

2E03 曲線経路に対応したオートパイロット

片柳亮二（金沢工業大学）

Autopilot System applicable to Curved Flight Path

Ryoji Katayanagi (KIT, E-mail: qyq00437@nifty.com)

Key Words : Autopilot, Curved Flight Path

Abstract

In recent years, the next generation landing guidance system of an alternative to the ILS (instrument landing system) have been studied. This is the landing guidance system using high precision position information of the aircraft obtained by the GPS and enhancement data from the ground system. This allows flexible flight path settings, such as curved path. However, currently operated autopilot system is designed by assuming a linear path, it is impossible to fly along a curved flight path even if using the path error from the curve flight path. For this reason, it becomes necessary autopilot corresponding to curved flight path. In this paper, we report the results of the study for the autopilot system applicable to curved flight path of a combination of straight path and an arc path.

1. はじめに

近年, ILS(計器着陸装置)に代わる次世代の着陸誘導システムが研究されている^{1)~6)}. これは, GPS信号と地上からの補強データによって得られる高精度な機体の位置情報を用いる着陸誘導システムである. これにより, 曲線経路など柔軟な飛行経路設定が可能となる. しかし, 現在運用されているILSのオートパイロットは直線経路を想定したものであり, 曲線経路からの経路誤差を入力しても経路に沿って飛行することはできない. このため, 曲線経路に対応したオートパイロットが必要となっている⁶⁾. そこで, 本論文では, 直線経路と円弧経路を組み合わせた飛行経路に対応した横・方向系オートパイロットについて, シミュレーションにより検討したので報告する.

2. 検討に用いた機体と飛行条件等

検討に用いる機体は, 400人乗りの旅客機で, その諸元データを図2.1に示す. 初期飛行条件としては, 高度3000ft, 速度165ktの水平飛行とした. ここで検討したのは, 直線経路と円弧経路を組み合わせた飛行経路に対する横・方向系のオートパイロットであるが, シミュレーション計算は縦系の運動も含む非線形6自由度運動方程式を用いた.

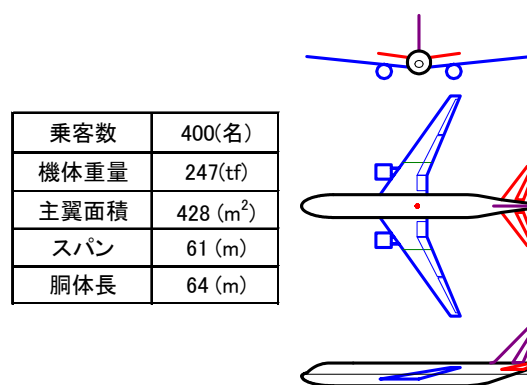


図2.1 機体例の主要諸元と3面図

3. 複数の直線経路に対する誘導則

曲線経路の検討に入る前に, まず複数の直線経路に機体を誘導する関係式を求める. 図3.1は, 経路点 $P_0(X_0, Y_0)$ と $P_1(X_1, Y_1)$ とを結ぶ飛行経路上に機体を誘導する場合を示している. ここで, ψ は機体の方位角, ψ_1 は点 P_1 と機体を結ぶ直線の方位角, $\tilde{\psi}_1$ は点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線の方位角である.

機体が点 P_1 に向かうためには, 機体の ψ を ψ_1 に一致させる必要がある. しかし, このままでは, 機体は点 P_1 に向かうものの, 点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線経路上には乗らない. そこで, 点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線経路と機体との偏差 d を求めると次のよう

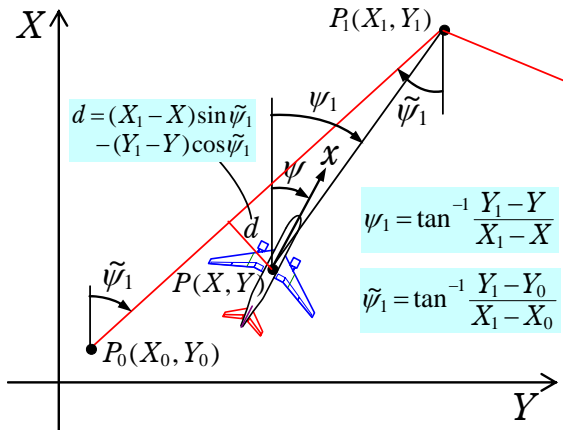


図3.1 複数の直線経路の誘導関係図

に表される。

$$d = (X_1 - X) \sin \tilde{\psi}_1 - (Y_1 - Y) \cos \tilde{\psi}_1 \quad (3.1)$$

ただし、

$$\psi_1 = \tan^{-1} \frac{Y_1 - Y}{X_1 - X}, \quad \tilde{\psi}_1 = \tan^{-1} \frac{Y_1 - Y_0}{X_1 - X_0} \quad (3.2)$$

である。この値を0にすると、機体は点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線経路上を飛行することになる。このようにして、誘導則が次のように得られる。

$$\phi_{CMD} = K_\psi (-\psi + \psi_1 - K_d d) \quad (3.2)$$

4. 直線と円弧の経路に対する誘導則

図4.1に示すように、直線経路とこれに接する円弧経路上に機体を誘導する関係式を求める。

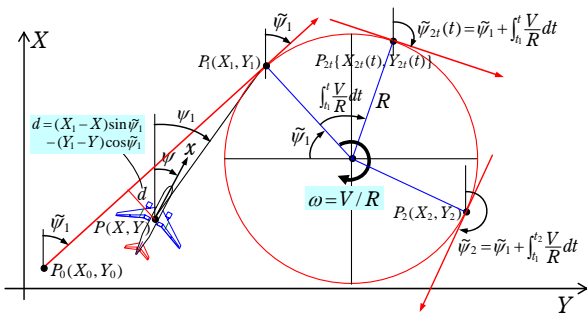


図4.1 直線と円弧の経路の誘導関係図

図4.1の点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線経路は、点 P_1 において円弧経路に接している。点 P_1 に到達後、機体は円弧経路に沿って飛行して、点 P_2 において接する直線経路に接続される。直線経路については、3項に示した誘導則で飛行するが、円弧経路については、回転角速度 V/R で円弧の経路に沿って飛行する。ここで、 V は機体速度、 R は半径である。このとき、円弧経路上の各点における折線の方位角は次式で表される。

$$\tilde{\psi}_{2t}(t) = \tilde{\psi}_1 + \int_{t_1}^t \frac{V}{R} dt \quad (4.1)$$

ここで、 $\tilde{\psi}_1$ は点 P_1 における折線の方位角、 t_1 は点 P_1 に到達した時の時間である。このとき、円弧経路上の各点における折線に沿って3項に示した誘導則を適用することで、円弧経路に沿って飛行することができる。

5. 直線と複数の円弧経路に対する誘導則

図5.1に示すように、直線経路とこれに接する複数の円弧経路上に機体を誘導する関係式を求める。

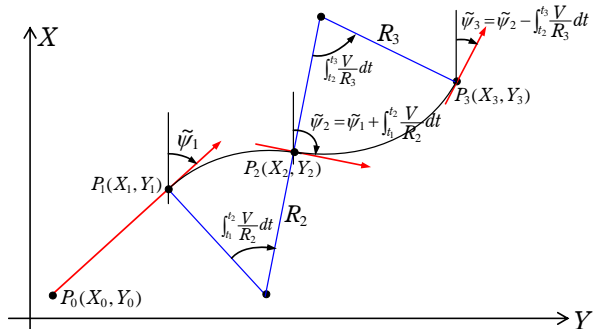


図5.1 直線と複数の円弧経路の誘導関係図

図5.1の点 P_0 と点 P_1 を結ぶ直線経路は、点 P_1 において円弧経路に接続する。その後点 P_2 においてもう1つの円弧経路に移行する。2つの円弧経路に沿って飛行した後、点 P_3 において接する直線経路に接続される。これらの直線経路および円弧経路に対する誘導則は、3項および4項で示した誘導則と同じである。ただし、2つの円弧は逆方向であるので、この場合は円弧の半径 R_3 の符号をマイナスにすることで対応できる。

6. 横・方向系オートパイロット制御則

3項～5項で求めた誘導則を基に、横・方向系のオートパイロット制御則を設計する。設計用ブロック図を図6.1に示す。

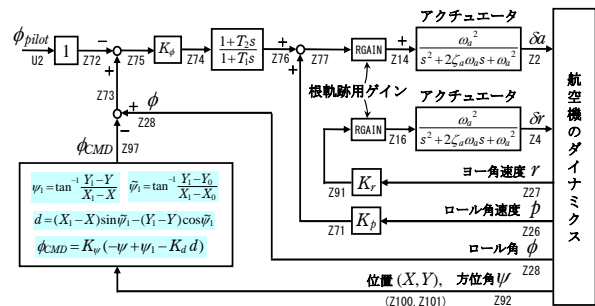


図6.1 横・方向系オートパイロット制御則

図6.1のブロック図において、誘導則に用いるロール角 ϕ や方位角 ψ はゆっくり変化する変数であるので、それらをフィードバックするとシステムの安定を悪化させる。従って、慎重にゲインを設定する必要がある。なお、誘導則に用いる偏差 d は非線形であるので、安定性解析によるゲイン設計時には省略して実施する。図6.2はZ接続法ゲイン最適化⁸⁾による解析結果である。

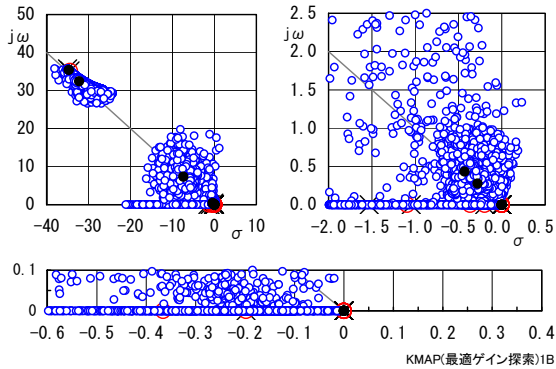


図6.2 最適ゲイン設計結果

このとき、フィードバックゲインは次のように得られる。

$$\begin{cases} K_p = 5.40, & K_\phi = 3.56, \\ T_1 = 0.1206, & T_2 = 1.254, \\ K_r = 2.57, & K_\psi = 4.36 \end{cases} \quad (6.1)$$

これらのフィードバックゲインによる横・方向制御系の ϕ / ϕ_{pilot} の極・零点配置を図6.3に示すが、非常に安定したものとなっていることがわかる。

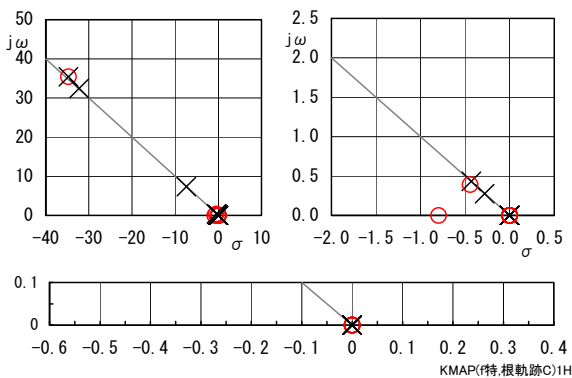


図6.3 ϕ / ϕ_{pilot} の極・零点配置

7. 直線と円弧経路による計算例

(1) 複数の直線経路の場合

4つの直線からなる経路に対するオートパイロット飛行のシミュレーション計算例を図7.1に示す。このケースは誘導則の偏差 d の項を省略して

いる。経路は、原点を P_0 として以下 P_1, P_2, P_3, P_4 はそれぞれ(15km, 0), (15km, 20km), (0, 20km), (0, -5km)によって構成される経路である。点 P_1, P_2, P_3 に到達する1km手前で次の直線経路に移行する。このとき、機体は1Gのバンク30°(最大)にて旋回するが、旋回半径は1.6kmである。図から、90°異なる新しい直線の方角に向かって飛行しているが、途中の偏差が残ったままになっていることがわかる。

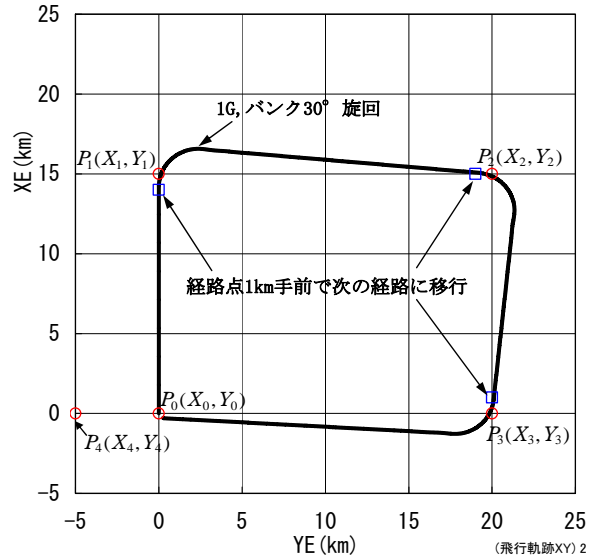


図7.1 複数の直線経路(偏差 d の項省略)

次に、図7.2は誘導則における偏差 d の項を考慮した場合の結果である。90°異なる新しい直線方角に向かってスムーズな旋回の後、直線との偏差がなくなっていることがわかる。

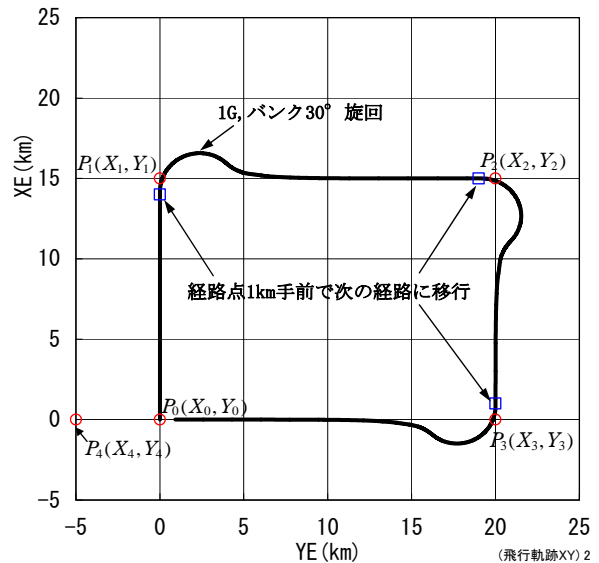


図7.2 複数の直線経路(偏差 d の項考慮)

(2) 直線と円弧の経路の場合

原点 P_0 から P_1 への直線経路は P_1 において半径 5km の円弧に接し、その後円弧上の点 P_2 にて接する直線 $P_2 P_3$ により構成される経路を考える。この経路に対するオートパイロット飛行のシミュレーション計算例を図7.3に示す。最初の直線から円弧への接続は、接点 P_1 の1km手前から実施する。図から、直線と円弧の組み合わせ経路においてスムーズな飛行が実現されていることがわかる。

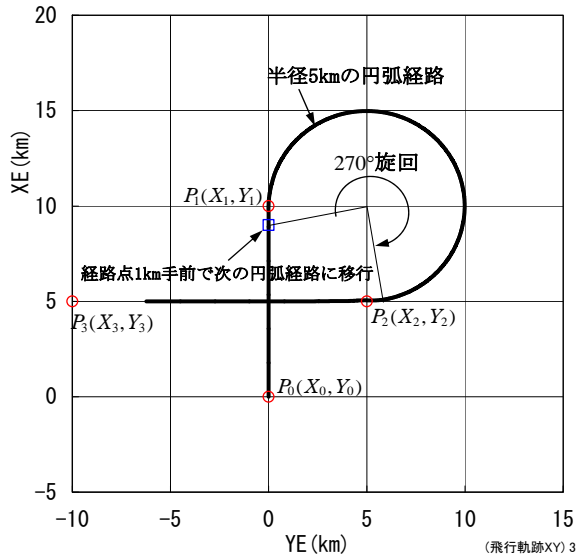


図7.3 直線と円弧の経路の場合

(3) 直線と複数の円弧経路の場合

図7.4に示すように、直線から円弧に接続した後、もう一つの円弧に接続する場合であるが、スムーズな飛行が実現されていることがわかる。

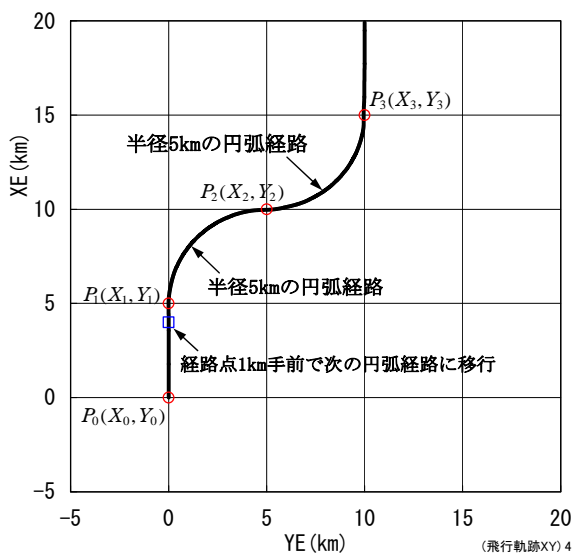


図7.4 直線と複数の円弧経路の場合

8. まとめ

従来のオートパイロットは、直線経路を想定しているため、次世代の着陸誘導システムに必要な曲線経路に対応したオートパイロットが必要となっている。こうした背景から、本論文では、直線と円弧を組み合わせた経路に対応した横・方向系のオートパイロットについて検討した。機体の位置情報が正確に得られると仮定して、次の3つのケース、(1)直線から方向が異なる直線へ移行する場合、(2)直線から円弧に接続してその後別の直線に移行する場合、(3)直線から円弧に接続してその後もう一つの円弧に接続してその後別の直線に移行する場合、についてシミュレーション計算を実施した。その結果、いずれのケースも経路に沿ってスムーズな飛行が実現できることを確認した。

参考文献

- 1) 武市 昇, 稲波大悟, 工藤正博; 環境負荷を低減する進入経路の管制適応性, 第47回飛行機シンポジウム, 2009年11月.
- 2) 工藤正博, 福島荘之介, 齊藤真二, 吉原貴之, 齋藤 亨, 松永圭左, 藤田征伍, 山康 博, 星野尾一明, 藤井直樹; GBASの実験計画について, 第48回飛行機シンポジウム, 2010年11月.
- 3) 船引浩平, 津田宏果, 盛岡日出男, 樋上一誠; 精密曲線進入の成立性に関するシミュレーション評価, 第48回飛行機シンポジウム, 2010年11月.
- 4) 福島荘之介, 齊藤真二, 森 亮太, 山康 博; フライトシミュレータによるGLSパスアライン性能の評価, 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.
- 5) 齊藤真二, 福島荘之介; GLSとILSの航法システム誤差に関する飛行実験による比較, 第52回飛行機シンポジウム, 2014年10月.
- 6) 船引浩平, 津田宏果; GBASを用いた曲線進入技術～高密度運行の実現に向けて, 日本航空宇宙学会誌, 第64巻第9号(2016年9月号), 15~19頁.
- 7) 片柳亮二: 航空機の飛行力学と制御, 森北出版, 2007.
- 8) 片柳亮二: Z接続法ゲイン最適化による飛行制御系設計, 第51回飛行機シンポジウム, 2013年11月.