

UDC 629.7.05.017.1:
629.7.072

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-296

ストラップダウン慣性航法用冗長センサ系の構成に関する考察

新宮博公・大月正男

1976年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

	ページ
1. まえがき	1
2. 記 号	2
3. 冗長センサ系のモデル化	2
4. 信頼性解析	5
5. 変換行列	6
6. 誤差解析と最適センサ配置の決定	8
7. 結 論	11
付録 1. E_R が一定値をとる場合についての解析	11
付録 2. 冗長系のセンサ故障検出の基本式	12
参考文献	13

ストラップダウン慣性航法用冗長センサ系の構成に関する考察*

新宮博公**・大月正男**

Study of Configuration of Strapdown Inertial Navigation Redundant Sensor System

By Hirokimi SHINGU and Masao OTSUKI

ABSTRACT

This report describes an efficient method for increasing the reliability of a strapdown inertial navigator, i.e., if redundant sensor arrays and additional sensors are employed, and if properly oriented, they serve to increase the accuracy of the system.

The reliability and accuracy of various redundant systems using four-, five- and six-sensor arrays are analysed. It was found that models of non-orthogonal orientation have higher reliability than those of orthogonal orientation using the same number of sensors. Therefore the former models were used as models of redundant sensor arrays, and accuracy analyses were made only on those. In these analyses, the minimizing function of the influence of sensor errors on the system was used as a criterion, and optimum solutions were obtained in each system. The solutions, which are a standard of the optimum sensor array, did not vary after one or more sensors had failed and had been removed from operation.

The improvement of accuracy was 13.4%, 22.5% and 29.3% for four-, five- and six-sensor systems in comparison with conventional three-sensor array when all sensors were normally operating in each system.

1. まえがき

通常ストラップダウン慣性航法系SINS(Strap-down Inertial Navigation System)におけるIMU(Inertial Measurement Unit)は、3個のジャイロと3個の加速度計とを飛翔体の直交3軸(ロール、ピッチ、ヨー)にそれぞれ各1個ずつ取付け、角速度および加速度を検出するように体系化されている。このIMUでは1個のセンサが故障しても一般には航法系として使用不可能になる。SINSの信頼性を向上させる方法として同類のセンサ(例えば、ジャイロ)を4個以上用いて冗長系(Redundant Sensor System)を構成することが

考えられる。¹⁾冗長センサ系の構成を大別すると、直交取付と非直交取付とにわけられる。後者においてはセンサ出力を直交軸に変換するための座標変換行列を算出する必要があり、その算出の際にセンサの使用個数、配置角およびセンサ誤差の直交3軸への影響を考慮しなければならない。^{2),3)}

そこで筆者らは、SINSのなかの姿勢検出系(加速度検出系についても同様)に着目し、センサ(ジャイロ)の使用個数を通常の2倍(6個)までとり、この範囲内(4, 5, 6個)のセンサを用いた3種の冗長系のモデル化を行ない、これらのモデルの信頼度を算出するとともに、センサ誤差の直交3軸への影響度を最小にする最適センサ配置のモデル化を試みた。この最適モデルに関してはPejsa²⁾らによって理論的な解析がなされているが、

* 昭和51年3月4日 受付

** 計測部

本研究ではセンサ無故障時におけるそのモデルの最適性がある一変数(配置角 α)についてのシミュレーションによって確認するとともに、故障時についても同様なシミュレーションおよび理論的な考察を行ない、最適な α を求めた。そして、 α を独立変数とした場合、故障時の最適モデルが無故障時の最適モデルと同一であることを見出し、最適な冗長系の構成の可能性を明らかにすることができた。

2. 記号

x_1, x_2, x_3 ; 飛翔体の直交3軸

$i_{x_1}, i_{x_2}, i_{x_3}$; x_1, x_2, x_3 軸方向の単位ベクトル

i_a, i_b, \dots, i_f ; センサ a, b, \dots, f の入力軸方向の単位ベクトル

MS ; Mission Success の略

H ; 直交3軸をセンサ軸に変換する行列

H_{ij} ($j=1, 2, 3, i=1, 2, \dots, 6$); H の要素

M ; センサ軸を直交3軸に変換する行列

M_{ij} ($j=1, 2, \dots, 6, i=1, 2, 3$); M の要素

e_j ($j=1, 2, \dots, 6$); センサ a, b, \dots, f の誤差

R ; センサ単体の信頼度

t_0 ; センサの耐用寿命

α ; 冗長系におけるセンサの配置角

β ; 定数(=72度)

λ ; センサの故障率

3. 冗長センサ系のモデル化

冗長系を構成する際に必要となるモデルは数多く考えられるが^{2),3)}ここではセンサの直交取付と非直交取付とに大別して系の構成方法を述べる。ハードウェア構成の観点からセンサの取付軸(入力軸)と直交3軸とのベクトル関係を説明しながら系のモデル化を行なう。

飛翔体の直交3軸(x_1, x_2, x_3)方向の単位ベクトルとして $i_{x_1}, i_{x_2}, i_{x_3}$ を、センサ記号として a, b, c, d, e, f を、センサ取付軸方向の単位ベクトルとして i_a, i_b, \dots, i_f をそれぞれ用いる。

3.1 三センサ系(3S系)

これは通常のIMUで、直交3軸(x_1, x_2, x_3)の各々に1個ずつセンサを取付ける方法である(図1)。

3.2 四センサ系

3.2.1 直交四センサ系

直交3軸のいずれかの1軸に2個のセンサを重複して取付け、他の2軸の各々に1個ずつセンサを取付ける方法である(図2)。重複取付のセンサは1個故障しても他の1個で代用できる。

3.2.2 非直交四センサ系No1(4S系No1)

3個のセンサ a, b, c を直交3軸に取付け、他の1個のセンサ d を次の2式

$$i_{x_3} \cdot i_d = \cos \alpha \quad (1)$$

$$i_{x_1} \cdot i_d = i_{x_2} \cdot i_d = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha \quad (2)$$

によって決まる i_d 方向に取付ける方法である(図3参照)。ここで α はセンサの配置角であり、以下に述べる各モデル系でも同様の意味で用いる。 α の値は第5, 6章での解析によって決定する。この系では、どのセンサが故障しても他の3個のセンサ出力を直交3軸に変換して用いることが出来るのでセンサ故障は1個だけならばどれでも許容される。

3.2.3 非直交四センサ系No2(4S系No2)

4個の各センサを次式で示される方向に取付ける方法である(図4参照)。

$$i_a \cdot i_{x_3} = i_b \cdot i_{x_3} = i_c \cdot i_{x_3} = \cos \alpha \quad (3)$$

$$i_d = -i_{x_3} \quad (4)$$

$$i_a \cdot i_{x_1} = -\sin \alpha \quad (5)$$

$$i_b \cdot i_{x_1} = i_c \cdot i_{x_1} = \frac{1}{2} \sin \alpha \quad (6)$$

$$i_b \cdot i_{x_2} = -i_c \cdot i_{x_2} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha \quad (7)$$

この系も4S系No1と同様に、センサ故障は任意の1個まで許される。

3.2.4 非直交四センサ系No3(4S系No3)

図5に示すごとく、各センサ軸は2個ずつ i_{x_3} に関して対称であり、かつセンサ軸相互の関係は

$$i_a \cdot i_b = i_b \cdot i_c = i_c \cdot i_d = i_d \cdot i_a \quad (8)$$

のようになっている。この系でセンサ軸と直交3軸との関係式は

$$i_a \cdot i_{x_3} = i_b \cdot i_{x_3} = i_c \cdot i_{x_3} = i_d \cdot i_{x_3} = \cos \alpha \quad (9)$$

$$i_a \cdot i_{x_1} = i_a \cdot i_{x_2} = i_b \cdot i_{x_2} = i_d \cdot i_{x_1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha \quad (10)$$

$$i_b \cdot i_{x_1} = i_c \cdot i_{x_1} = i_c \cdot i_{x_2} = i_d \cdot i_{x_2} = -\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha \quad (11)$$

となる。

3.3 五センサ系

3.3.1 直交五センサ系

直交3軸(x_1, x_2, x_3)のいずれかの2軸にセンサを2個ずつ重複して取付ける方法である。その2軸のセンサ故障は1個まで許されるが、他の1軸のセンサが故障すれば使用不能になる。

3.3.2 非直交五センサ系(5S系)

直交3軸のうちいずれかの1軸(例えば x_3 軸)まわ

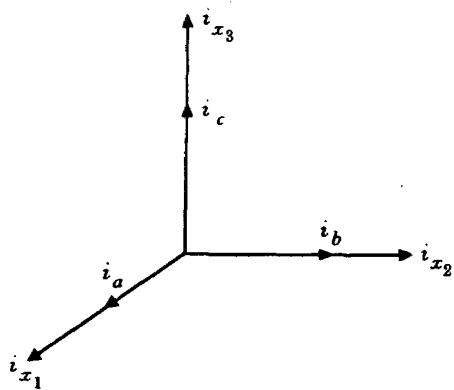


図1 直交三センサ系

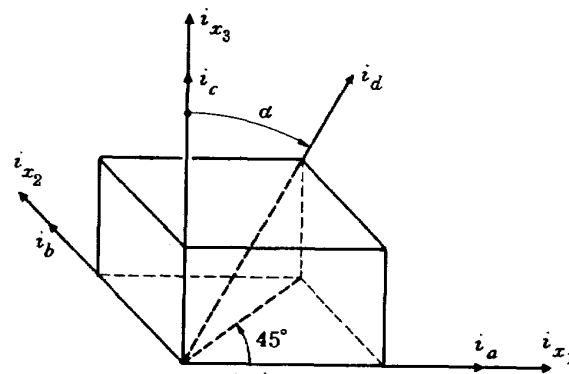


図3 非直交四センサ系(4S系) No.1

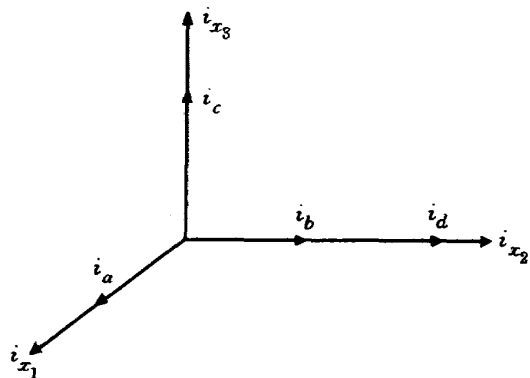


図2 直交四センサ系

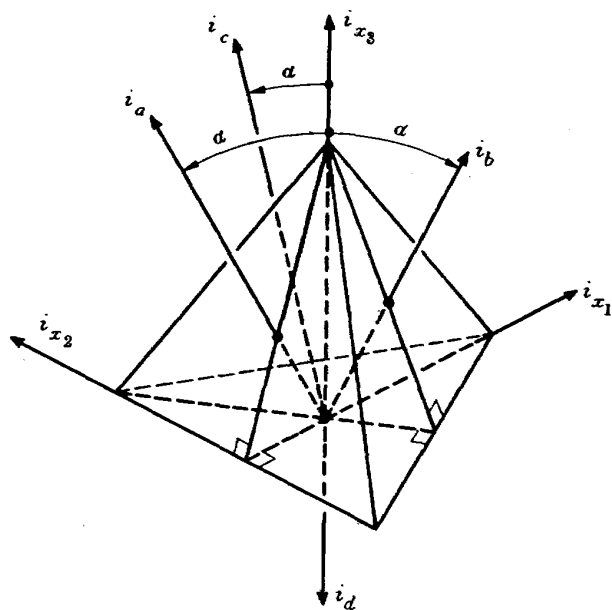


図4 非直交四センサ系(4S系) No.2

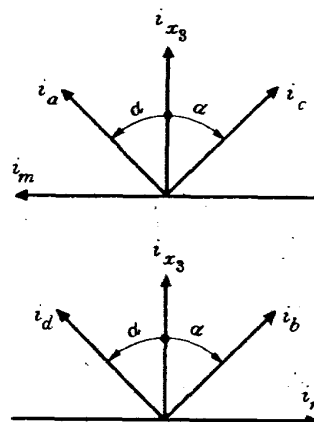
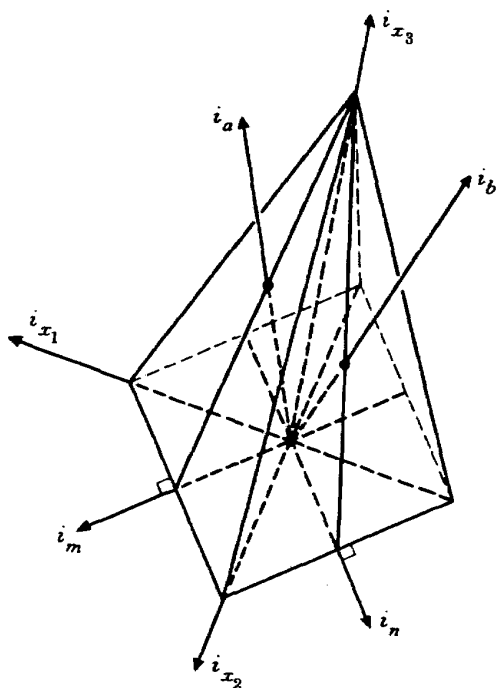


図5 非直交四センサ系(4S系) No.3

りの円錐の母線に沿って5個のセンサを取付ける方法である(図7)。センサ軸相互の関係は

$$i_a \cdot i_b = i_b \cdot i_c = i_c \cdot i_d = i_d \cdot i_e = i_e \cdot i_a \quad (12)$$

によって表わされる。センサ軸と直交軸との関係は次式のようになる。

$$i_a \cdot i_{x_3} = i_b \cdot i_{x_3} = i_c \cdot i_{x_3} = i_d \cdot i_{x_3} = i_e \cdot i_{x_3} = \cos \alpha \quad (13)$$

$$i_a \cdot i_{x_1} = \sin \alpha \quad (14)$$

$$i_b \cdot i_{x_1} = i_e \cdot i_{x_1} = \sin \alpha \cos \beta \quad (15)$$

$$i_b \cdot i_{x_2} = -i_e \cdot i_{x_2} = \sin \alpha \sin \beta \quad (16)$$

$$i_c \cdot i_{x_1} = i_d \cdot i_{x_1} = -\sin \alpha \cos \frac{\beta}{2} \quad (17)$$

$$i_c \cdot i_{x_2} = -i_d \cdot i_{x_2} = \sin \alpha \sin \frac{\beta}{2} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{5} \text{ (rad)} = 72 \text{ deg} \quad (19)$$

3.4 六センサ系

3.4.1 直交六センサ系No1

直交3軸 (x_1, x_2, x_3) の各々にセンサを2個ずつ取付ける方法である(図8)。センサ故障は各軸で1個ずつ許される。

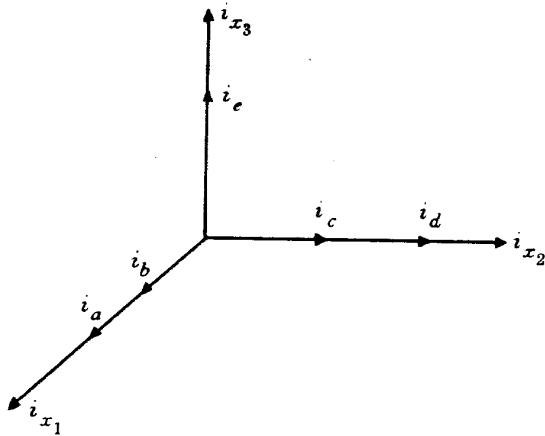


図6 直交五センサ系

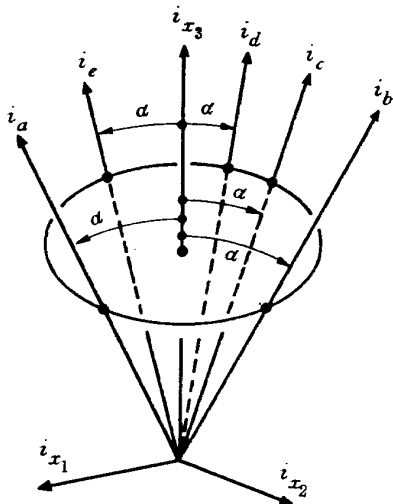


図7 非直交五センサ系(5S系)

つ許される。

3.4.2 直交六センサ系No2

三センサ系を2個用いる方法(通常のIMUを二つ用いる方法)である(図9)。これはIMUとして冗長度を有しているため、センサ故障が一方のIMUのみで起る場合には問題はないが、両IMUで起る場合は系として使えない。例えば、一方のIMUで3個のセンサ全部が故障することは許容されるが、2個あるいはそれ以上のセンサが両IMUにかけて故障する場合は系として使えないものになる。

3.4.3 非直交六センサ系(6S系)

直交3軸で三つの平面が作成できるが、その面の各々にセンサを2個ずつ図10のようにして取付ける方法である。平面 x_1Ox_3 , 平面 x_1Ox_2 , 平面 x_2Ox_3 の各々において、2個のセンサ軸が $i_{x_3}, i_{x_1}, i_{x_2}$ となす角(配置角)を α とする。この α は各取付面において同じ値を用いることにする。この系では任意の3個のセンサ故障まで許される。センサ軸と直交3軸との関係は図10より明らかに

$$i_a \cdot i_{x_3} = i_b \cdot i_{x_3} = i_c \cdot i_{x_1} = i_d \cdot i_{x_1} = i_e \cdot i_{x_2} = i_f \cdot i_{x_2} = \cos \alpha \quad (20)$$

$$i_a \cdot i_{x_1} = i_c \cdot i_{x_2} = i_e \cdot i_{x_3} = \sin \alpha \quad (21)$$

$$i_b \cdot i_{x_1} = i_d \cdot i_{x_2} = i_f \cdot i_{x_3} = -\sin \alpha \quad (22)$$

となる。

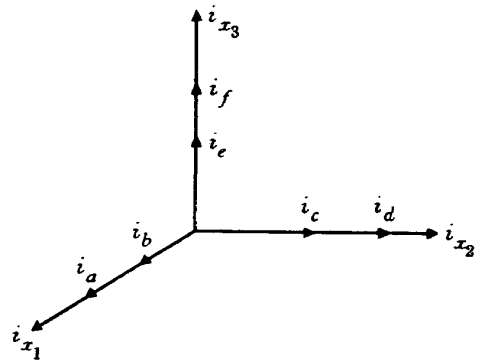


図8 直交六センサ系No1

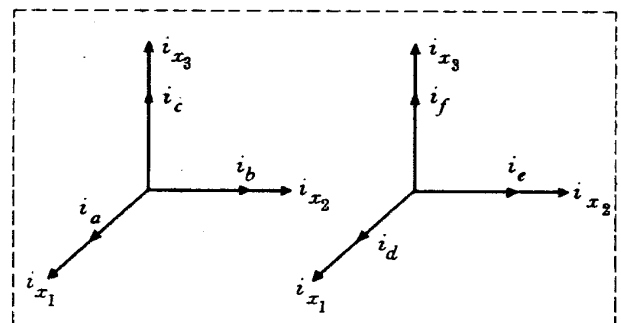


図9 直交六センサ系No2

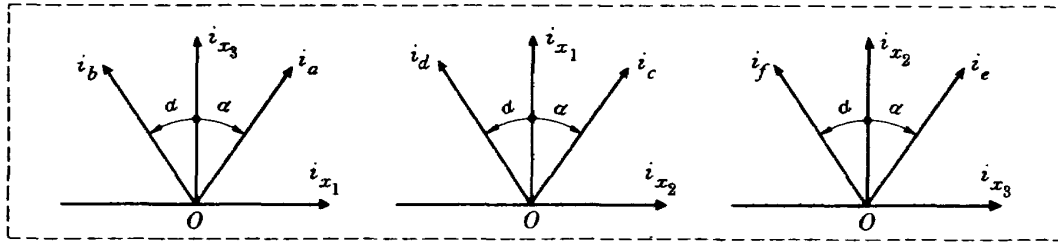


図10 非直交六センサ系(6S系)

4. 信頼性解析

センサ単体の信頼度 R を使って、前章で述べた各センサ系の信頼度を計算する。センサ使用個数が同じならば信頼度の大きいモデルを選択モデルとして採用し、以後の解析対象とする。

4.1 センサ単体の信頼度

飛翔体搭載センサに限らず、一般に部品の信頼性は初期故障期、偶発故障期、摩耗故障期の3期間に分けて考えられているが、部品は通常偶発故障期で用いるので故障率 λ は一定とする⁴⁾。ジャイロ等の慣性センサは、飛翔中に一度故障を起せば修理が事実上不可能となるので、それらを用いた系は非修理系となる。したがって平均無故障時間(耐用寿命) t_0 は、 $MTTF$ (Mean Time to Failure) を用いる。この場合、故障率 λ は

$$\lambda = 1/MTTF = 1/t_0 \quad (23)$$

で表わされ、 R は

$$R = e^{-\lambda t} = e^{-\frac{t}{t_0}} \leq 1 \quad (24)$$

となる⁴⁾。各冗長系で用いるセンサは同一の信頼度 R を有するものとする。

4.2 系の信頼度計算法⁴⁾

センサを n 個用いた系の信頼度 P は図11に示す直列配置と並列配置とによって異なる。直列配置では1個のセンサが故障しても系は使用不能になるので P は

$$P = P_s = R^n \quad (25)$$

となる。一方並列配置では n 個全部が故障したときのみ系は使用不能になるので P は

$$P = P_p = 1 - (1 - R)^n \quad (26)$$

となる。

また、 n 個のセンサのうち任意の m 個 ($n > m$) の故障が許されるときの P は

$$P = P_a = R^n + \binom{n}{n-1} R^{n-1} (1-R) + \dots + \binom{n}{n-m} R^{n-m} (1-R)^m \quad (27)$$

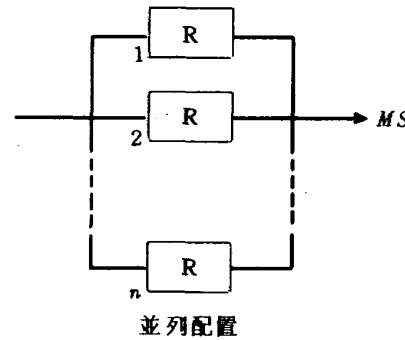
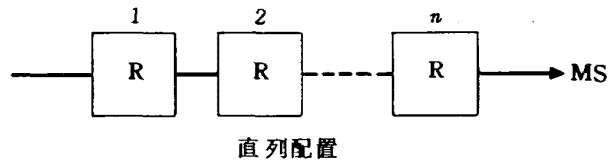


図11 系の信頼性配置

となる。

4.3 冗長センサ系の信頼度計算式

冗長センサ系の各々に前節の信頼度計算法を適用して、その系の信頼度計算式を導く。各直交センサ系では、直交軸に重複取付されたセンサは並列配置になり、その箇所に限ってセンサ故障が許されるので、各直交センサ系の信頼性モデルを一括して示せば、図12のようになる。非直交センサ系では故障が許容されるセンサの種類は任意である。4 S系 No 1, 2, 3 では任意の1個、5 S系では任意の2個、6 S系では任意の3個のセンサの故障が許容される。以上のことを考慮して図12と式(25), (26)を使って直交四, 五, 六センサ系の信頼度を求め、かつ非直交系の信頼度を式(27)より求めれば表1のようになる。この表より明らかに、各センサ系で非直交系の方が直交系より信頼度が高い。よって冗長系の選択モデルとして非直交系をとり入れることにする。以後冗長系といえば4 S系 No 1, 2, 3, 5 S系, 6 S系のみを意味する。これらの冗長系および直交三センサ系(3 S系)の信頼度の使用時間 t を考慮した時間的変化を図13に示す。

表1 各冗長系モデルの信頼度比較

系	モデル	信頼度計算式	比較	選択モデル
四センサ系	直交系 4S系 No 1, 2, 3	$P_1 = R^3(2-R)$ $P_2 = R^3(4-3R)$	$P_2 \geq P_1$	4S系 No 1, 2, 3
五センサ系	直交系 5S系	$P_3 = R^3(2-R)^2$ $P_4 = R^3(10-15R+6R^2)$	$P_4 \geq P_3$	5S系
六センサ系	直交系 No 1 直交系 No 2 6S系	$P_5 = R^3(2-R)^3$ $P_6 = R^3(2-R^3)$ $P_7 = R^3(20-45R+36R^2-10R^3)$	$P_7 \geq P_5$ $P_7 \geq P_6$	6S系

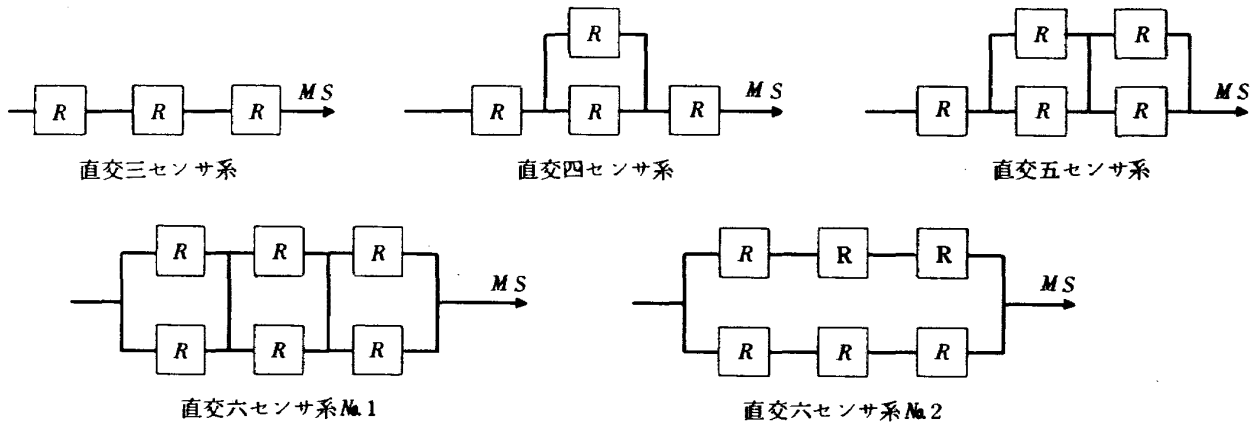


図12 各直交冗長センサ系の信頼性モデル

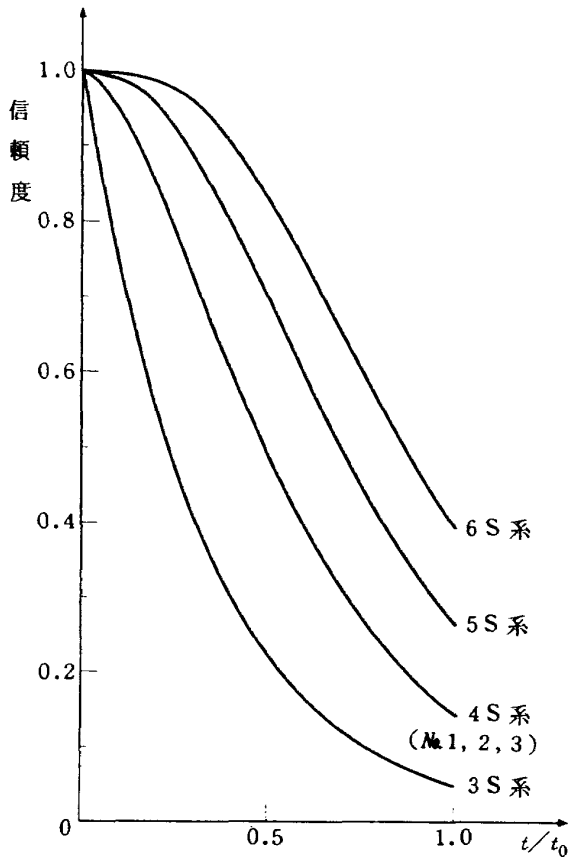


図13 各センサ系の信頼度

5. 変換行列

冗長系の各選択モデルのセンサ軸は非直交系を形成しているが、それらの軸での測定値を航法等に用いる場合は直交軸成分に変換しなければならない。この変換行列 M を求めるには

$$(i_a \ i_b \ i_c \ \dots)^T = H(i_{x_1} \ i_{x_2} \ i_{x_3})^T \quad (28)$$

によって H を求め、この式を変換して

$$(i_{x_1} \ i_{x_2} \ i_{x_3})^T = (H^T H)^{-1} H^T (i_a \ i_b \ i_c \ \dots)^T = M (i_a \ i_b \ i_c \ \dots)^T \quad (29)$$

$$M = (H^T H)^{-1} H^T \quad (30)$$

を得ればよい。 H の各要素 H_{ij} ($i=1, 2, 3, \dots, j=1, 2, 3$) は、各冗長系モデルにおけるセンサ軸と直交軸との関係式(式(1)~式(22))より求めれば表2のようになる。

各冗長系でセンサ無故障時には(30)式に H の各要素を代入して M を求めればよいが、故障時には関連する行を除いて用いる。例えば、4S系でセンサ a が故障したときには H の第1行を除いて

$$H_a = \begin{bmatrix} H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} \end{bmatrix} \quad (31)$$

となり、(30)式の H の代りに H_a を用いて

$$M_a = (H_a^T H_a)^{-1} H_a^T \quad (32)$$

を作り、この M_a をセンサ a の故障時の変換行列とすればよい。センサ b, c, d のいずれかの故障時にも H の第2, 3, 4行のいずれかを除いた行列 H_b, H_c, H_d を使って M_a と同様に M_b, M_c, M_d を求めればよい。5S系ではセンサ故障が2個まで許されるので、1個故障時には $H_i (i=a, b, \dots, e)$ 、2個故障時には $H_{ij} (i, j=a, b, \dots, e, i \neq j)$ を(32)式に代入して M_i, M_{ij} を作ればよい。したがってセンサ a, b, c, d, e のいずれかが故障したときには H の第1, 2, 3, 4, 5行のいずれかを除いた行列 H_a, H_b, H_c, H_d, H_e を用いる。2個故障時、例えばセンサ a, c が同時に故障しているときには関連する行(第1, 3行)を除いた H_{ac} を用いる。 H_{ac} は

$$H_{ac} = \begin{bmatrix} H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} \end{bmatrix} \quad (33)$$

となる。他の2個故障時の $H_{ab}, H_{ad}, H_{ae}, H_{bc}, H_{bd}, H_{be}, H_{cd}, H_{ce}, H_{de}$ も(33)式と同様にして求められる。

6S系ではセンサ故障が3個まで許されるので、1個故障時には $H_i (i=a, b, \dots, f)$ 、2個故障時には $H_{ij} (i, j=a, b, \dots, f, i \neq j)$ 、3個故障時には $H_{ijk} (i, j, k=a, b, \dots, f, i \neq j, j \neq k, k \neq i)$ を(32)式に代入して M_i, M_{ij}, M_{ijk} を作ればよい。例としてセンサ a が故障(1個故障)したときは

$$H_a = \begin{bmatrix} H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} \end{bmatrix} \quad (34)$$

となり、センサ a, b が同時故障(2個故障)したときには

表2 各冗長系の H の要素

要素	4S系 No 1	4S系 No 2	4S系 No 3	5S系	6S系
H_{11}	1	$-\sin \alpha$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$\sin \alpha$	$\sin \alpha$
H_{12}	0	0	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	0	0
H_{13}	0	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$
H_{21}	0	$\frac{1}{2} \sin \alpha$	$-\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$\sin \alpha \cos \beta$	$-\sin \alpha$
H_{22}	1	$-\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha$	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$\sin \alpha \sin \beta$	0
H_{23}	0	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$
H_{31}	0	$\frac{1}{2} \sin \alpha$	$-\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$-\sin \alpha \cos \frac{\beta}{2}$	$\cos \alpha$
H_{32}	0	$\frac{\sqrt{3}}{2} \sin \alpha$	$-\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$\sin \alpha \sin \frac{\beta}{2}$	$\sin \alpha$
H_{33}	1	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	0
H_{41}	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	0	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$-\sin \alpha \cos \frac{\beta}{2}$	$\cos \alpha$
H_{42}	$\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	0	$-\frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha$	$-\sin \alpha \sin \frac{\beta}{2}$	$-\sin \alpha$
H_{43}	$\cos \alpha$	-1	$\cos \alpha$	$\cos \alpha$	0
H_{51}				$\sin \alpha \cos \beta$	0
H_{52}				$-\sin \alpha \sin \beta$	$\cos \alpha$
H_{53}				$\cos \alpha$	$\sin \alpha$
H_{61}				(註) $\beta = 72$ 度	0
H_{62}					$\cos \alpha$
H_{63}					$-\sin \alpha$

$$H_{ab} = \begin{bmatrix} H_{31} & H_{32} & H_{33} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} \end{bmatrix} \quad (35)$$

となる。またセンサ a, b, c が同時故障 (3個故障) したときには

$$H_{abc} = \begin{bmatrix} H_{41} & H_{42} & H_{43} \\ H_{51} & H_{52} & H_{53} \\ H_{61} & H_{62} & H_{63} \end{bmatrix} \quad (36)$$

となる。

故障事象の組合せ数を以上の叙述から求める。4S系では1個故障の組数が4個あるのみだが、5S系では1個故障の組数5、2個故障の組数10となる。さらに6S系では1個故障の組数6、2個故障の組数15、3個故障の組数20となっている。これらの数値はセンサ総数を n 、故障センサ数を m とすれば

$$\text{組数} = \binom{n}{m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (37)$$

によって求められる。

6. 誤差解析と最適センサ配置の決定

冗長系の各選択モデルにおいて配置角 α の値は未定となっているが、この章では各センサ誤差 e_j ($j=1, 2, \dots, 6$) の系への影響度を最小にする α を決定する。

センサ出力は信号成分と誤差成分に分けられ、出力そのものは前章の変換行列 M, M_a, \dots 等によって直交軸に変換されるが、これは信号成分に対して成立する変換である。もちろん、実際のセンサ出力は信号成分と誤差成分とを分離できないので、誤差を含む出力にそれらの変換を施さなければならない。ここで誤差成分とは、補正可能な誤差の補正後の残存成分 (すなわち、補正不可能な成分) のことをいう。この成分は一般に不規則に発生し、かつ各センサ毎に独立である。したがってセンサ誤差 e_j のみを直交軸に変換するにはそれらの統計的独立性を考えて e_j に M の要素 M_{ij} ($i=1, 2, 3, j=1, 2, \dots, 6$) を乗じた各項のRSS (Root Sum Square) を用いる必要がある⁵⁾。すなわち、 $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ を求めるには

$$E_{x_1} = \left(\sum_{j=1}^l M_{1j}^2 e_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

$$E_{x_2} = \left(\sum_{j=1}^l M_{2j}^2 e_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

$$E_{x_3} = \left(\sum_{j=1}^l M_{3j}^2 e_j^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (40)$$

のようにすればよい。ここで l は4S、5S、6Sの各系でそれぞれ4、5、6となる。これらは無故障時の誤差

変換を表わしているが、故障時における $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ についても全く同様に前章の M_i, M_{ij}, M_{ijk} の各要素に e_j を乗じたもののRSSを使えばよい。4S系における行列 M_a の各要素を $M_a(i, j)$ ($i, j=1, 2, 3$) とすれば

$$\begin{aligned} (i_{x_1} \ i_{x_2} \ i_{x_3})^T &= M_a (i_b \ i_c \ i_d)^T \\ &= \begin{bmatrix} M_a(1,1) & M_a(1,2) & M_a(1,3) \\ M_a(2,1) & M_a(2,2) & M_a(2,3) \\ M_a(3,1) & M_a(3,2) & M_a(3,3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ i_c \\ i_d \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (41)$$

となる。この時点の $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ を $E_{x_1}(a), E_{x_2}(a), E_{x_3}(a)$ とすれば、それらの式は

$$E_{x_1}(a) = \left\{ \sum_{j=1}^3 M_a(1, j)^2 e_{j+1}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (42)$$

$$E_{x_2}(a) = \left\{ \sum_{j=1}^3 M_a(2, j)^2 e_{j+1}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (43)$$

$$E_{x_3}(a) = \left\{ \sum_{j=1}^3 M_a(3, j)^2 e_{j+1}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

となる。他のセンサ故障時 (b, c, d センサの故障時) においても同様にして $E_{x_1}(b), E_{x_1}(c), E_{x_1}(d), E_{x_2}(b), E_{x_2}(c), \dots$ を求めればよい。5S系においては1個故障時の $E_{x_1}(a), E_{x_1}(b), \dots$ と2個故障時の $E_{x_1}(a, b), E_{x_1}(a, c), \dots$ が存在する。さらに6S系では1個故障時の $E_{x_1}(a), \dots$ 、2個故障時の $E_{x_1}(a, b), \dots$ 、3個故障時の $E_{x_1}(a, b, c), \dots$ が存在する。

誤差の評価量としては、直交3軸上に現われる誤差のRSSを無故障時、故障時別に求めて用いればよい。無故障時のRSS誤差 E_T は

$$E_T = (E_{x_1}^2 + E_{x_2}^2 + E_{x_3}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (45)$$

となり、センサ a の故障時のRSS誤差 $E_T(a)$ は

$$E_T(a) = \{ E_{x_1}(a)^2 + E_{x_2}(a)^2 + E_{x_3}(a)^2 \}^{\frac{1}{2}} \quad (46)$$

となる。他の1個のセンサの故障時、2個故障時、3個故障時の $E_T(b), \dots, E_T(a, b), \dots, E_T(a, b, c), \dots$ も同様にして求められる。このようにして求めたRSS誤差の値は一般に故障センサの種類によって異なる。すなわち、同じ1個故障といっても $E_T(a)$ と $E_T(b)$ とは同一の α の値に対して異なる値をとることがシミュレーションによって明らかになった。これは2個故障時、3個故障時のシミュレーション結果についても同じであった。そこで、各系で1、2、3個故障時別に $E_T(a), E_T(b), \dots, E_T(a, b), \dots, E_T(a, b, c)$ のRMS (Root Mean Square) E_R を求め、この E_R を評価関数とし、これを最小にする α を決定する。無故障時の状態は各系でただ一つしかないから、その時点の E_R は E_T に一致する。

4 S系 (No 1, 2, 3) の無故障時, 1個故障時の評価関数 E_R をそれぞれ $E_R(4, 0)$, $E_R(4, 1)$ とすれば

$$E_R(4, 0) = E_T \text{ (無故障時, 4 S系)} \quad (47)$$

$$E_R(4, 1) = \left\{ \frac{E_T(a)^2 + E_T(b)^2 + E_T(c)^2 + E_T(d)^2}{4} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

となる。5 S系の場合も同様に故障事象の組数を考慮して (前章参照) 無故障時, 1個故障時, 2個故障時の評価関数 $E_R(5, 0)$, $E_R(5, 1)$, $E_R(5, 2)$ を求めれば

$$E_R(5, 0) = E_T \text{ (無故障時, 5 S系)} \quad (49)$$

$$E_R(5, 1) = \left\{ \frac{E_T(a)^2 + E_T(b)^2 + \dots + E_T(e)^2}{5} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (50)$$

$$E_R(5, 2) = \left\{ \frac{E_T(a,b)^2 + E_T(a,c)^2 + \dots + E_T(d,e)^2}{10} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (51)$$

となる。6 S系の場合も故障事象の組数を考慮して, 無故障時, 1, 2, 3個故障時の評価関数を求めれば

$$E_R(6, 0) = E_T \text{ (無故障時, 6 S系)} \quad (52)$$

$$E_R(6, 1) = \left\{ \frac{E_T(a)^2 + E_T(b)^2 + \dots + E_T(f)^2}{6} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (53)$$

$$E_R(6, 2) = \left\{ \frac{E_T(a,b)^2 + E_T(a,c)^2 + \dots + E_T(e,f)^2}{15} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

$$E_R(6, 3) = \left\{ \frac{E_T(a,b,c)^2 + \dots + E_T(d,e,f)^2}{20} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (55)$$

となる。

上記の各 E_R の値を計算する際に必要となるセンサ誤差 e_j の値は, ジャイロバイアス誤差の補正後の成分として

$$e_j (j=1, 2, \dots, 6) = \pm 1 \text{ deg/hr} \quad (56)$$

とする。ここで正負の記号を用いたのは, センサ誤差の尺度⁶⁾として絶対値が 1 deg/hr (例えば標準偏差) であり, この値は正負に発生することを意味する。 e_j は 2 乗して E_R の式の中で用いられているので正負の選別上の問題はない。

評価の尺度としては 3 S系 (Conventional IMU) の E_R を用いる。この系の E_R を E_S とすれば, E_S は

$$E_S = (E_{x_1}^2 + E_{x_2}^2 + E_{x_3}^2)^{\frac{1}{2}} = (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{3} \quad (57)$$

となる。この E_S を尺度として各冗長系の E_R がどの程度の誤差レベルになっているかについての比較の一例を以下に示す。

各冗長系の E_R 曲線のシミュレーション結果を図14~図

18に示す。これらの図より, 各系で α を適当に選べば E_R の値が E_S より小さくなる箇所が現われた。これはセンサ個数が増えればセンサ誤差の直交 3 軸への影響度が小さくなることを意味する。またセンサ使用個数が3個になるとき (4 S, 5 S, 6 S の各系で故障個数が 1, 2,

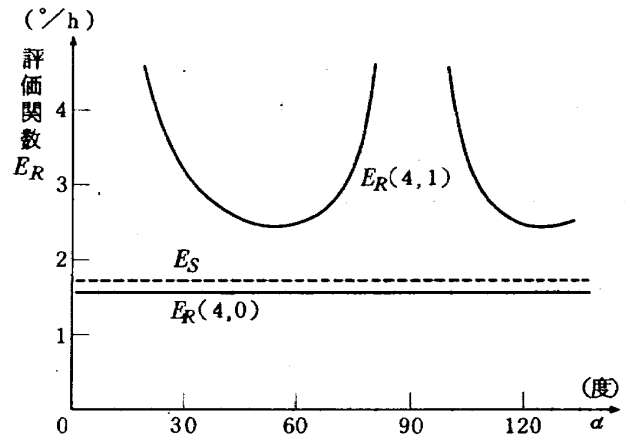


図14 E_R 曲線 (4 S系 No 1)

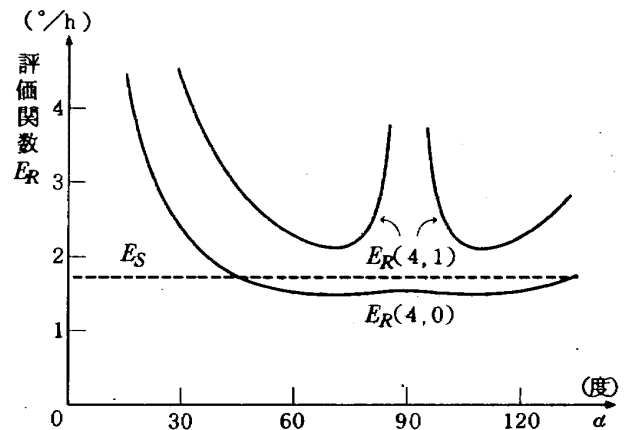


図15 E_R 曲線 (4 S系 No 2)

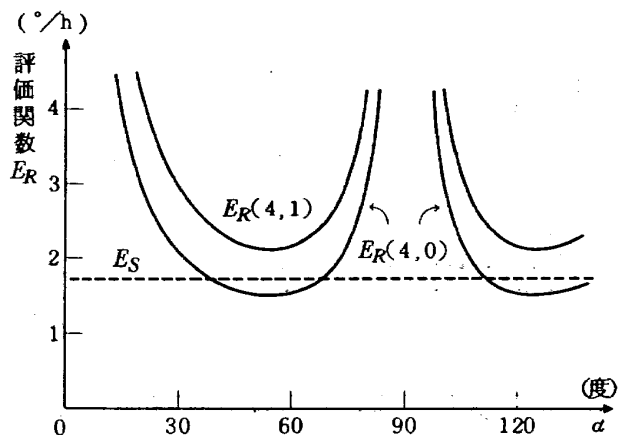


図16 E_R 曲線 (4 S系 No 3)

3個のとき)には、 α をどのように選んでも E_R は E_S より大きいが、これは3個のセンサの最適配置は直交取付であることと関連がある²⁾。「 α の最適値はセンサ故障の有無に関係なく決められる」ことが望ましいが、図14~18よりそのような理想的な α の値が各系で選定可能であることがわかる。例えば、4S系No1では $E_R(4,0)$ が α に関係なく一定であるから、 $E_R(4,1)$ を最小にする α を選定すれば、その α は $E_R(4,0)$ 最小をも満たす。4S系No2, No3では $E_R(4,0)$ を最小にする α を選定すれば $E_R(4,1)$ を最小にする α にもなる。5S系も同様に $E_R(5,0)$ を最小にする α を選定すればよい。6S系では、図18より明らかなように、 $E_R(6,3)$ を最小にする α が $E_R(6,0)$, $E_R(6,1)$, $E_R(6,2)$ 最小をも満たす α になる。

α の選定に用いる上記の各 E_R の式を表2と式(42)~式(52)とから求め、4S系No1, No2, No3, 5S系, 6S系におけるそれらの E_R を $q(4,1)$, $q(4,2)$, $q(4,3)$, $q(5)$, $q(6)$ とおけば、各 q の式は次のようになる。4S系No1では

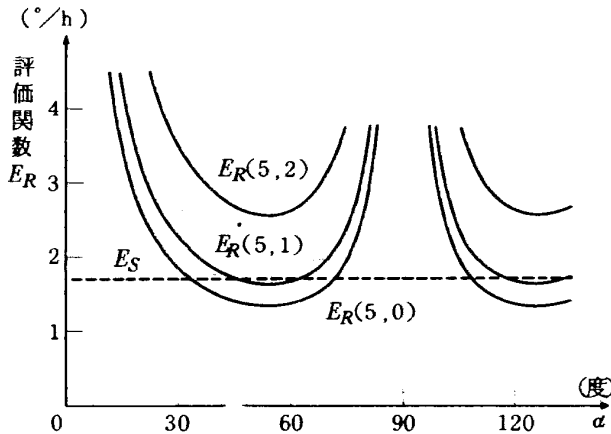


図17 E_R 曲線(5S系)

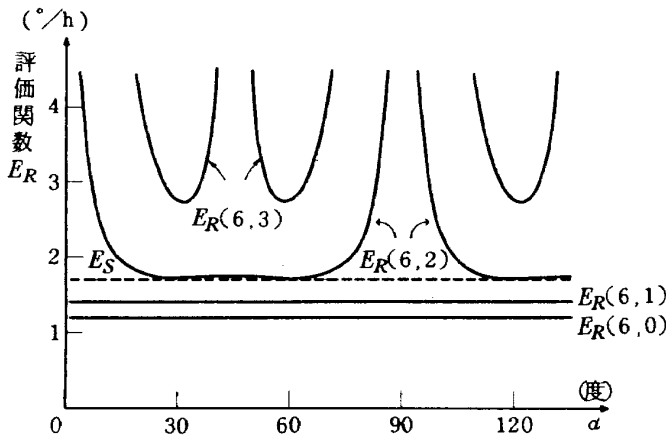


図18 E_R 曲線(6S系)

$$q(4,1)=E_R(4,1)=\left\{\frac{1}{2}\left(3+\frac{4}{\sin^2\alpha}+\frac{1}{\cos^2\alpha}\right)\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (58)$$

となり、4S系No2では

$$q(4,2)=E_R(4,0)=\left\{\frac{7+9\cos^2\alpha}{3\sin^2\alpha(1+3\cos^2\alpha)}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (59)$$

となり、4S系No3では

$$q(4,3)=E_R(4,0)=\left\{\frac{4\cos^2\alpha+\sin^2\alpha}{4\cos^2\alpha\sin^2\alpha}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (60)$$

となり、5S系では

$$q(5)=E_R(5,0)=\left\{\frac{4\cos^2\alpha+\sin^2\alpha}{5\cos^2\alpha\sin^2\alpha}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (61)$$

となる。6S系では

$$q(6)=E_R(6,3) = \frac{1}{2\sqrt{5}} \left\{ \frac{3(1+u-u^2)}{u^2(u-1)^2} + \frac{24(1-3u+3u^2)}{(2u-1)^2(u^2-u+1)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (62)$$

$$u = \sin^2\alpha \quad (63)$$

となる。上記の各式を微分して厳密な最適解を各冗長系別に求めれば表3のようになる。図14~18より α の最適値は各系で二つ以上あるように思えるが、角の正弦・余弦の関係より90度以下で求めれば十分であり、また6S系では $\sin^2\alpha = (5 \pm \sqrt{5})/10$ と二つの最適値があるがこれらは互いに余角の関係にあるので小さい方の α をとればよい。表3の α の値より、4S系No2, 3は各センサ軸がそれぞれ正四面体, 正八面体の各面に直交している場合であるし、6S系はセンサ軸が正十二面体の各面に直交している場合である。

表3 各冗長系の取付角 α の最適値

4S系No1	$\sin^2\alpha = \frac{2}{3}$	$\alpha = 54.7356$ 度
4S系No2	$\sin^2\alpha = \frac{8}{9}$	$\alpha = 70.5288$ 度
4S系No3	$\sin^2\alpha = \frac{2}{3}$	$\alpha = 54.7356$ 度
5S系	$\sin^2\alpha = \frac{2}{3}$	$\alpha = 54.7356$ 度
6S系	$\sin^2\alpha = (5-\sqrt{5})/10$	$\alpha = 31.7175$ 度

7. 結 論

SINSの信頼性向上を目的として冗長センサ系の構成を試みたが、単にその目的のみであれば、センサを非直交取付とする冗長系の構成で十分であることがわかった。しかしながら、冗長センサ系はセンサ故障を考慮しての設計手法であるがために、センサの許容故障時および各センサ誤差の直交3軸に及ぼす影響度を考慮してセンサの最適配置を決定する必要があった。そこで本研究においては、センサの無故障時から最大許容故障時(4S, 5S, 6S系でそれぞれ1, 2, 3個故障許容)にいたるまでその影響度を評価関数として導き、センサの最適配置の基準となる最適解の概算値をシミュレーションによって求めた。その結果、4S系No1では1個故障時の最適解を、4S系No2, No3および5S系では無故障時の最適解を、6S系では3個故障時の最適解をそれぞれ求めれば、それらの解は他の時点(故障時, 無故障時)の最適解に含まれることがわかったので、それらの最適解に関する評価関数 E_R (例えば、4S系No1では1個故障時の E_R)の理論解析によって厳密な最適解を求めた。こうして得られた最適解はいずれもセンサ故障の有無および故障センサ個数に無関係となり、各冗長系毎に単一の解を定めることができた。この解を冗長系の構成に用いれば、同一センサ個数の系において信頼度最大のみならずセンサ誤差の直交3軸への影響度最小をも考慮した最適センサ配置となる。また E_R が最小になる最適配置といっても、 E_R を構成する $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ の値はそれぞれ異なっているので、直交3軸のどれをSINSのロール, ピッチ, ヨー軸にとるかにはトラジェクトリシミュレーション等によって決める必要がある。さらに、各冗長系の無故障時の E_R は、図14~18より明らかなように、3S系に比して4S系で13.4%, 5S系で22.5%, 6S系で29.3%だけ小さくなっていることがわかる。これは冗長系を航法系に適用すればセンサ誤差によって発生する航法誤差を低減できる可能性があることを示すものである。

以上のことより、冗長系の利点はSINSの信頼性向上だけでなく航法誤差の低減にもあることがわかる。よって、将来中距離以上のミッション等においてSINSの信頼性向上が要求される際に冗長系を用いれば、ミッションの高精度化にも役立つことと思われる。

付録1. E_R が一定値をとる場合についての解析

本文中の図14, 18における $E_R(4, 0), E_R(6, 0), E_R(6, 1)$ は一定値をとっているが、これは必ずしも E_R を構成する $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ が一定であることを意味するものではない。いま $E_R(4, 0)$ について考えてみよう。本文中の式(30)に表2の H の要素を代入し、本文中の式(38), (39), (40), (56)より $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ を求めると

$$E_{x_1} = E_{x_2} = \frac{\sqrt{3 + \cos^2 \alpha}}{2} \tag{1}$$

$$E_{x_3} = \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \alpha}{2}} \tag{2}$$

となる。これより $E_R(4, 0)$ は

$$E_R(4, 0) = \sqrt{E_{x_1}^2 + E_{x_2}^2 + E_{x_3}^2} = \sqrt{\frac{5}{2}} \tag{3}$$

となる。全く同様の手順によって、 $E_R(6, 0)$ を構成する $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ を求めると

$$E_{x_1} = E_{x_2} = E_{x_3} = \frac{\sqrt{2}}{2} \tag{4}$$

となり、 $E_R(6, 0)$ は

$$E_R(6, 0) = \sqrt{E_{x_1}^2 + E_{x_2}^2 + E_{x_3}^2} = \sqrt{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

となる。また、 $E_R(6, 1)$ を構成する $E_{x_1}, E_{x_2}, E_{x_3}$ は故障センサの種類によって異なるので、センサ l ($l = a, b, \dots, f$)の故障時におけるそれらを $E_{x_1}(l), E_{x_2}(l), E_{x_3}(l)$ とし、本文中の第5, 6章の手順に従ってこれらを求めると

$$\begin{aligned} E_{x_1}(a) &= E_{x_1}(b) = E_{x_2}(c) = E_{x_2}(d) \\ &= E_{x_3}(e) = E_{x_3}(f) = \sqrt{\frac{1 + \sin^2 \alpha}{2}} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} E_{x_2}(a) &= E_{x_2}(b) = E_{x_3}(c) = E_{x_3}(d) \\ &= E_{x_1}(e) = E_{x_1}(f) = \sqrt{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} E_{x_3}(a) &= E_{x_3}(b) = E_{x_1}(c) = E_{x_1}(d) \\ &= E_{x_2}(e) = E_{x_2}(f) = \sqrt{\frac{1 + \cos^2 \alpha}{2}} \end{aligned} \tag{8}$$

となる。この3式より明らか

$$\begin{aligned} E_T(a) &= E_T(b) = E_T(c) = E_T(d) \\ &= E_T(e) = E_T(f) = \sqrt{2} \end{aligned} \tag{9}$$

となる。本文中の式(53)に(9)式を代入して $E_R(6, 1)$ を求めると

$$E_R(6, 1) = \sqrt{2} \tag{10}$$

となる。

付録2. 冗長系のセンサ故障検出の基本式

$$(\omega_a + \omega_b) \sin \alpha + \sqrt{2} (\omega_c \cos \alpha - \omega_d) = 0 \quad (2)$$

冗長系はセンサ故障を考慮しての設計法であり、当然故障検出とその分離が可能でなければならない。⁷⁾ SINSでは慣性センサの出力が航法の基準となるので、飛行中に故障センサ出力と比較し得る基準量が得られない。この場合、故障検出は各センサの出力間の関係を使って行なりよりほかはない。ここでは故障検出の基準となる基本式を各センサ a, b, \dots, f の出力 $\omega_a, \omega_b, \dots, \omega_f$ を使って誘導する。これらの出力の直交3軸への変換値を $\omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \omega_{x_3}$ とする。

となる。 a, b, c, d のいずれかのセンサが故障して、その出力が測定基準よりずれてくると(2)式の左辺は零でなくなるので、センサ故障が発見出来る。しかし、このときどのセンサが故障しているかは発見できない。さらに、この(2)式は各センサ誤差が零のときの式であり、一般には $\omega_a, \omega_b, \omega_c, \omega_d$ は誤差を含んだ値として検出される。そしてこの誤差は互いに統計的に独立である。よって(2)式の右辺はセンサの無故障時にも零になるとは限らないので

4S系 No1 では表2の値より

$$v = (\omega_a + \omega_b) \sin \alpha + \sqrt{2} (\omega_c \cos \alpha - \omega_d) \approx 0 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \omega_a \\ \omega_b \\ \omega_c \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha & \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{x_1} \\ \omega_{x_2} \\ \omega_{x_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

として、この v の絶対値がセンサ誤差の評価値を使って決められた評価基準値より大きい小さいかによってセンサ故障の有無を判定する。同様の手法によって、4S系 No2, No3, 5S系, 6S系の故障検出用基本式を導くと付表のようになる。この付表の中で、4S系および5S系の α は任意でよい(最適値でなくてもよい)が、

となるから、これより $\omega_{x_1}, \omega_{x_2}, \omega_{x_3}$ を消去すれば

付表 各冗長系の故障検出用基本式

系	基本式
4S系 No1	$v = (\omega_a + \omega_b) \sin \alpha + \sqrt{2} (\omega_c \cos \alpha - \omega_d) \approx 0$
4S系 No2	$v = \omega_a + \omega_b + \omega_c + 3\omega_d \cos \alpha \approx 0$
4S系 No3	$v = \omega_a - \omega_b + \omega_c - \omega_d \approx 0$
5S系	$v_1 = 2(\omega_a - \omega_d) - (\sqrt{5} + 1)(\omega_b - \omega_c) \approx 0$ $v_2 = 2(\omega_a - \omega_c) + (\sqrt{5} + 1)(\omega_d - \omega_e) \approx 0$ $v_3 = 2(\omega_b - \omega_d) - (\sqrt{5} + 1)(\omega_a - \omega_e) \approx 0$ $v_4 = 2(\omega_c - \omega_e) + (\sqrt{5} + 1)(\omega_a - \omega_b) \approx 0$ $v_5 = 2(\omega_b - \omega_e) - (\sqrt{5} + 1)(\omega_c - \omega_d) \approx 0$
6S系	$v_1 = (\omega_a - \omega_b) \cos \alpha - (\omega_c + \omega_d) \sin \alpha \approx 0$ $v_2 = (\omega_b + \omega_c) \cos \alpha - (\omega_a + \omega_e) \sin \alpha \approx 0$ $v_3 = (\omega_c - \omega_a) \cos \alpha + (\omega_b - \omega_f) \sin \alpha \approx 0$ $v_4 = (\omega_d - \omega_a) \cos \alpha + (\omega_b + \omega_e) \sin \alpha \approx 0$ $v_5 = (\omega_b + \omega_d) \cos \alpha - (\omega_a - \omega_f) \sin \alpha \approx 0$ $v_6 = (\omega_e - \omega_f) \cos \alpha - (\omega_a + \omega_b) \sin \alpha \approx 0$ $v_7 = (\omega_d + \omega_e) \cos \alpha - (\omega_a + \omega_c) \sin \alpha \approx 0$ $v_8 = (\omega_f - \omega_c) \cos \alpha + (\omega_a + \omega_d) \sin \alpha \approx 0$ $v_9 = (\omega_a + \omega_f) \cos \alpha - (\omega_c + \omega_e) \sin \alpha \approx 0$ $v_{10} = (\omega_e - \omega_a) \cos \alpha + (\omega_d - \omega_f) \sin \alpha \approx 0$ $v_{11} = (\omega_e - \omega_c) \cos \alpha + (\omega_d - \omega_b) \sin \alpha \approx 0$ $v_{12} = (\omega_f + \omega_d) \cos \alpha + (\omega_b - \omega_c) \sin \alpha \approx 0$ $v_{13} = (\omega_b - \omega_e) \cos \alpha + (\omega_c + \omega_f) \sin \alpha \approx 0$ $v_{14} = (\omega_b + \omega_f) \cos \alpha + (\omega_d - \omega_e) \sin \alpha \approx 0$ $v_{15} = (\omega_d - \omega_c) \cos \alpha + (\omega_e + \omega_f) \sin \alpha \approx 0$

6 S系の α は最適値($\sin^2 \alpha = (5 - \sqrt{5})/10$)に、また5 S系の β は72度($=2\pi/5$)に限定される。付表より、5 S系において1個のセンサが故障したときには、公式を使って故障検出ができる。例えば、センサ a が故障したときには、 ω_a を含む4式 v_1, v_2, v_3, v_4 の絶対値が評価基準値よりずれるので、そこでセンサ a を故障と判定すればよい。しかし、この後に残りの4個のセンサのうちいずれかが故障したときは、4 S系と同じくいずれかが故障していることは見出せても、どれが故障しているかは見出せない。また、6 S系でも1個故障時および2個故障時までには公式から故障検出可能であるが、3個故障時は4 S系と同様になる。したがって、4 S系の故障検出技術は、今後他の5、6 S系にも共通する基本的な研究課題となる。

参 考 文 献

- 1) J.T. Ephgrave; Optimum Redundant Configurations of Inertial Sensors, Aerospace Corporation, AD-759561, Sept. 1966.
- 2) A.J. Pejsa; Optimum Orientation and Accuracy of Redundant Sensor Arrays, AIAA Paper No. 71-59, Jan. 1971.
- 3) 木村武雄; ベクトル量計測における最適観測軸配置, 第14回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp.17 ~ pp.18, 1975年8月
- 4) 塩見 弘; 信頼性工学入門, 丸善, pp.1 ~ pp.120
- 5) J.P. Gilmore; A Non-Orthogonal Gyro Configuration, S.M. Thesis, MIT, Jan. 1967.
- 6) 大月, 新宮, 鈴木; ストラップダウン方式の慣性機器誤差によって生ずる飛行経路誤差の一考察, NAL, TM-225, 1972年5月
- 7) T.T. Chien; An Adaptive Technique for a Redundant-Sensor Navigation System; Sc. D. Thesis, MIT, Feb. 1972.

航空宇宙技術研究所資料 296号

昭和51年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
