

参考文献

参考文献は各章末に記したが、全体を通じての参考文献を以下に記す。

慣性航法および複合航法に関する専門書として、

- 1) D. H. Titterton, Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd Edition, AIAA, 2004
- 2) R. M. Rogers, Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems, 3rd Edition, AIAA, 2007
- 3) K. R. Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, John Wiley & Sons, 1971
- 4) J. A. Farrell, M. Barth, The Global Positioning System & Inertial Navigation, McGraw-Hill, 1998
- 5) M. S. Grewal, L. R. Weill, A. P. Andrews, Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration, John Wiley & Sons, 2001
- 6) P. D. Groves, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, Artech House, 2008
- 7) O. S. Salychev, Applied inertial navigation: Problems and Solutions, BMSTU Press, 2004

などがある。文献 1 は最も代表的な教科書であり、慣性航法全般についてわかりやすく書かれている。文献 2 は数式の説明がくわしく書かれている。文献 3 は古典的な教科書である。残念ながら、この分野の専門書に適当な和書はない。

カルマンフィルタに関するものとして、

- 8) 加藤寛一郎, 最適制御入門 レギュレータとカルマン・フィルタ, 東京大学出版会, 1987
- 9) 有本卓, カルマン・フィルター, 産業図書, 1977
- 10) 片山徹, 応用カルマンフィルタ, 朝倉書店, 1983
- 11) A. Gelb, Applied Optimal Estimation, M. I. T. Press, 1974
- 12) R. G. Brown, P. Y. C. Hwang, Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 1997
- 13) M. S. Grewal, A. P. Andrews, Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2001

などがある。和書では文献 8 が最もわかりやすい。文献 11 は古典的な教科書であるが、古さを感じさせない。

姿勢とその表現方法（クォータニオンなど）に関するものとして、

- 14) J. B. Kuipers, Quaternions and Rotation Sequences, Princeton University Press, 1999
- 15) 金谷健一, 3次元回転—パラメータ計算とリー代数による最適化—, 共立出版, 2019

などがある。文献 14 はクォータニオンについて図を多く用いてわかりやすく書かれている。文献 15 は姿勢の表現方法（回転行列, オイラー角, 四元数）について解説した後, 回転前後の座標値から回転行列を推定する方法について解説している。

ジャイロのアラン分散に関するものとして、

- 16) IEEE Std 952-1997, IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros
- 17) JIS C 5630-20, マイクロマシン及び MEMS—第 20 部：小型ジャイロ, 日本規格協会, 2015

がある。ともに規格であるが、アラン分散について頁を割いて書かれている。

本書では扱わなかったが、宇宙機の航法に興味がある者には、次の文献が参考になる。

- 18) 富田信之, 宇宙システム入門 ロケット・人工衛星の運動, 東京大学出版会, 1993
- 19) 宇宙航空研究開発機構, 宇宙機ダイナミクス・姿勢制御技術ユニット, 人工衛星の力学と制御, JAXA-SP-05-025, 2006

記号表

A, B, C	行列
a, b, c	ベクトル
<i>a, b, c</i>	行列の要素, ベクトルの要素
<i>a, b</i>	楕円の長半径, 楕円の短半径
B	姿勢誤差の行列
<i>B</i>	1/ <i>f</i> ノイズの係数
<i>B</i> ₀	ランダムバイアスの係数
C _{<i>a</i>} ^{<i>b</i>}	<i>a</i> 座標系から <i>b</i> 座標系への方向余弦行列
<i>E</i>	焦点距離
<i>e</i>	離心率
<i>F, F</i>	力, 外力
f	単位質量当たりの外力
<i>f</i>	扁平率, 引力加速度, 振動数
δf	加速度センサ誤差
g, g	重力加速度
<i>G</i>	万有引力定数
G	引力
<i>GM</i>	引力定数
H	観測行列
<i>h</i>	高度
I	単位行列
i, j, k	座標系の単位ベクトル
<i>i</i>	虚数単位
K	カルマンゲイン
<i>K</i>	ランダムウォークの係数
<i>M, m</i>	質量
<i>m</i>	地球の遠心力と引力の比を表す無次元数
m, m	地磁気
<i>M</i> _{<i>ij</i>}	余因子
<i>N</i>	ホワイトノイズの係数, 正規分布
P	共分散行列
<i>P</i>	分散

Q	システムノイズの共分散行列
q	クォータニオン
q_0	クォータニオンの実部
q_c	マルコフノイズの係数
q	クォータニオンの虚部
q_1, q_2, q_3	クォータニオンの虚部の要素
R	観測ノイズの共分散行列
R	自己相関係数
r	位置
r, R	半径, 曲率半径
S	パワースペクトル密度
r	位置
$\delta\mathbf{r}$	位置誤差
s	距離
t	時刻, 時間, 厚さ
U	可観測性行列
U	引力の位置エネルギー
u	楕円体座標系の径
V	体積, 重力の位置エネルギー
v	観測ノイズ, 速度
$\delta\mathbf{v}$	速度誤差
w	システムノイズ
w	ホワイトノイズ
x	状態変数
x, y, z	座標軸, 座標
Z	クォータニオンの Z 行列
z	観測値
α, β, γ	方向余弦の角度
β	更成緯度, マルコフノイズの係数
δ	回転角, デルタ関数
θ	ピッチ角, 球座標系の角度, 楕円体座標系の角度
λ	緯度
λ_c	地心緯度
μ	経度, 平均値

ρ	質点の位置
σ	密度, アラン分散, 標準偏差
τ	時間, 時定数
Φ	推移行列
φ	ロール角, 球座標系の角度, 楕円体座標系の角度
$\Phi, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$	座標軸の回転角度, 姿勢誤差
ψ	方位角
$\Omega, \mathbf{\Omega}$	地球の自転角速度
ω	角速度, 角振動数
$\delta\omega$	角速度センサ誤差
$\mathbf{0}$	零行列
\mathbf{A}^T	行列 \mathbf{A} の転置行列
$ \mathbf{A} $	行列 \mathbf{A} の行列式
\mathbf{A}^{-1}	行列 \mathbf{A} の逆行列
$\text{rank}(\mathbf{A})$	行列 \mathbf{A} のランク
$\text{Tr}(\mathbf{A})$	行列 \mathbf{A} のトレース
$\dot{\mathbf{A}}$	行列 \mathbf{A} の時間微分
$\hat{\mathbf{A}}$	行列 \mathbf{A} の推定値
$ \mathbf{a} $	ベクトル \mathbf{a} のノルム
$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$	ベクトル \mathbf{a} とベクトル \mathbf{b} の内積
$\mathbf{a} \times \mathbf{b}$	ベクトル \mathbf{a} とベクトル \mathbf{b} の外積
$(\mathbf{a} \times)$	ベクトル \mathbf{a} の外積行列
$\dot{\mathbf{a}}$	ベクトル \mathbf{a} の時間微分
$p \otimes q$	クォータニオン p とクォータニオン q の積
q^*	クォータニオン q の共役クォータニオン
q^{-1}	クォータニオン q の逆クォータニオン
$ q $	クォータニオン q のノルム
添え字 b	機体座標系
添え字 c	地心, 遠心力
添え字 D	下方向
添え字 E	東方向
添え字 e	ECEF 座標系, 赤道
添え字 i	ECI 座標系

添え字 ij	第 i 行 j 列
添え字 N	北方向
添え字 n	航法座標系
添え字 p	極
添え字 x, y, z	直交座標系の x, y, z 軸

索引

あ行		観測更新	7-6
アラン分散	6-1, 6-15	観測ノイズ	7-6
ECI 座標系	3-1	観測方程式	7-1
ECEF 座標系	3-1	機体座標系	1-1, 3-4
位置エネルギー	4-19	逆行列	2-10
位置誤差方程式	8-16	逆クォータニオン	5-7
位置方程式	8-1, 8-5, 8-9	逆ラプラス変換	6-2
移動角速度	8-9	球座標系	4-2
引力	4-19	共役クォータニオン	5-6
引力定数	4-19	行列	2-1
衛星測位システム	1-4	行列式	2-8
$1/f$ ノイズ	6-12	極半径	4-5
オイラー角	3-4	曲率半径	4-13
オイラー角誤差	5-32	クォータニオン	5-4
オイラー角の時間微分	5-25	クォータニオン誤差	5-33
		クォータニオン縮減誤差	5-35
		クォータニオン時間微分	5-26
か行		係数行列	7-2
外積	2-6	向心力	8-7
外積行列	2-7	更成緯度	4-5
回転座標系	8-3	恒星日	4-16
回転楕円体	4-1	航法座標系	3-3
海里	4-4	コリオリ力	8-8
可観測	7-11		
可観測性行列	7-11	き行	
角速度センサ	1-3	時間更新	7-5
拡張カルマンフィルタ	7-10	自己相関係数	6-1
加速度センサ	1-3	システムノイズ	7-2
カルマンゲイン	7-9	システム方程式	6-4, 7-2
カルマンフィルタ	7-1	姿勢	1-4, 5-1
慣性計測装置	1-2	姿勢誤差	5-29
慣性航法	1-4	姿勢誤差方程式	8-18
慣性航法装置	1-2	姿勢方程式	8-2, 8-9, 8-14
慣性センサ	1-3	時定数	6-27
観測行列	7-7		

自転角速度	3-13, 4-16	地磁気	5-40
重力	4-19	地心緯度	4-5
状態変数	7-2	長軸	4-1
焦点	4-6	長半径	4-1
焦点距離	4-3	直交行列	2-11
推移行列	7-3	地理緯度	4-5
スカラー三重積	2-9	デルタ関数	6-2, 7-6
ストラップダウン	1-2	転置行列	2-3
正規化	9-2	トレース	2-14
正規重力	4-34		
正規分布	6-3	な行	
正方行列	2-1	内積	2-4
赤道半径	4-5	ニュートンの運動方程式	8-1
Z 行列	5-28	ノイズ	6-1
零行列	2-1	ノルム	2-5, 5-7
零速度更新	7-18		
全磁力	5-40	は行	
速度誤差方程式	8-16	バイアス	6-6
速度方程式	8-1, 8-6, 8-13	パワースペクトル密度	6-1
ソミリアーナの式	4-34	万有引力定数	4-19
		ピッチ角	3-4
た行		不規則過程	6-1
対称行列	2-4	伏角	5-40
対地速度	8-6	複合航法	1-4
太陽日	4-16	部分行列	2-3
楕円	4-1	平均半径	4-1
楕円体	4-1	平均曲率半径	4-16
楕円体座標系	4-2	ベクトル	2-1
WGS-84	4-5	ベクトル三重積	2-7
単位行列	2-1	偏角	5-40
短軸	4-1	扁平率	4-8
短半径	4-1	方位角	3-4
地球中心慣性座標系	3-1	方位ベクトル	9-7
地球中心地球固定座標系	3-1	方向余弦	5-12
地球の曲率半径	4-15	方向余弦行列	3-12
地球の平均密度	4-36	方向余弦行列誤差	5-31

方向余弦行列の時間微分 5-22
ホワイトノイズ 6-2

ま行

マルコフノイズ 6-7
右ねじ系 1-1

や行

余因子 2-8

ら行

ラプラス変換 6-2
ランク 2-12
ランダムウォーク 6-12
ランダムバイアス 6-6
離心率 4-7
ロール角 3-4

わ行

歪対称行列 2-4

著者略歴

1956 年 福井県に生まれる
1980 年 東京大学工学部航空学科卒業
1980～1990 年 株式会社ブリヂストンに勤務
1990～2016 年 住友精密工業株式会社に勤務

慣性航法工学

2017 年 1 月 26 日 Rev.0
2018 年 9 月 25 日 Rev.1