



GBAS に適した衝突危険度 モデルの検討

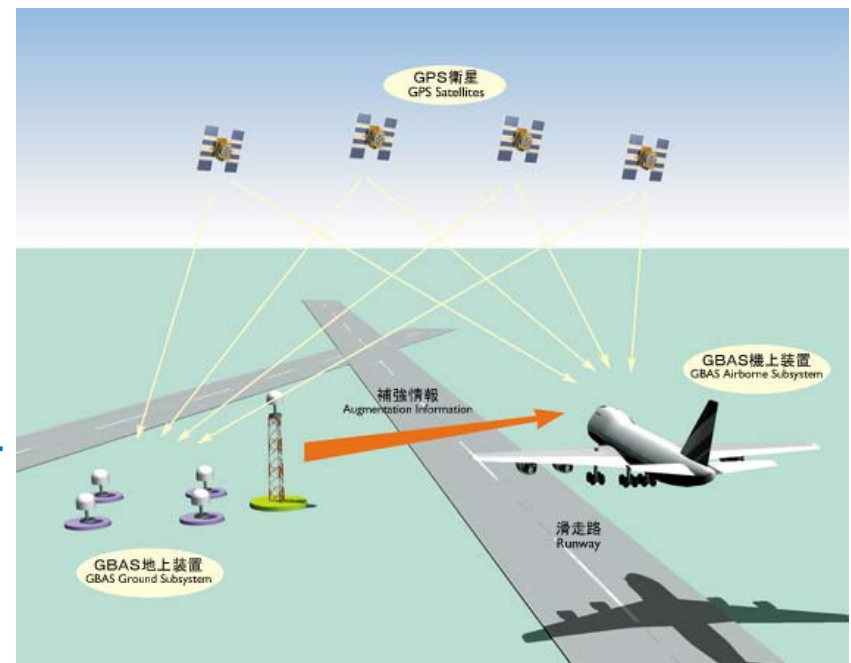
○藤田征吾，工藤正博，福島荘之介，藤井直樹，
齋藤享，齋藤真二，吉原貴之，松永圭左
独立行政法人電子航法研究所
通信・航法・監視領域

中西善信
株式会社NTTデータアイ

- 背景・目的
- 障害物間隔基準(現行)
 - ILS衝突危険度モデル(CRM; Collision Risk Model)
- GBAS CRMの構築に向けての検討状況
 - GBAS航空機偏位モデルの提案
 - GBAS航空機偏位モデルにおける誤差分布の検討
- まとめと今後について

GBASの概要

- GBASとは、GPS単独では不足している航法精度，完全性（インテグリティ），連続性（コンティニュイティ），有効性（アベイラビリティ）を向上させる地上型衛星航法補強システムである。
- GBASの特長
 - DGPSの原理
 - 基準局でGPS信号を監視
 - VHF波で補強情報を提供
 - 進入経路情報も地上から送信
 - コース形成の歪みがない
 - 柔軟な経路生成が可能

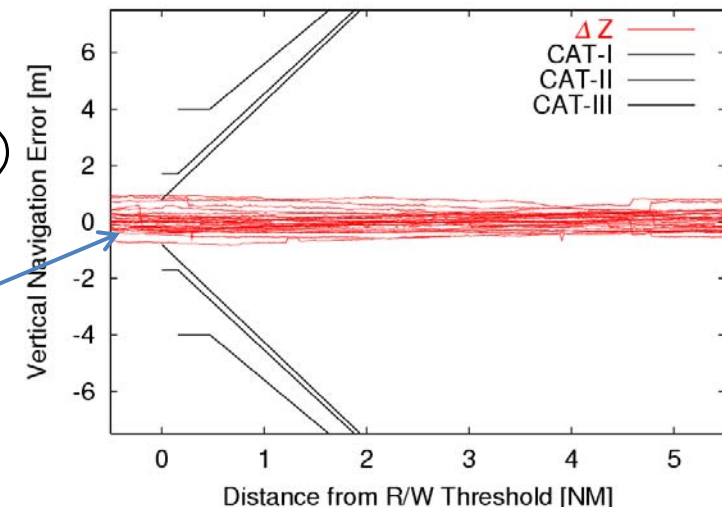


目標：衛星航法による高カテゴリ運航

- GBASは、既存のILSに比べて、高い航法精度を持つため、従来よりも高度な進入着陸が可能であると考えられる。

– ENRI飛行実験

- ENRI実験用航空機 (Beechcraft B99)
- 合計187回のアプローチ
- 垂直誤差 : 0.79m (95%確率)
- 距離依存性が非常に少ない



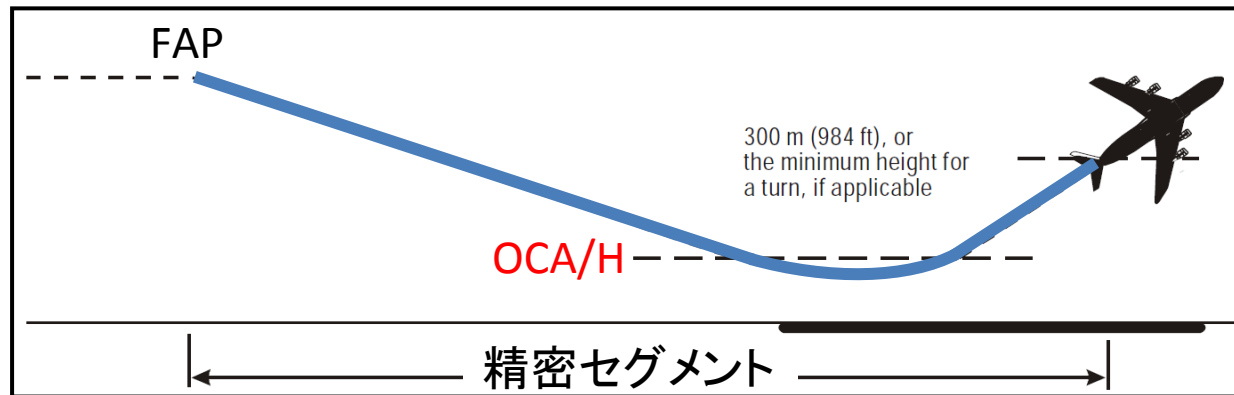
- ICAOの定める国際基準 (PANS-OPS) では、既存のILSに基づく障害物間隔基準が適用されている。
- 現在のGBAS運航方式では、GBASの特性が十分に反映されていない可能性が高い。

目的

- GBASに適した運航方式の実現
 - GBASの特性を反映した障害物間隔基準の構築
 - GBAS衝突危険度モデル(CRM)
 - ILS CRM(現行基準)との比較
 - 障害物間隔を緩和できるかどうかを評価
 - 障害物間隔の緩和により高カテゴリ運航へ

障害物間隔高度/高 (OCA/H)

- OCA/H (障害物間隔高度/高)
 - 「障害物間隔」を確保するための最低高度.
 - 進入1回あたりの障害物との衝突危険度が 1×10^{-7} 乗 ($1/10,000,000$) 以下となるように設定.
 - DA/H算出の一要素.
- DA/H (決心高度/高)
 - 必要目視物標をその到達時に視認できない場合に進入復行を開始しなければならない高度/高.



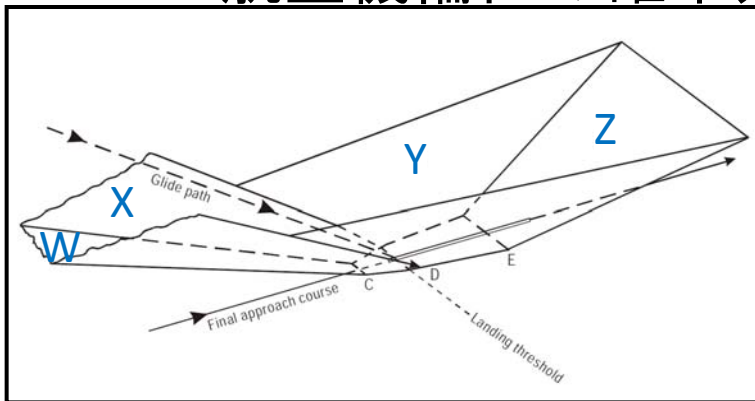
出典: PANS-OPS, Vol. II, Part II (Doc 8168-OPS/611)

OCA/Hは、精密セグメントの計器飛行における障害物間隔を保障.

OCA/Hの計算法

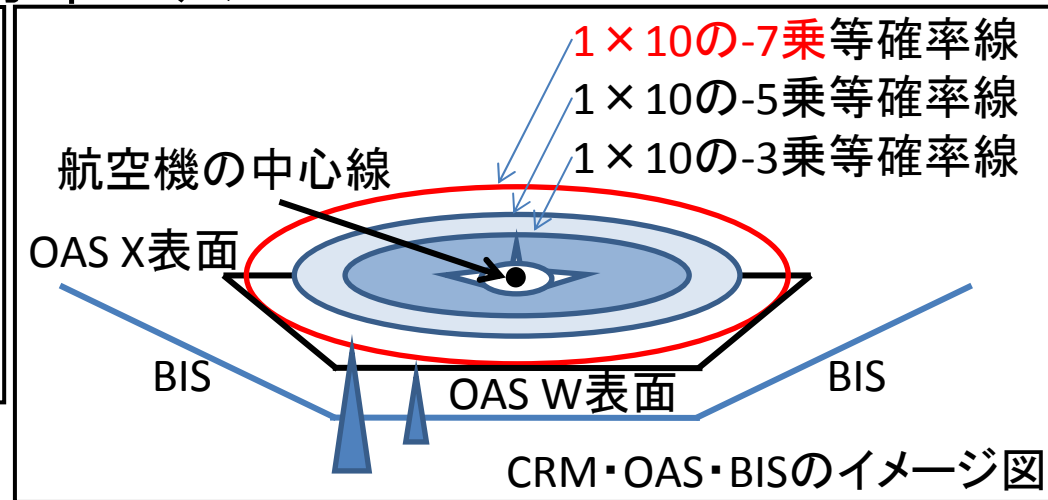
厳密

- ① ILS基本表面 (BIS; Basic ILS Surface)
 - 精密進入滑走路用制限表面を拡張した表面群.
- ② 障害物評価表面 (OAS; Obstacle Assessment Surface)
 - CRMを近似した表面群. 個別に詳細な評価が可能.
- ③ 衝突危険度モデル (CRM; Collision Risk Model)
 - 航空機偏位の確率分布モデル.



障害物評価表面図(透視図)

出典: PANS-OPS, Vol. II, Part II (Doc 8168-OPS/611)



出典: 中西善信, 飛行方式設計入門[改訂版] -進入・出発方式の世界へのいざない-, 鳳文書林出版, 2009年9月

ILS衝突危険度モデル(CRM)

- ILS CRMは, ILS進入方式の精密セグメントにおける障害物間隔評価手法の一つ[2,3].
- CRMはICAO OCP(障害物間隔パネル)で1970年代に欧米が中心となり開発[2,3].
- 航空機偏位を確率分布により表現することで, 障害物による衝突危険度を定量化し, 障害物と衝突する確率等を計算[2,3].
- GBAS CRMは準備段階(確率分布等の構築が必要)であり, 現状はILS CRMを利用(現行のPANS-OPS).

航空機偏位モデル

- ノミナル飛行パスからの鉛直方向と横方向における偏位の度合いを確率分布モデルで表現[2,3].
 - 実飛行・シミュレーション飛行データに基づき開発(欧米).
 - データ収集・入力⇒確率分布の仮定⇒データマッチング.
 - 航空機偏位は, ILS最終進入と進入復行とに分けて検討.
 - 航空機偏位に影響する誤差
 - 機器誤差(NSE; Navigation System Error)
 - ビームセンタリング誤差, ビーム感度, レシーバーセンタリング誤差, レシーバー感度, ビームベンド
 - 飛行技術誤差(FTE; Flight Technical Error)
- ILS用の航空機偏位モデル

航空機偏位モデル (ILS 進入)

$$I = I_0 + K_1 K_2 (\phi - \phi_0)$$

↓ ビームベンドを考慮

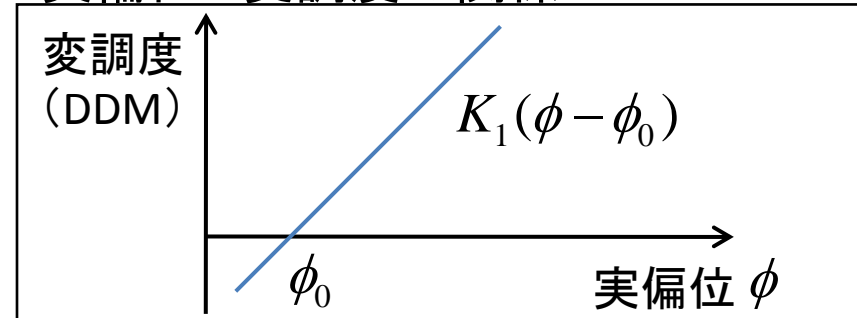
$$I = I_0 + K_1 K_2 (\phi - \phi_0) - BB$$

↓ 式変形

ILS Synthetic Model

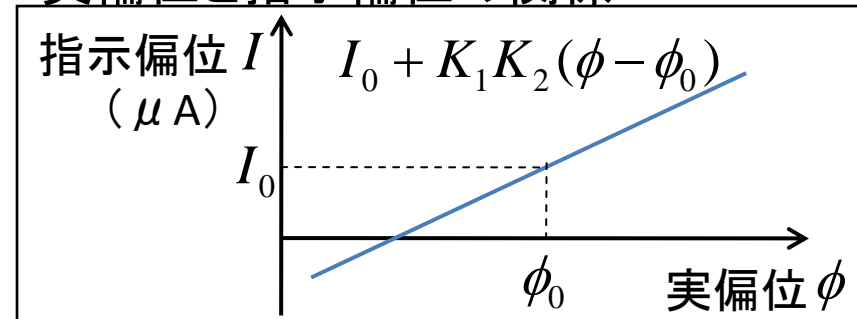
$$\phi = \frac{I - I_0 + BB}{K_1 K_2} + \phi_0$$

実偏位と変調度の関係



↓ DDMを指示偏位に変換 (K₂を掛ける)

実偏位と指示偏位の関係



ϕ_0 : ビームセンタリング誤差 (ft(LLZ) or Unit θ (GP)) K_2 : レシーバー感度 ($\mu A/DDM$)
 K_1 : ビーム感度 (DDM/ft(LLZ) or DDM/ Unit θ (GP)) BB : ビームベンド (μA)
 I_0 : レシーバーセンタリング誤差 (μA) I : 飛行技術誤差 (=指示偏位) (μA)



航空機偏位モデル (ILS 進入)

ILS Synthetic Model

$$\phi = \frac{I - I_0 + BB}{K_1 K_2} + \phi_0$$

各誤差パラメータは統計的分布で表現され、既に確立されている。

各誤差パラメータ (Cat II F/D & A/P)

	Item	Distribution Shape	Nominal Value	STD	Truncation	Units
横方向	Localizer					
	Beam Centering (ϕ_0)	normal	0	1.52	± 7.62	m
	Beam Sensitivity (K_1)	normal	14.4×10^{-4}	4.8×10^{-5}	$\pm 2.451 \times 10^{-4}$	DDM/m
	Receiver Centering (I_0)	double exp.	0	3	$\pm 9SD$	μA
	Receiver Sensitivity (K_2)	single exp.	968(max)	32.3	484	$\mu A/DDM$
	Beam Bends (BB)	normal	0	2	± 7	μA
	Beam Holding (I)	double exp.	0	from data matching	mean 75 SD 15	μA
鉛直方向	Glide Path					
	Beam Centering (ϕ_0)	normal	0	0.015	± 0.075	Unit θ
	Beam Sensitivity (K_1)	normal	0.625	0.0344	± 0.156	DDM/unit θ
	Receiver Centering (I_0)	double exp.	0	5	$\pm 9SD$	μA
	Receiver Sensitivity (K_2)	single exp.	859(max)	28.6	430	$\mu A/DDM$
	Beam Bends (BB)	normal	0	8	± 28	μA
	Beam Holding (I)	double exp.	0	from data matching	mean 75 SD 15	μA

出典: PANS-OPS, Vol. II, Part II(Doc 8168-OPS/611)

航空機偏位モデル (ILS 進入)

ILS Synthetic Model

$$\phi = \frac{I - I_0 + BB}{K_1 K_2} + \phi_0$$

各誤差パラメータは統計的分布で表現され、既に確立されている。

分布生成 (プロセス)

- ① $I_0 + BB$
- ② $I - I_0 + BB$
- ③ $K_1 \cdot K_2$
- ④ $(I - I_0 + BB) / K_1 \cdot K_2$
- ⑤ $\frac{I - I_0 + BB}{K_1 K_2} + \phi_0$

I_0 は、0 に関して対称に分布し、
 $(I_0 + BB)$ と $(-I_0 + BB)$ は同一。

$$z = x + y \quad h(z) = \int_x f(x) g(z - x) dx$$

$$z = x \cdot y \quad h(z) = \int_x f(x) g(z/|x|) \cdot 1/|x| dx$$

$$z = x/y \quad h(z) = \int_x f(x) g(z \cdot |x|) \cdot |x| dx$$



ノミナル ILS パスにおける航空機偏位の分布を生成。

GBAS CRM

- GBAS運航方式の障害物間隔基準はILSの基準を準用しており, GBAS CRMはまだ構築されていない.
- GBAS用の航空機偏位モデルが必要であり, 偏位に関与する誤差の細分化が必要.

- 機器誤差 (NSE)

- GBAS測位誤差 (距離単位): 機上側で測位演算
- 経路情報誤差 (距離単位): 地上側から機上側に送信
- 距離偏位から角度偏位への変換係数 (感度に相当)
- レシーバーセンタリング誤差

- 飛行技術誤差 (FTE)

→ GBAS用の航空機偏位モデルを構築

航空機偏位モデル(GBAS進入)

- GBAS用の航空機偏位モデル

$$I = I_0 + K(\phi - \phi_0 + \phi_{GBAS})$$

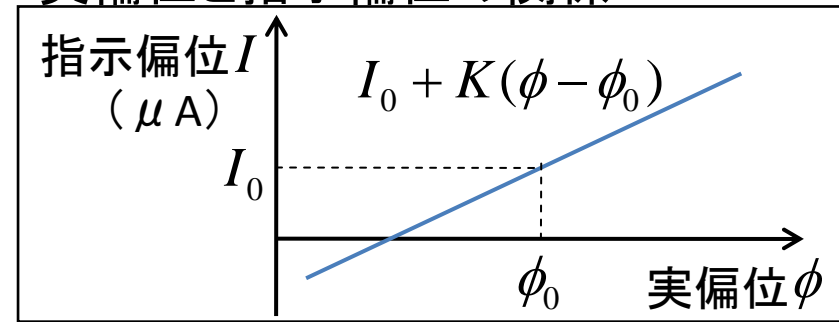


式変形

測位誤差考慮

$$\phi = \frac{I - I_0}{K} + \phi_0 - \phi_{GBAS}$$

実偏位と指示偏位の関係



- | | |
|--|----------------------------------|
| ϕ : 実偏位 (ft) | I : 飛行技術誤差 (=指示偏位) (μA) |
| ϕ_0 : 経路情報誤差 (ft)
(ILSのビームセンタリング誤差に相当) | I_0 : レシーバセンタリング誤差 (μA) |
| ϕ_{GBAS} : GBAS測位誤差 (ft)
(ILSのビームベンドに相当) | K : 変換係数 ($\mu A/ft$) |

- ILS進入の航空機偏位モデルと同様に畳み込み積分により上式の確率モデルを構築する。

– 各誤差の確率分布が必要

各誤差の確率分布の検討(1)

- 経路情報誤差

- FASデータベースエラー等のコース自体の誤差に相当し、ICAOの測量要件(垂直:0.20[m], 水平:0.40[m])から無視可能とする.

- レシーバーセンタリング誤差

- ILSとGBASにおいて, 指示器は変わらないと仮定.

- 飛行技術誤差(FTE)

- 実飛行データ, シミュレーション飛行データ等が必要だが, ILSとGBASとでFTEは変わらないと仮定.

→ ILS航空機偏位モデルと同様の確率分布を利用

各誤差の確率分布の検討(2)

- GBAS測位誤差

- 実飛行データに基づく測位解と後処理キネマティック測位解(高精度)との差
- モンテカルロシミュレーション
 - 電離圏異常, マルチパス, 衛星数変化等の様々な影響下での評価が可能.

- 距離偏位から角度偏位への変換係数

- A/D変換に伴う量子化誤差, 距離依存性に伴う測位誤差, 時間遅延に伴う航空機の進行方向の誤差の影響等があり, 実データが必要.

→ GBAS航空機偏位モデル用の確率分布を構築

まとめと今後について

- 障害物間隔基準
 - ILS衝突危険度モデル(CRM)
- GBAS CRMの構築に向けての検討状況
 - GBAS CRM構築のために, GBAS用の航空機偏位モデルの考え方を提案
 - 各誤差分布の構築についての検討
- 今後について
 - 航空機偏位モデル(確率分布モデル)の構築
 - 定量的評価
 - ILS CRMとの比較
 - 障害物間隔を緩和できるかどうかを評価

参考文献

1. PANS-OPS, Vol. II, Part II(Doc 8168-OPS/611)
2. 中西善信, 飛行方式設計入門[改訂版] -進入・出発方式の世界へのいざない-, 鳳文書林出版, 2009年9月
3. ICAO Doc 9274-AN/904, “Manual on the Use of the Collision Risk Model (CRM) for ILS operations” , Part II, “Background and Derivation of the CRM”



ご静聴ありがとうございました。