角

を知るので、この問題はなくなる。

一般に慣性航法システム原理を用いて自動車用航法システムをつくらうとすれば、それに用いられる計測器。或いはセンサ類は自動車用であるからと云って性能を航空機用のもの以下にすることはできない。物によっては航空機用以上の性能を要求されるであろう。

このように考えると、自動車用慣性航法装置、それが虚偽おとしでなく、正しい意味で云うならば、原理的にはとに角、経済的には不可能である。

しかし、自動車は航空機と異なり、自由な空間を走るものではない。限られた道路上に存在しなくてはならない。この点に着目すれば、或いは適切な航法システムが可能であるかも知れない。その場合でも慣性航法の概念から離脱した考え方でなくてはなるまい。

人が地図を頼りに、これを判読しながら運転するように、車もそのようにして、地図のたすけをかりて、道程を求め、記録することになりはしないか。

現在、アメリカに於て航行衛星を利用して地球上の位置を求める技術が開発され完成しようとしている。云々ゆる GPS<sup>3)4)</sup> (Global Positioning System) で、フェーズ3の段階と入ろうとしており、文献によれば、安価で、精度も50米以内、そのための受信装置もポータブルである。これは内蔵式航法装置ではないが、航行衛星からの信号を基礎にしているので、地域的制約は殆んどない。

もし、自動車用慣性航法的システム、それは飽くまで地図に頼らず、測定によって自分の位置を知る航法システムと云う意味で、このような航法システムが近い将来可能であるとしたならば、このGPSによるものではなかろうか。

#### 参 考 文 献

- 1) P.Y. Willems. "Gyrodynamics", Springer, 1974
- 2) I.Y. Bar-Itzhack: "Navigation Computation in Terrestrial strapdown Inertial Navigation Systems", IEEE Trans. Aerospace & Ele. Vol. AES-13, No. 6 Nov. 1977
- 3) B.G. Glazer: "GPS Receiver Operation", Navigation, vol. 25, No. 2, Summer 1978
- 4) W.J. Senus, R.W. Hill: "Application to Mapping, Charting and Geodesy", Navigation, Vol. 28, No. 2, Summer 1981