

目次

第1章 航空機の実線形運動方程式 1

- 1.1 ベクトルの微分 1
 - 1.2 基底ベクトルと座標成分ベクトル 4
 - 1.3 機体の回転運動（姿勢運動）の方程式 5
 - 1.3.1 モーメント方程式 6
 - 1.3.2 外積行列と慣性行列 6
 - 1.3.3 回転運動（姿勢運動）の方程式 8
 - 1.4 機体重心の運動方程式 9
 - 1.5 座標系の種類と座標成分の変換 11
 - 1.5.1 座標系の種類 12
 - (1) 局所水平座標系 O_H-X_H, Y_H, Z_H 12
 - (2) 地面固定座標系 12
 - (3) 機体軸系 12
 - (4) 安定軸系 13
 - (5) 風軸系 13
 - (6) 慣性主軸系 14
 - 1.5.2 空気力の座標変換 15
 - (1) 安定軸系から機体軸系への変換 15
 - (2) 風軸系から安定軸系への変換 15
 - (3) 風軸系から機体軸系への変換 15
 - 1.6 慣性行列（テンソル）の座標変換 16
 - 1.6.1 慣性行列の安定軸系と機体軸系間の変換 16
 - 1.6.2 慣性行列の慣性主軸系と安定軸系間の変換 18
 - 1.7 機体姿勢のオイラー角表現と速度・角速度の座標変換 19
 - 1.7.1 オイラー角による姿勢表現 19
 - 1.7.2 速度ベクトルの座標変換 20
 - (1) Z_0 軸回りの回転 20
 - (2) Y_1 軸回りの回転 21
 - (3) X_2 軸回りの回転 22
 - 1.7.3 角速度ベクトルの変換 26
 - (1) Z_0 軸回りの角速度ベクトル 26
 - (2) Y_1 軸回りの角速度ベクトル 27
 - (3) X_2 軸回りの角速度ベクトル 27
 - 1.8 重力と慣性乗積の影響 28
 - 1.9 ジャイロ連成と推力によるモーメント 31
 - 1.9.1 ジャイロ連成によるモーメント 31
 - 1.9.2 推力モーメント 35
 - 1.9.3 複数エンジンによるモーメントの方程式 35
- 問題 37

第2章 宇宙往還機・惑星探査機の運動方程式 38

- 2.1 座標系と座標変換行列 39
 - 2.1.1 地心慣性座標系 O_I-X_I, Y_I, Z_I 39
 - 2.1.2 地球固定座標系 O_G-X_G, Y_G, Z_G 39
 - 2.1.3 局所水平座標系 O_H-X_H, Y_H, Z_H 40
 - 2.1.4 機体軸系（機体固定座標系） O_B-X_B, Y_B, Z_B 41

- 2.1.5 風軸系 O_W-X_W, Y_W, Z_W 41
 - (1) 局所水平座標系から風軸系への変換行列 41
 - (2) 風軸系から機体軸系への変換行列 42

2.2 運動方程式 43

- 2.2.1 重心運動の方程式 43
- 2.2.2 姿勢（回転）運動の方程式 44
 - (1) 機体の位置 47
 - (2) 機体の角速度 51
- 2.2.3 機体位置の方程式 45
 - (1) 対地球速度 45
 - (2) 局所水平座標系に対する機体の角速度 51
- 2.2.4 姿勢方程式 48
 - (1) 機体の対地角速度 48
 - (2) 局所水平座標系に対する機体の角速度 51
 - (3) キネマティックス方程式の拡張 53

問題 56

第3章 微小擾乱運動方程式 57

- 3.1 擾乱方程式の仮定と釣り合い状態 57
- 3.2 テーラー級数展開 59
 - 3.2.1 1変数関数のテーラー級数展開 59
 - 3.2.2 多変数関数のテーラー級数展開 59
 - 3.2.3 線形近似 60
- 3.3 4方程式の線形化 62
 - 3.3.1 重心運動の方程式の線形化 62
 - 3.3.2 姿勢運動方程式の線形化 64
 - 3.3.3 キネマティックス方程式の線形化 65
 - 3.3.4 航法方程式の線形化 66
- 3.4 迎え角と横滑り角の線形化 68
- 3.5 姿勢角，迎え角と飛行経路角 71
- 3.6 空気力項の線形化と安定微係数 72
 - 3.6.1 縦運動の線形化 78
 - 3.6.2 横・方向運動の線形化 78
- 3.7 線形化された運動方程式 78
 - 3.7.1 縦運動方程式 79
 - 3.7.2 横・方向運動方程式 81
- 3.8 安定微係数の座標変換 83
 - 3.8.1 変数の座標変換 84
 - 3.8.2 重心運動の安定微係数の座標変換 84
 - (1) 定常速度と姿勢角に関する行列 85
 - (2) 速度に関する空気力の安定微係数 86
 - (3) 加速度に関する安定微係数 86
 - (4) 角速度に関する空気力の安定微係数 87
 - (5) 舵角に関する空気力の制御微係数 87
 - (6) 推力調整に関する空気力の制御微係数 87
 - 3.8.3 姿勢運動の安定微係数の座標変換 87
 - (1) 速度に関する空力モーメントの安定微係数 90
 - (2) 加速度に関する空力モーメントの安定微係数 90
 - (3) 角速度に関する空力モーメントの安定微係数 91
 - (4) 舵角に関する空力モーメントの制御微係数 91
 - (5) 推力調整に関する空力モーメントの制御微係数 91

問題 92

第4章 安定微係数の推算	94
4.1 無次元安定微係数	94
4.1.1 空気力と空力モーメント	94
4.1.2 無次元安定微係数から有次元安定微係数への変換	95
4.1.3 縦の釣り合い条件と C_{x0} , C_{z0} の近似	100
4.2 無次元安定微係数から有次元安定微係数への変換例	103
4.2.1 機体の基本データ	103
4.2.2 有次元安定微係数への変換	105
4.3 縦の安定微係数の推算	106
(1) 前方速度に関する微係数	109
(2) 迎え角に関する微係数	112
(3) ピッチ角速度に関する微係数	116
(4) 昇降舵に関する微係数	117
4.4 横・方向の安定微係数の推算	118
(1) 垂直尾翼とサイドウォッシュ	119
(2) 横滑り角に関する微係数	121
(3) ロール角速度に関する微係数	128
(4) ヨー角速度に関する微係数	131
(5) エルロン舵角に関する微係数	136
(6) 方向舵舵角に関する微係数	138
問題	142
第5章 伝達関数と運動モード	143
5.1 縦運動の伝達関数	143
5.1.1 X 軸方向の速度の伝達関数	145
5.1.2 Z 軸方向の速度の伝達関数	145
5.1.3 ピッチ角の伝達関数	146
5.1.4 ピッチ角速度の伝達関数	146
5.1.5 迎え角の伝達関数	146
5.1.6 飛行経路角の伝達関数	146
5.2 横・方向運動の伝達関数	147
5.2.1 横速度の伝達関数	148
5.2.2 ロール角速度の伝達関数	148
5.2.3 ヨー角速度の伝達関数	149
5.2.4 ヨー角の伝達関数	149
5.2.5 横滑り角の伝達関数	149
5.2.6 ロール角の伝達関数	149
5.3 縦の運動モード	150
5.3.1 短周期モード近似	153
5.3.2 長周期モード近似	155
5.4 横・方向の運動モード	156
5.4.1 スパイラルモード	160
5.4.2 ロール(減衰)モード	161
5.4.3 ダッチロールモード	162
5.4.4 1自由度ダッチロールモード近似	163
5.4.5 2自由度ダッチロールモード近似	164
5.5 マヌーバ(マニユーバ)時の荷重倍数	164
5.5.1 垂直加速度と荷重倍数	165
5.5.2 釣り合い旋回と荷重倍数	166
5.6 経路制御の予測パラメータ CAP	167
5.7 経路角制御とバックサイドパラメータ	170
5.7.1 水平定常飛行時の縦運動の伝達関数	170
5.7.2 経路角の伝達関数とバックサイド領域	170
5.7.3 バックサイドパラメータの解釈	173
5.7.4 撃心	174
5.8 運動方程式の状態空間表示	175
5.8.1 状態ベクトル微分方程式と特性方程式	175
5.8.2 縦運動の状態方程式	176

5.8.3 横・方向運動の状態方程式	177	5.8.4 特性方程式	178
問題	179		
第6章 飛行性基準	180		
6.1 飛行性	180		
6.1.1 飛行条件と飛行特性	180	6.1.2 パイロット・レーティング	181
6.1.3 クーパー・ハーバー・レーティング	183	6.1.4 操縦性のレベル	183
6.1.5 飛行フェーズカテゴリ	184	6.1.6 航空機のクラス	184
6.1.7 飛行(運動)包囲線図	185		
6.2 各モードに対する要件	186		
6.2.1 短周期モード	186	6.2.2 長周期モード(フゴイドモード)	186
6.2.3 ロールモード	188	6.2.4 スパイラルモード	188
6.2.5 横フゴイドモード	189	6.2.6 ダッチロールモード	189
6.3 操縦性に影響を与えるギヤ比と操縦桿力の関係	190		
6.3.1 操縦性に影響するパラメータ	190	6.3.2 操縦桿とエレベータ間のギヤ比	191
6.3.3 操舵力(操縦桿力)	193		
6.4 飛行性基準の変遷とCスター基準	194		
6.5 横・方向運動の連成にかかわる飛行性基準	196		
6.5.1 ロール角速度のステップ応答	196	6.5.2 ロール角制御の安定性	199
6.5.3 横滑り角のステップ応答	202	6.5.4 モード比の入力変数に対する非依存性	204
6.5.5 ロール角速度と横滑り角の位相差	206	6.5.6 位相角 ψ_β と ψ_1 の関係	209
6.5.7 位相角 ψ_β とラダーによる調整	210	6.5.8 ロール-横滑り連成に関する要件	211
問題	211		
第7章 突風応答とその模擬	212		
7.1 大気擾乱がある場合の運動方程式	212		
7.1.1 縦の運動方程式	215	7.1.2 横・方向の運動方程式	216
7.2 大気擾乱の数学モデル	218		
7.2.1 定常風	218	7.2.2 ウィンドシアとダウンバースト	218
7.2.3 マイクロバーストモデル	219	7.2.4 孤立突風モデル	220
7.3 連続突風モデルとパワースペクトル密度	221		
7.3.1 フーリエ変換とパーシバルの定理	222	7.3.2 パワースペクトル密度と不規則過程	223
7.4 Karman モデルと Dryden モデルのスペクトル密度関数	224		
7.4.1 時間周波数と空間周波数	226	7.4.2 連続突風モデル	227
7.4.3 成形フィルターの設計と突風外乱の発生	228		
7.4.4 フィルターの状態方程式	230		
(1) 前方突風	230	(2) 横突風と垂直突風	231
7.4.5 MIL-F-8785C のモデル	231		
(1) 中・高高度モデル	231	(2) 低高度モデル	232
問題	233		

第 8 章 オートパイロットと飛行制御	234
8.1 誘導, 航法, 制御	234
8.2 初期の飛行制御	234
8.3 縦の飛行制御系	236
8.3.1 姿勢制御系	237
8.3.2 高度制御系	238
8.3.3 着陸制御 (自動着陸)	239
8.4 横・方向の飛行制御系	241
8.4.1 ヨーダンパー	241
8.4.2 ロール角制御	243
8.4.3 方位角制御 (ターンコーディネータ)	244
8.4.4 横位置の制御	246
8.5 その後の飛行制御	247
8.5.1 最適制御 (LQ, LQG)	247
8.5.2 適応制御	248
8.5.3 ロバスト制御	248
8.5.4 同定技術	248
8.5.5 その他	248
8.6 航法システム	249
8.6.1 電子航法システム	249
8.6.2 衛星航法システム	250
8.6.3 自律航法システム	251
付録	252
問題	253
第 9 章 機体姿勢の回転とクォータニオン表現	254
9.1 回転の行列表現とストラップダウン方程式	254
9.2 ベクトルの回転	256
9.3 クォータニオンとベクトル	258
9.4 クォータニオンの性質	261
9.5 クォータニオンを用いたベクトルの回転	264
9.6 クォータニオンのキネマティックス方程式	266
9.7 角速度から回転角と回転軸成分への変換	268
9.8 クォータニオンから方向余弦行列への変換	269
9.9 逆回転: 機体座標系から地面固定座標系への変換	270
9.10 オイラー角からクォータニオンパラメータへの変換	271
9.11 方向余弦行列からクォータニオンへの変換	272
問題	274
問題の解答とヒント	275
参考文献	286
索引	289