

シンガポールにおけるマルチレーン電子式道路課金システム

Multi-Lane Electronic Road Pricing System in Singapore

神戸造船所 橋本英喜^{*1} 大野秀和^{*1}
 小西雅義^{*1}
 技術本部 森下慶一^{*2} 杉本喜一^{*3}

都市内の交通渋滞緩和対策として、都市に流入する車両を規制する課金システムを採用あるいは導入検討している国や関連機関は多い。シンガポールでは無線通信によるマルチレーン対応のノンストップ道路課金システムの導入検討が実施されてきたが、当社は長年の研究成果により得た無線通信技術、画像処理技術等の要素技術とシステム化技術により、1995年に本システムを受注し、1997年の運用前実証試験を問題なくクリアした。その後、世界初のマルチレーン対応実用化システムとして、1998年9月より全面供用開始した。本システムは、現在の道路構造を変更することなく導入できる交通需要抑制対策として効果があるため、広範囲での導入が期待される。

A number of nations and organizations have adopted road pricing systems to alleviate urban traffic congestion by regulating vehicles flow into cities, or are considering doing so. The Singapore government is considering a Multilane Electronic Road Pricing System using RF communication. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., has received an order for the system from the Singapore government in 1995, and succeeded in the system preoperation tests in 1997. This system uses key RF communication and image processing technologies, with system technology accumulated over years of research. This system, the world's first, went into operation in September 1998. In line with environmental protection, large-scale system use is expected to effectively restrict traffic demand without changing current road system structures.

1. まえがき

シンガポール政府は、1975年以来、都心部の渋滞緩和のための車両の流入規制策として、都心部への乗入れの際、ステッカー方式により通行料を課金する制度を実施していた。今般、この制度を、車に積んだ車載機と道路上に設置されたガントリ（門柱）上のアンテナ間との無線通信により、複数の車線をノンストップで高速走行する車両から自動的に課金処理を行うこととしたものである。本システムでは、料金所のような障害物がなく、全く自由な走行形態（フリーフロー）でも確実に課金処理が行えることに特徴がある。しかし、その課金システムにおいては、料金所車線（シングルレーン）での料金収受システムに比べ、複数車線間での車両のダイナミックな走行（マルチレーン・フリーフロー）に伴う様々な技術課題があった。

本報では、本システムの概要とともに基本要素技術の中でも中枢となる無線通信制御技術、ナンバープレート認識技術について詳述する。

また、これらの技術を、延べ約480万台の車両を用いて通信信頼性等の性能を実際に確認した大規模な運用前実証試験の結果を紹介する。さらに、1998年9月1日より全面運用を開始した状況について述べる。

2. システムの概要

2. 1 システム構成

(1) 全体システム

課金ポイントには、図1に示すように、ガントリを設け、ガントリ上にはアンテナ、車両検知センサ、不正通行車両撮影用カメラ等が設置される（これらを総称してアウトステーションと称す）。車載機を搭載した車両が課金ポイントを通過すると車

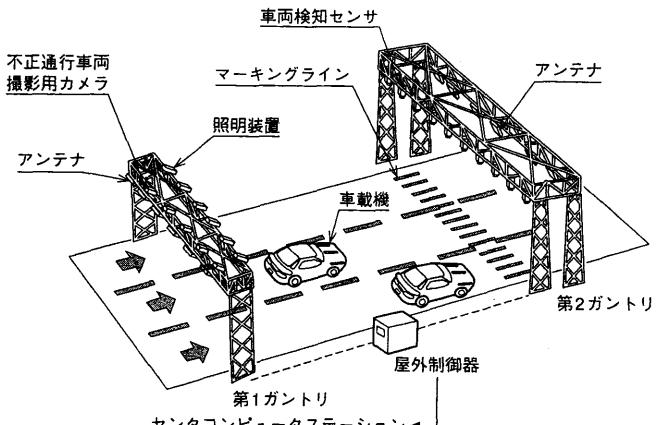


図1 マルチレーンERPシステム構成 シンガポールでのシステム構成を示す。
 System configuration of multi-lane ERP system in Singapore

載機とガントリ間で通信が行われ、課金処理が行われる。車載機なしの車両等、正常に課金処理ができない車両は、車両のナンバープレート後部が撮影される。各課金ポイントで発生した課金データと不正通行車両の画像データは陸運局に設置されたセンタコンピュータシステムに瞬時に伝送される。シンガポールでは本年9月現在、33アウトステーションと1センタコンピュータシステムが稼働中である。また、当社は、車載機を106万台供給し、シンガポール国内のすべての車両に搭載されている。なお、本システムの要求性能は、以下のとおりである。

- 料金収受可能最高速度：120 km/h
- 不正車両検知速度：180 km/h
- 課金処理誤り率：10⁻⁵以下
- 車両の分離精度：250 mm（前後・左右方向共）

*1 電子・宇宙技術部料金システム開発課

*2 高砂研究所電子技術研究室

*3 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター

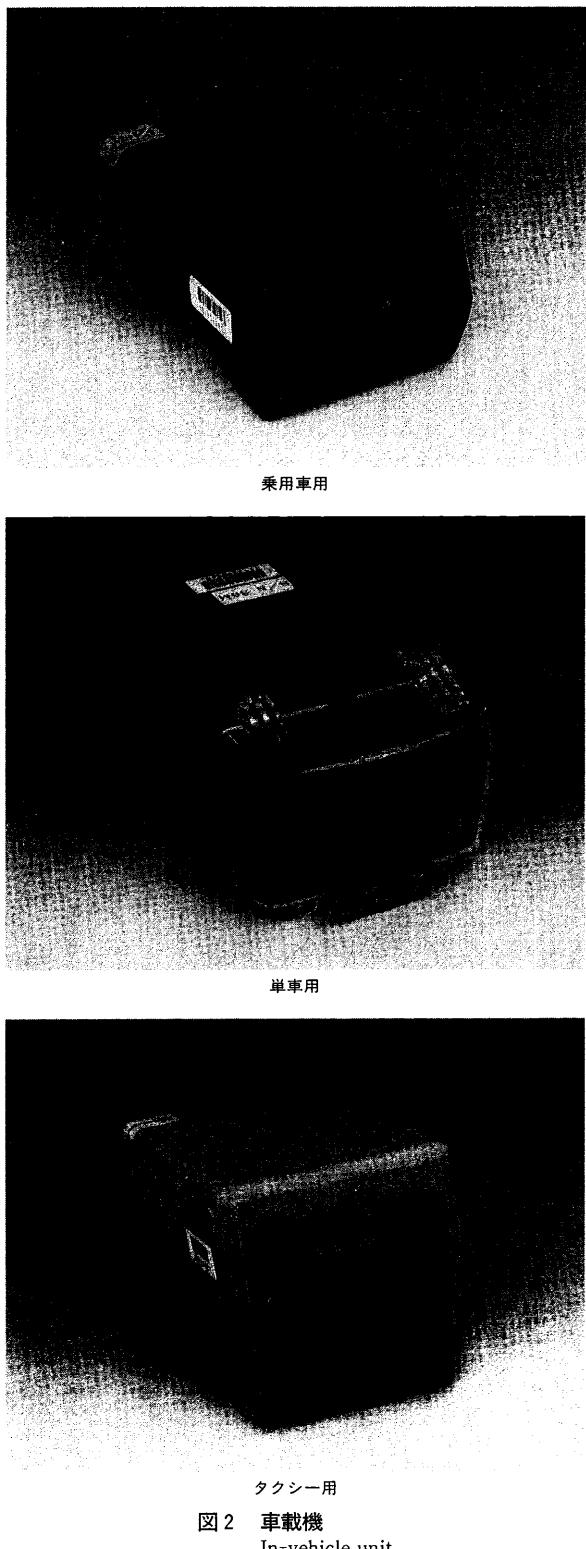


図2 車載機
In-vehicle unit

(2) 車載機

車載機は、制御部（無線伝送、データ処理）と表示部を一体化し、シンガポール銀行協会統一仕様のキャッシュカード（ICカードによる電子マネー）を挿入する2ピース型となっている。通行料金は、前払いと後払いの2方式が選択できる。前払いの場合は、ICカード内の残高より自動的に引去られ、後払いの場合は、個人の銀行口座より引去られる。

車載機は搭載される車両によって電源仕様・表示仕様などがあり、8タイプに分かれる。

そのうち、代表的な車載機の外形を図2に示す。

2.2 マルチレーンにおける課金処理

(1) 第1ガントリでの処理

車載機搭載車両が第1ガントリへ進入したとき、アンテナと車載機間の通信が自動的に行われる。その結果、通信した車両の車種及び混雑度などから課金額が決定され、車載機がICカードの残高より課金額分を引去る。

(2) 第2ガントリ進入時の処理

車両の第2ガントリのアンテナと車載機が通信したとき、通信結果から課金が正常に行われていることを確認し、不正車載機の特定を行う。

(3) 第2ガントリ通過後の処理

車両の通過を検知すると、通過車両台数と通信ログ数から車載機非搭載車両を特定する。第2ガントリを通過する車両が不正車両の場合、ナンバープレートを撮影する。

この撮像データは不正車両の通信結果とともにセンタコンピュータへ送信される。センタコンピュータでは撮像データからナンバープレート読取りを行い、通信結果との照合から不正車両の特定を行う。

3. 基本要素技術

ここでは、幾つかある基本要素技術の中で、無線通信制御技術、ナンバープレート認識技術に関し詳述する。

3.1 無線通信制御技術

携帯電話やPHS等に代表される従来の無線通信では冗長性があるため、 10^{-3} 程度のビット誤り率が通常である。

それに対し、ERP（電子式道路課金）システムでは、120 km/hの高速移動体と誤り率 10^{-5} 以下で通信するという極めて高い信頼性が要求される。

(1) 隣接アンテナとの干渉回避

ERPシステムは車線分離のない一般道路に設置され、車線をまたいで走行する車両に対しても安定した通信を実現する必要がある。したがって、道路幅方向に連続した通信領域を形成するために各アンテナの通信領域がオーバラップしており、隣接アンテナとの干渉回避の対策が必要となる。

当社では、各アンテナを時分割で切替えるTDMA（Time Division Multiple Access）方式により干渉を回避している。さらに、水平方向（道路幅方向）のアンテナ指向性を狭ビーム化して干渉特性を向上させ、3個隣のアンテナと同時放射を行うことで切替時間を短縮し、通信信頼性を向上させている。

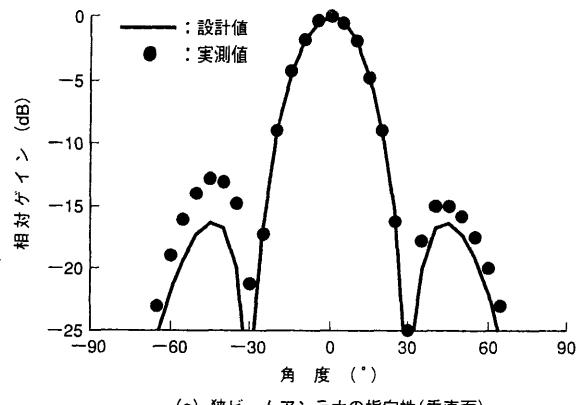
(2) 誤り制御方式⁽¹⁾

4 m程度に限定された通信領域を120 km/hで高速走行すると、通信の許容時間はわずか120 msであり、干渉回避による時分割制御のために実質的な通信時間は更に短縮される。したがって、時間負荷を増大させずに信頼性を確保する通信方式が必要となる。

当社では、無線通信と親和性が高いハーゲルバーガ符号をリアルタイムで処理する専用のハードウェアを開発し、実時間で誤り訂正をしながら4 dBの信頼性を向上させた。さらに、CRC（Cyclic Redundancy Check）で誤りが検出された場合には再送処理を行い、一層の高信頼性を実現している。

(3) 通信領域の限定⁽²⁾

車両検知センサとアンテナとの結びつきを深めて通信車両の特定精度を上げるために、通信領域の限定が極めて有効である。



(a) 狹ビームアンテナの指向性(垂直面)

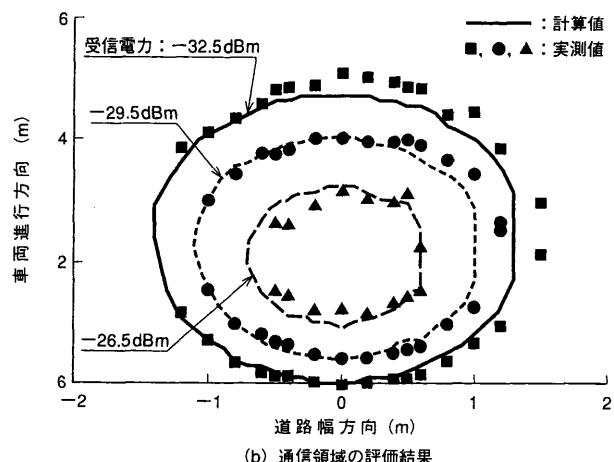


図3 シミュレーション結果 計算結果と実測結果は非常に良く一致し、狭ビーム化でねらいどおりの通信領域が形成されている。
Result of simulation

り、通信信頼性と共に無線通信に対する重要な要求事項となる。当社では、アンテナの狭ビーム化で通信領域の制限を行っており、マイクロストリップアンテナをアレイ状に配置して指向性を制御している。また、社内開発した通信領域シミュレータの計算結果をアンテナ指向性設計にフィードバックし、アンテナビーム特性を最適化している。図3にアンテナ指向性と通信領域のシミュレーション結果を示すが、計算結果と実測結果は非常に良く一致し、狭ビーム化でねらいどおりの通信領域が形成されている。

3.2 ナンバープレート認識技術

(1) ナンバープレートの特徴

シンガポール国内の車両のナンバープレートの特徴を表1に、ナンバープレートの例を図4に示す。

(2) 技術的課題

ナンバープレート認識アルゴリズムは、プレート切出し処理、文字切出し処理、文字認識処理の三つの処理から構成される。それぞれの処理における技術的課題を表2に示す。

(3) 認識アルゴリズム⁽³⁾

① プレート切出し処理

プレート切出し処理においては、プレートの幾何学的特徴を効果的に利用した文字列探索技術がポイントとなる。今回用いた手法は、局所領域における輝度変化の大きい領域を2値化し、二次元テンプレートマッチングによって、輝度変化が規則的に発生している領域をプレート候補とするものである。

表1 シンガポールのナンバープレートの特徴
Characteristics of number plate in Singapore

| 項目 | 内容 | 特徴 |
|--------------|------------|--|
| ナンバープレートの多様性 | プレート大きさ | 文字数、文字列数、車種により変動 |
| | 文字大きさ | 車種により変動 |
| | 文字数 | 3文字～8文字 |
| | 文字列数 | 1列あるいは2列 |
| | 文字フォント | 多種類 |
| | 英字/数字並び順 | 文字数、車種により変動 |
| | 色(プレート背景部) | 白、黒、黄、赤、青、緑 |
| 画像上の質の劣化 | 色(文字部) | 白、銀、黒 |
| | 物理的要因 | 文字の部分的な(特に上部の)隠れ 文字同士の連結 周辺構造物の文字への付着 文字線切れ |
| | 光学的要因 | 気象条件による変動 |
| | 走行条件 | 高速走行による文字大きさの変動 |
| | | |

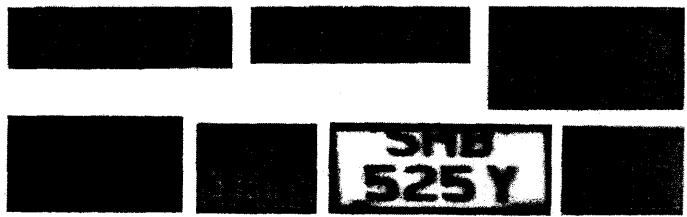


図4 ナンバープレート例
Sample of number plate

表2 ナンバープレート認識の技術的課題
Technical theme for number plate recognition system

| 処理内容 | 技術的課題 |
|-----------|---|
| プレート切出し処理 | <ul style="list-style-type: none"> ・文字数 ・文字列数 ・文字大きさ ・プレート大きさ 上記の変動に対応したプレート切出し手法の開発 |
| 文字切出し処理 | <ul style="list-style-type: none"> ・文字大きさの変動 ・多様な文字表示形式 ・文字同士の連結 ・文字線切れ 上記に対応可能な高精度文字切出し手法の開発 |
| 文字認識処理 | <ul style="list-style-type: none"> ・部分(特に上部)隠れ文字 ・周辺構造物の文字への付着 ・多種文字フォント 上記に対する文字認識手法の確立 |

② 文字切出し処理

表2に示すナンバープレートの特徴から、幾何学的特徴のみによる手法では、高精度な文字切出しを行うことは困難である。そこで、文字認識処理を行いながら、文字列の配置や文字列に関する知識等を考慮して、結果が最適になる文字切出し位置を動的計画法によって求めるという、文字切出し処理と文字認識処理を統合した新しい文字切出し手法を開発した。

③ 文字認識処理

文字認識処理においては、文字形状の様々な変動に対して、高い認識率を得られる認識特徴量と識別手法を選定する必要がある。ここでは、認識特徴量として文字の輪郭線方向を特徴量とする手法を、識別手法としては統計的識別手法を用いた。

開発した認識システムによる認識処理例を図5に示す。

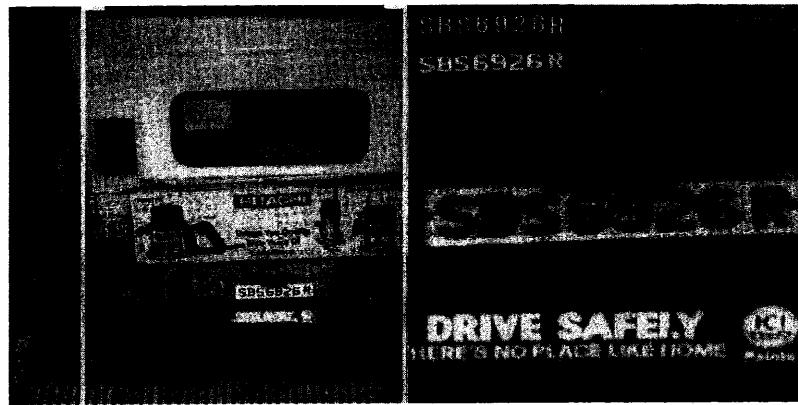


図5 認識処理例 近傍にナンバープレート以外の文字列が存在しても正しく認識できている。
Sample of recognition process

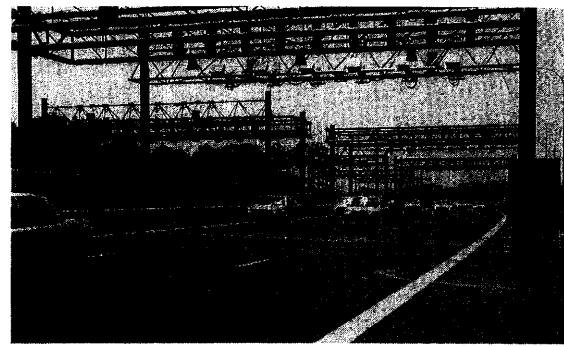


図6 運用前実証試験状況
View of System Qualification Test

4. 運用前実証試験

シンガポールにおいて、建設中の高速道路に専用のテスト場として12のガントリを設け、乗用車100台、バイク50台、バス20台、トラック30台の計200台の実車両を、1997年5月～8月にかけ連日約8時間周回（1周約600m）走行させることにより得られた延べ約480万台の車両について実施された。図6に本実証試験の状況を示す。試験の主な結果を以下に示すが、いずれも括弧内の客先の要求仕様を満足している。

- 課金処理精度：99.99999% (客先仕様：誤り率 10^{-5} 以下)
- 不正車両検知率：99%以上 (同 上：99%以上)
- 正常車両誤判定率：0.001%以下 (同 上：0.001%以下)
- ナンバープレート認識率：96% (同 上：95%以上)

5. 実運用

1998年9月1日から、世界に先駆け、都心部の規制区域で一斉運用を開始した。図7に実運用の状況を示す。本システムは、時間帯・車種などにより料金を変えるなど、きめ細かい交通流量管理が可能である特徴を有しているが、導入によりドライバの経済意識が高められた結果、規制区域への流入車両数が、一斉運用開始直後には、導入以前より20%程度減少しており、交通需要抑制効果が表れている。さらに、導入以前は時間帯によりばらついていた流入車両速度が、時間帯によらずほぼ一定した速度範囲になっていることでも、その導入効果が認められる。

6. 結び

シンガポールERPシステムは、無線通信技術、ナンバープレート認識技術等といった要素技術及びそれらを有機的に統合するシステム技術を結集して実現したものである。本システムの開発・製品化を通じて当社は、同様のERPシステムや、有料道路におけるETC（ノンストップ料金収受）システムに関して世界トップクラスの技術力を有するに至ったと考えている。

今後は、本システムの開発過程で得られた貴重な経験とノウハウを基に、よりアドバンストなERP・ETCシステムを手掛けて



図7 実運用状況
View of actual operation

いく。さらに、我が国の国家プロジェクトとして推進されているITS（高度道路交通システム）分野の開発も積極的に進めて行く予定である。ITSを通じて当社が目指すところは、交通・環境・エネルギーの各分野が抱える様々な問題を、ITS関連技術を提供することにより解決する一助となし、社会に貢献することにある。例えば、ERPの通信機能を利用しての運転者へのインフォメーションサービスの提供、シンガポールで効果が確認された交通流量抑制手段としての活用、自動車の不要な加減速の軽減（加減速時に排出される二酸化炭素などの有害物質低減）などを目的とした交通流量制御手段としての活用が考えられる。これからも今までに培った技術を更に高め、顧客のニーズにこたえていく所存である。

参考文献

- (1) 田中、デジタル通信技術、東海大学出版会（1986）p.145
- (2) 遠藤ほか、アンテナ工学、総合電子出版社（1980）p.45
- (3) 宮本ほか、交通・物流分野における文字認識技術の開発、三菱重工技報 Vol.33 No.6 (1996) p.404