

9. A-SMGC システム経路設定機能の開発 —推奨経路生成のための空港面地上走行のモデル化—

航空交通管理領域 ※山田 泉 青山 久枝
通信・航法・監視領域 二瓶 子朗 松久保裕二 宮崎 裕己
機上等技術領域 古賀 禎

1. はじめに

空港面を航空機や車両が走行する際の安全管理は、管制官の目視による監視と無線を用いた音声通信による走行指示、パイロットや運転者の目視による危険回避によって行われている。この管理形態は、夜間や霧の発生時といった低視程の状況で地上走行の円滑性が損なわれやすい。また、交通量の増加や空港面レイアウトの複雑化に伴って管制負荷が増大する。

視程の低下、離着陸数の増加、空港面レイアウトの複雑化といった条件下で、管制負荷を軽減し、空港面運用の安全と効率を維持もしくは増進することを目的に ICAO（国際民間航空機関）で A-SMGC (Advanced Surface Movement Guidance and Control: 先進型地上走行誘導管制) システムの概念と要求性能が提唱されている^[1]。ICAO の提唱する A-SMGC システムは監視、経路設定、誘導、管制の 4 つの基本機能によって構成され、具体的には誤進入の防止、経路誘導、航空機間の間隔確保、衝突防止等を実現することを目的としている。

欧州では A-SMGC システムの導入が ATM2000+戦略の一つに位置づけられ、技術水準と運用水準によって 4 段階に分けられた研究開発と整備の計画が進行している^[2]。経路設定機能では、走行開始時刻調整等の運航スケジュール管理を行う機能と一体のものとして空港面管理システム SMAN (Surface Manager) の開発が進められ、モデル空港（シャルル・ド・ゴール、バラハス）で試験運用が行われた^[3]。

電子航法研究所では、国土交通省に対するニーズ調査等に基づき、平成 16 年度から「A-SMGC システムの研究」を実施しており、4 つの基本機能を検証する実験システムの開発を進めている^[4]。このうち、経路設定機能については、タッチパネルを用いた走行指示経路の手動入力装置の開発、東京国際空港における地上走行パターン分析等を行っている^{[5][6]}。

本稿では、航空機（管制対象）に対する推奨経路を自動的に生成・指示するアルゴリズム

の開発を目指した空港面地上走行のモデル化手法を紹介する。また、本手法を実際の空港に適用してモデル化を行い、手法の妥当性を検証した結果について報告する。

2. 経路設定機能の概要

ICAO の A-SMGC システムマニュアルでは、経路設定機能につき、空港面の移動区域全体を適用範囲とし、移動区域を走行するすべての航空機と車両の走行経路を設定する機能として仕様を定めている。また、経路設定機能を用いる場合の経路指示に関し、空港面の最適な運用条件において走行距離を最短化する機能と経路指示の妥当性を確認する手段を要求している^[1]。

本研究では、計算機により各航空機の経路計画を自動的に行って管制官に提案する推奨経路生成機能と、走行経路の指示の際に経路の妥当性（走行中の安全が確保されるか等）を確認するための地上走行シミュレーション機能の実現を目指している。これらの基盤として、空港面での実際の地上走行を計算機上に再現する空港面地上走行モデルが必要となる。

3. 空港面地上走行のモデル化

3.1 最短経路探索法

推奨経路の生成は走行距離の最短化を基本とし、最短経路探索法にダイクストラ法を用いることとした。ダイクストラ法は、図 1 に示すように、移動コスト（移動の所要時間、距離、燃料消費量等、移動に伴うコスト）を値として持つエッジ（辺）とノード（節点）の集合としてグラフ的に記述された移動区域のモデルに対し、始点ノードから任意の終点ノードへの移動コストを最小とする経路を計算する手法である。

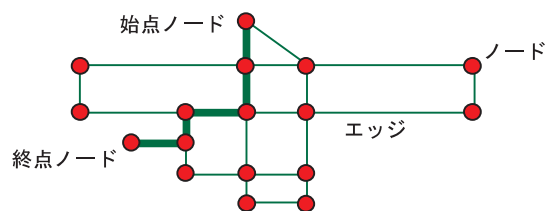


図 1: 最短経路探索のための移動経路モデル

3.2 空港面のモデル化

図2に例示するように、滑走路、誘導路、エプロン内の直進部分をエッジとし、誘導路の旋回部分や交差点、スポットをノードとして、空港面内の移動経路をマップモデル化する。各エッジの値は、当該エッジに対応する空港面の移動区間の実際の長さとした。

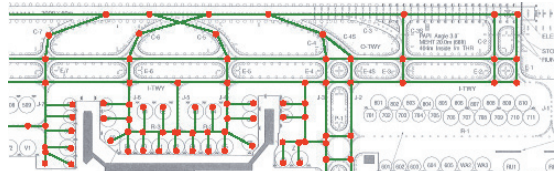


図2：エッジとノードによる空港面のモデル化例

3.3節に述べる通り、航空機モデルは運航の各フェーズに対応した一定の速度で走行するものとした。この航空機モデルを用いるためには、誘導路の旋回部を実際の航空機が減速して通過することを考慮し、マップモデル側で旋回による通過所要時間の増加を再現することによって航空機の走行時間をシミュレーションで精度よく再現することが必要となる。そこで、旋回部のノードに、通過所要時間の増加を走行速度から距離に置き換えた値を設定する。

誘導路の交差点については、旋回する場合と直進する場合で通過時間が異なることをモデルに反映させる必要がある。そこで、図3に示すように交差点を直進エッジと旋回エッジに分け、旋回時間を距離に置き換えた値を旋回エッジの値とした。

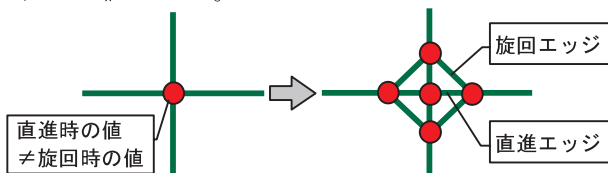


図3：交差点の詳細化

3.3 航空機のモデル化

実際の航空機の地上走行を速度の違いにより以下の3つのフェーズに分け、各フェーズを特徴づける値を定義できるようモデル化した。

- ・ プッシュバック：プッシュバック速度
- ・ エプロン、誘導路での走行：地上走行速度
- ・ 滑走路での滑走：離陸滑走時の加速度、着陸時の速度、着陸滑走時の加速度

航空機モデルは、滑走路の離陸滑走開始位置

で一旦停止するものとし、着陸時には滑走路上で通常の地上走行速度まで減速するものとした。

また、各フェーズ間に停止時間があることを考慮し、以下の停止時間を定義することとした。

- ・ プッシュバック後、地上走行を開始するまでの停止時間（牽引車切り離し時間）
- ・ 出発が連続する場合の離陸間隔

これに加え、航空機の型式、便名を航空機モデルの属性として定義できるよう設定した。

3.4 閉塞制御

複数の航空機が空港面を走行する実際の運航では、誘導路での縦列走行や交差点での行き合いの際に、航空機は衝突回避のため一時停止する。また、他機が滑走路を使用中の場合、出発機は滑走路入り口で一時停止する。複数の航空機の走行を再現するためには、これらの一時停止を再現することが必要となる。そこで、鉄道の列車運行制御における閉塞制御システムを参考としてシミュレーション手法を検討した。

列車運行制御においては、列車の衝突を回避し高密度の運行を実現する手段として、各列車の走行位置情報を元に信号機を制御する閉塞制御システムが活用されている。閉塞制御は、停車場間を複数の区間（閉塞区間）に区切り、各区間に1車両のみ在線を許すロジックを用いる。図4は、鉄道における閉塞制御の実施例を示す。

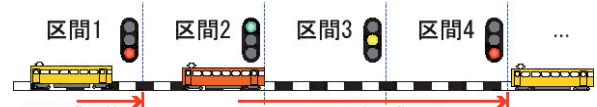


図4：鉄道における閉塞制御

本モデル化では、各エッジを閉塞区間とし、航空機モデルによって占有されているエッジが他の航空機モデルに対して一時的に使用禁止となるように設定した。これにより、航空機が通過中の箇所にも他の航空機が到達する際の一時停止を模擬することが可能となる。

また、旋回部やプッシュバック経路等、複数のエッジで構成される区間全体を閉塞する必要性を考慮し、エッジをグループ化して1閉塞区間として設定できるようにした。滑走路については、他機の離着陸による出発機の滑走路入り口待機を模擬するため、滑走路、離脱誘導路の

入り口、最終進入の飛行経路をエッジのグループ化により1個の閉塞区間とした。

実際の空港面の運用では、航空機が縦列走行する場合がある。交差点間を1個のエッジでモデル化した場合、閉塞制御により、縦列の先行側の航空機モデルが交差点間を通過中、後続側となる航空機モデルは手前の交差点で一時停止する。このため、交差点の間隔が長い場合、シミュレーションが実運航を正しく再現できない。この問題を解決するため、図5のように交差点間を複数のエッジに分割することで、実際の動きに合った航空機の縦列走行を再現することとした。ただし、エッジの長さを航空機の全長に比べ短く設定すると追突が生じるため、エッジの長さを検討する必要がある。

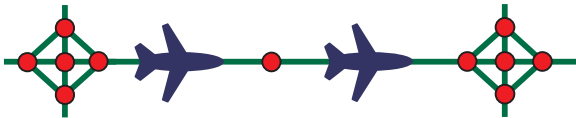


図5：交差点間の分割による縦列走行の模擬

3.5 シナリオ定義機能

1機あたりのデータを下記のとおり設定してシナリオを定義し、シミュレーションは航空機モデルを出発スポットと最終進入飛行経路上で発生させて行うこととした。

- ・ 出発機：出発スポット、プッシュバック開始時刻、牽引車切り離し時間、使用経路
- ・ 到着機：着陸時刻、使用滑走路、滑走路離脱点、使用経路、到着スポット

使用経路は、手動設定と最短経路探索による自動生成の両方を可能とした。

4. 実運航に基づく仙台空港のモデル化

4.1 モデル化の概要

モデル化手法の妥当性を検証するため、仙台空港での運航状況調査により実運航データを取得してマップモデルと航空機モデルを作成し、地上走行シミュレーションを行って実運航と比較した。各航空機の使用経路とプッシュバック開始時刻、着陸時刻を実運航と同一とするシナリオにより、以下の項目につき評価した。

- ・ 走行パターン：交通状況に応じた一時停止が再現されたか。
- ・ 走行時間：4.3節の各時刻が再現されたか。

4.2 仙台空港のマップモデル化

仙台空港で航空機が走行する箇所を調査してエッジとノードを図6のように配置し、マップモデルを定義した。プッシュバック経路につき実際の走行を反映したエッジの設定とグループ化を行い、また、離脱誘導路の区間分割を行って滑走路出入口側のエッジが滑走路使用により閉塞されるように設定した。

仙台空港は2本の滑走路、1本の平行誘導路、滑走路と平行誘導路を結ぶ6本の離脱誘導路、1つの旅客機用エプロン、小型機用の南エプロンとそれにつながる誘導路によって構成される。旅客機は滑走路09/27と平行誘導路を用いる。

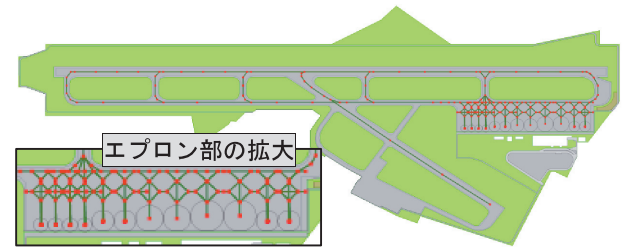


図6：仙台空港のマップモデル

4.3 運航状況調査

シミュレーションのシナリオの元となる実運航データを得るため、仙台空港で空港面の目視により2日間の運航状況調査を行い、定期便の出発機72機、到着機60機のデータを得た。

i. 出発機の調査

出発機につき、以下の項目を調査した。

- ・ 航空機の型式、便名、航空会社名
- ・ 使用スポット
- ・ プッシュバック開始時刻と終了時刻
- ・ プッシュバックの形態（通常／長距離）
- ・ 走行開始時刻
- ・ 走行経路
- ・ 離陸滑走開始点到達時刻
- ・ 離陸滑走開始時刻
- ・ 離陸時刻及び離陸位置
- ・ 地上走行中に一時停止した場合は、停止位置、停止時刻および走行再開時刻

ii. 到着機の調査

到着機につき、以下の項目を調査した。

- ・ 航空機の型式、便名、航空会社名
- ・ 着陸時刻
- ・ 滑走路離脱位置及び離脱時刻

- ・ 平行誘導路進入時刻
- ・ 走行経路
- ・ エプロン進入時刻
- ・ スポット到達時刻及び使用スポット
- ・ 地上走行中に一時停止した場合は、停止位置、停止時刻および走行再開時刻

航空機の走行中の一時停止は、訓練機等の小型機の滑走路使用のための出発機の滑走路入り口待機が主であった。そこで、一時停止の要因となった定期便以外の航空機の滑走路占有開始・終了時刻を記録した。

4.4 地上走行シミュレーション

実運航データを元に航空機モデルの発生時刻を定義してシナリオを作成し、地上走行シミュレーションを行った。なお、3.3 節で述べた速度等は以下の値を共通に用いることとした。

- ・ プッシュバック速度：7.4km/h
- ・ 走行速度：45km/h（小型旅客機は35km/h）
- ・ 離陸滑走時の加速度：2.1m/s²
- ・ 着陸滑走時の加速度：-2.4m/s²
- ・ 牽引車切り離し時間：120s

4.5 走行パターンの再現性

通過待ちの対象となる航空機が存在する場合の一時停止が実運航どおりに再現された。出発機が連続する場合に、先行出発機の滑走路使用のため後続出発機が滑走路入り口で待機する状況の再現例を図7に示す。このほか、以下の待機状況が調査時のおおりに再現された。

- ・ 到着機の着陸に引き続いて滑走路に進入した出発機が、到着機の滑走路離脱まで離陸滑走を開始せず待機する状況。
- ・ 駐機中の出発機がプッシュバックを完了するまで、当該スポットを使用予定の到着機がエプロン手前の誘導路上で待機する状況。

これらの待機は、閉塞制御を参考としたシミュレーション手法の有効性を示すものである。

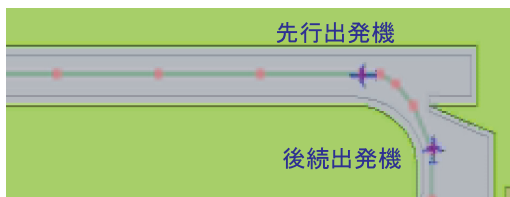


図7：エッジ配置と待機の再現例

なお、推奨経路生成の結果は実運航での経路と一致した。仙台空港は滑走路とスポットを結ぶ最短経路が一意的に決まり、実際の飛行場管制ではこの経路を用いるためと考えられる。

4.6 走行時間の再現性

調査した到着機60機について、運航の各フェーズの経過時間を実運航とシミュレーションで比較した結果を表1に示す。正の値は実運航に比べてシミュレーション上で遅れが生じていることを示す。

各フェーズの経過時間は平均数秒の差で再現できた。しかし、運航ごとのバラツキのため、総時間の差で36.6秒の標準偏差となった。

走行経路別でシミュレーションと実運航の走行時間の差の要因を分析した。各フェーズの平均時間に対するバラツキの割合が大きかった滑走路占有時間および離脱誘導路走行時間につき、滑走路離脱位置別に実運航とシミュレーションを比較した結果を表2に示す。B3誘導路に比べ手前側である滑走路12（定期便の運航では離脱誘導路として用いられる）からの離脱において、シミュレーション上では滑走路占有時間が短くなっていることが示された。

B3誘導路と滑走路12は入り口が400m程度離れているが、実際の運航では滑走路占有時間の平均が4秒しか変わらないことが運航状況調査時に観察された。これは、滑走路12での離脱時に

表1：実運航とシミュレーションの時間差（単位：秒）

| | 実運航 平均値 | 実運航との差 | |
|-------------|------------|--------|----------|
| | | 平均 | 標準 偏差 |
| 着陸滑走 | 55.6 | -4.9 | 13.1 |
| 離脱誘導路走行 | 24.7 | 1.8 | 14.3 |
| 誘導路走行（停止除く） | 122.6 | -1.9 | 28.9 |
| 誘導路走行（停止含む） | 127.0 | -0.9 | 27.5 |
| エプロン内走行 | 34.2 | 2.6 | 10.0 |
| 総時間（停止含む） | 241.5 | -1.4 | 36.6 |

表2：到着機の離脱誘導路別の走行時間差（単位：秒）

| | B3 誘導路 (21 機) | | | 滑走路 12 (28 機) | | |
|-----------|---------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|--------------------|
| | 実運航 平均値 | 実運航との差 平均 | 実運航との差 標準 偏差 | 実運航 平均値 | 実運航との差 平均 | 実運航との差 標準 偏差 |
| 滑走路 | 53.6 | -5.1 | 19.7 | 49.9 | -10.7 | 6.5 |
| 離脱 誘導路 | 20.3 | -0.8 | 12.2 | 29.4 | 2.9 | 11.9 |

B3 誘導路での離脱に比べ旋回半径の小さい旋回を要し、離脱速度が遅くなるのが要因と考えられる。本モデル化では着陸滑走時の加速度を一律の値としたが、使用離脱誘導路による速度プロファイルの違いを考慮することがモデルの性能向上に必要となる。

次に、出発機 72 機につき、運航の各フェーズの経過時間を比較した結果を表 3 に示す。

地上走行と滑走路内一時停止で実運航との差が大きくなった。滑走路内一時停止が長くなったのは、地上走行時間が実運航より短いため滑走路進入時刻が早まり、他機の滑走路使用による待機が長引いたことが主な要因である。

そこで、地上走行時間が短くなった要因を探るため、先行機の有無と位置関係、誘導路上での一時停止の有無に従って出発機の地上走行時間を比較した結果を表 4 に示す。先行機が存在しない場合にも、誘導路走行時間が実運航より短くなることが示された。

運航状況調査時には出発機の走行速度が到着機よりも遅くなる状況が観察された。このとき仙台空港は滑走路 27 方向で運用されていた。仙台空港で滑走路 27 が用いられる場合、エプロンから滑走路までの経路で直進部分が短いため、出発機は通常の地上走行速度まで加速しないことが多い。本モデルでは地上走行速度を一律としており、このような航空機の運航をモデル化していないことが、出発機における実運航とシミュレーションの走行時間差の要因のひとつと考えられる。

そこで、先行機が存在しない場合におけるシミュレーションと実運航の平均走行時間の比を元に出発機の地上走行速度を型式ごとに調整したところ 30km/h 前後となり、表 5 に示す結果が得られた。この調整を行ってもなお、一時停止がある状況では実運航に比べ走行時間が大幅に短くなることが示された。

表 3：実運航とシミュレーションの時間差（単位：秒）

| | 実運航 平均値 | 実運航との差 | |
|-----------------|------------|--------|----------|
| | | 平均 | 標準 偏差 |
| プッシュバック (64 機分) | 101.3 | -41.3 | 21.9 |
| 牽引車切り離し (64 機分) | 113.8 | 6.8 | 25.8 |
| 地上走行 (停止除く) | 181.3 | -52.6 | 53.2 |
| 地上走行 (停止含む) | 221.9 | -83.3 | 91.1 |
| 滑走路内一時停止 | 28.4 | 98.9 | 94.0 |
| 離陸滑走 | 34.6 | 2.0 | 8.5 |
| 総時間 (停止含む) | 465.1 | -13.2 | 56.9 |

運航状況調査時には、一時停止を必要とする状況の解除後、航空機が緩やかに加速して走行を再開することが観察された。本モデルでは、航空機は待機の解除と同時に通常の走行速度で走行を再開するため、このような運航を再現できない。一時停止が生じる状況で実運航とシミュレーションの走行時間の差が大きくなったのは、このことが要因と考えられる。

シミュレーションにおいて走行時間の再現性を向上するためには、空港形状や交通状況による走行速度の差異、一時停止前後の速度プロファイルを詳細にモデル化することが必要となる。

表 4：出発機の待機状況別の走行時間差（単位：秒）

| 先行機の位置 | 停止 | 機数 | 実運航 平均値 | 実運航との差 | |
|---------------|----|----|------------|--------|------|
| | | | | 平均 | 標準偏差 |
| 誘導路上 | あり | 10 | 204.0 | -88.5 | 57.3 |
| | なし | 9 | 181.9 | -20.9 | 69.6 |
| 滑走路上 又は進入中 | あり | 20 | 188.8 | -77.8 | 42.3 |
| | なし | 16 | 172.1 | -39.4 | 40.8 |
| 先行機なし | | 17 | 167.4 | -31.2 | 42.2 |

表 5：走行速度調整後の走行時間差（単位：秒）

| 先行機の位置 | 停止 | 機数 | 実運航 平均値 | 実運航との差 | |
|---------------|----|----|------------|--------|------|
| | | | | 平均 | 標準偏差 |
| 誘導路上 | あり | 10 | 204.0 | -49.3 | 76.6 |
| | なし | 9 | 181.9 | -3.3 | 45.8 |
| 滑走路上 又は進入中 | あり | 20 | 188.8 | -57.6 | 49.3 |
| | なし | 16 | 172.1 | -23.4 | 39.8 |
| 先行機なし | | 17 | 167.4 | -0.1 | 42.4 |

5. 実運航に基づく東京国際空港のモデル化

5.1 モデル化の概要

仙台空港のモデル化で見出された問題点を元に、また仙台空港と東京国際空港の違いを考慮して、現在、本研究では東京国際空港のモデル化のための手法の構築を試みている。

東京国際空港は 3 本の滑走路と多数の誘導路によって構成されており、エプロンが複数あるため、離陸滑走路手前での合流がある。このため、合流を走行パターンとして再現する必要がある。合流においては、交差点での衝突防止だけでなく、合流後の走行順も再現されることが必要となる。このためには、合流以前の走行時間を精度よく再現することが必要となる。

5.2 東京国際空港のマップモデル化

東京国際空港で航空機が実際に走行する箇所を調査し、エッジとノードを図8のように配置してマップモデルを作成した。

東京国際空港には仙台空港と異なり高速離脱誘導路が存在する。前述の基本モデルと異なり、高速離脱誘導路を用いる際は滑走路離脱後も減速を行う。このため、減速が行われる誘導路として高速離脱誘導路をモデル化し、航空機モデルは着陸後、高速離脱誘導路出口までに通常の地上走行速度まで減速するものとした。

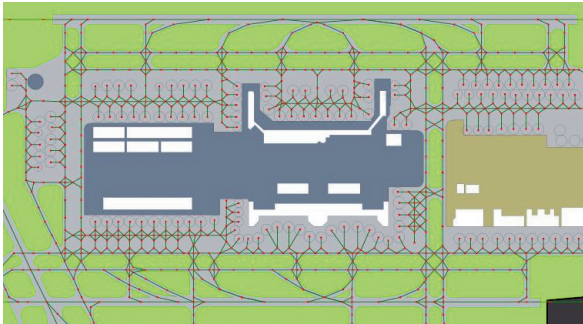


図8：東京国際空港のマップモデル

5.3 航空機モデルの改良

仙台空港のモデル化の結果を踏まえ、新たに以下の二つの値を航空機モデルの属性として加えることにより速度プロファイルの再現性向上を図ることとした。

- ・ 一時停止状況解除後の停止継続時間
- ・ 走行の開始および再開時の加速度

また、プッシュバックは機首が滑走路入り口を向くよう行うのが通常であるが、東京国際空港では出発機を効率よく走行させるためプッシュバックを逆向きに行う場合がある。これを再現するため、プッシュバック方向をシナリオに加えることとした。

5.4 運航状況調査

東京国際空港では航空局からの受託研究として当研究所がマルチラレーションの導入評価を行っている^[7]。東京国際空港のモデル化に必要な運航状況調査は、この監視ログを元に行うこととした。例として、2時間分の監視ログデータを元にエッジとノードの配置および値の調整、シナリオの作成を進めている。

6. まとめ

A-SMGC システム経路設定機能につき、推奨経路を自動的に生成・指示する機能の基盤となる空港面モデル化手法、運航状況調査に基づく実際の空港のモデル化につき紹介した。基礎手法による仙台空港のモデル化と地上走行シミュレーション評価の結果、待機を要する状況での航空機の動態につき更に詳細なモデル化が必要なが明らかとなった。この考察を元に東京国際空港モデルの開発を進めている。

今後は、東京国際空港モデルにおいても走行パターンおよび走行時間の再現性を向上するため、実運航における待機パターンおよび待機時間の分析、走行速度プロファイルの分析を行い、地上走行モデルの性能向上を目指す。

謝辞

最後に、運航状況調査を実施するにあたってご協力いただいた東京航空局仙台空港事務所、東京航空局東京空港事務所、当研究所岩沼分室の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] ICAO: A-SMGC System Manual, ICAO Doc. 9830, 1st ed., 2004.
- [2] S. Carotenuto: "State of the Art in A-SMGCs", D111_SAD_V1.0.doc, SICTA, 2005.
- [3] LEONARDO Project, "Local Implementation of the Model at Charles de Gaulle and Barajas Airport", LEONARDO 2nd workshop, 2004.
- [4] 二瓶, 宮崎他: "先進型地上走行誘導管制 (A-SMGC) 実験システムの接続試験について", 第7回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 89-96, 2007.
- [5] 松久保, 二瓶他: "A-SMGC 経路設定用インターフェイス装置について", 第8回電子航法研究所研究発表会講演概要, 2008.
- [6] 青山, 二瓶他: "A-SMGC システム経路生成機能の開発—地上走行パターンの解析について—", 第47回飛行機シンポジウム予稿集, 2G7, 2007.
- [7] 二瓶, 宮崎他: "マルチラレーション監視システムの導入調査(2)—ASDE との接続による相互補完機能について—", 第6回電子航法研究所研究発表会講演概要, pp. 105-112, 2006.