

連携記事

衛星測位システムを利用した 新しい道路課金システム

Next Generation Road Pricing System Using Satellite Positioning System

三菱重工業 (株) ICTソリューション本部
制御技術部 ITS 設計課
主席技師

斎藤 信也
Shinya Saito

三菱重工機械システム (株)
ITS 事業本部 技術部
次長

早川 祥史
Yoshifumi Hayakawa

1 はじめに

自動車社会に広く普及し、物流・通勤・通学・旅行など生活のいたるところで活躍することで経済が発展する一方、増加した自動車による交通渋滞が様々な国・都市で社会問題になっている。渋滞によって引き起こされる経済損失に早くから着目したシンガポールは、自動車が普及し始めた1970年代から渋滞対策に取組み、1975年に都心制限区域に流入する自動車を対象としたALS (Area License Scheme) と呼ばれる課金制度を導入、1998年にはこれを電子式のERP (Electronic Road Pricing) に更新し、無人化・自動化を実現した。ERPは、課金する場所に建設した課金ガントリと、通過する自動車に搭載された車載器との間で無線通信を行い、料金を徴収する方式である。課金地点は現在96ヵ所、交通量に応じ課金額を動的に変えることにより、ピークアワーにおける平均時速は、市街地において20~30km/h、高速道路では60km以上が確保できており、また制限区域において8~13%の交通量減少を実現できている。しかしながら、経済発展が続くこの国では、人口増加と国土開発により新たな街や道路の建設も続いている。これにより交通の流れが影響を受け、渋滞箇所も変化するため、これらに柔軟に対応可能な次世代課金システムの調査研究が始まった。そして2012年、衛星測位システムを利用し、自動車の位置情報をもとに道路課金を行う新システムへの移行計画が発表された。位置情報による方式は、ドイツ・スイスの高速道路での導入実績はあるが、シンガポールのように林立する高層ビル・高架道路・トンネルもある都市部への導入は世界初の試みとなる。都市部においては、道路周辺に林立する構造物により衛星測位が影響を受ける課題があるため、これに対応した位置標定技術が必要になる。本稿では、次世代道路課金システムの概要について紹介し、続いて、当社が開発した次世代システムのための位置標定技術と

試作システムによる性能評価結果について紹介する。

2 次世代道路課金システムの概要

2.1 システムの特徴⁴⁾

次世代道路課金システムの動作原理は以下のとおりである。①自動車に装着した車載器が測位衛星の信号を受信する、②信号処理により正確な位置 (および走行軌跡) を算出する、③デジタル道路地図と照合し走行中の道路を特定する、④走行場所や距離に応じて料金を利用者から徴収する。地図と位置情報の照合により課金要否が決まるため、多様な課金方式に対応できることが特徴である (表1)。冒頭紹介したERPが採用した「エリア課金方式」の他に、ある地点を通過した時に課金する「ポイント課金方式」や、走行距離に応じて課金を行う「走行距離課金方式」が可能である。

2.2 システム構成¹⁾

次世代道路課金システムは、車両に搭載する「車載器」と、後方処理を担う「センターシステム」、および「不正取締りシステム」から構成される。各サブシステムは、広域通信ネットワークにより接続されており、それぞれのデータはセンターシステムにより集約される (図1)。

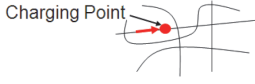
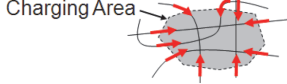
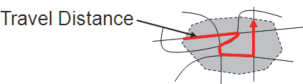
(1) 車載器

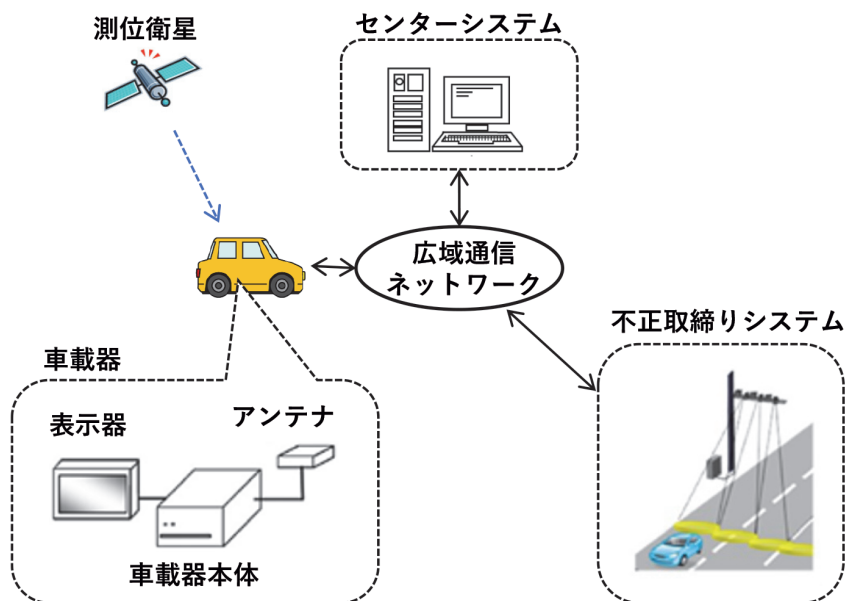
車両に搭載する機器であり、自車位置の測位、課金処理、およびドライバーに対するヒューマンインタフェースの機能を具備する。

①自車位置の測位

測位衛星から受信したGNSS (Global Navigation Satellite System) 信号から位置情報を算出し、これに内蔵された加速度センサー／ジャイロ스코プの出力を加味することにより正確な位置補正処理を行っている。

表1 道路課金の多様な方式^{1,4)}

	ポイント課金	エリア課金	走行距離課金
イメージと説明	 ある地点を通過した時に課金する方式	 設定したエリアに流入する時に課金する方式	 エリア内を走行する距離に応じて課金する方式

図1 次世代道路課金システムの構成¹⁾

② 課金処理

課金エリア内の走行距離や、課金地点通過に対して課金を行う。課金は、車載器のスロットに挿入されたスマートカードから秘匿性の高い暗号処理で料金の引き取り処理を行うことである。この結果は、後方処理のためセンターシステムに送られる。

課金に使われるスマートカードは、バスや鉄道等のシンガポール市内交通の支払いにも共通的に利用できる交通カードである。

③ ヒューマンインタフェース

車載器は、表示器と音声ガイダンスを具備しており、これらは課金ポイント通過や、課金結果をドライバーに通知するために用いられる。

(2) センターシステム

各サブシステムからの情報を集約し、各サブシステムを集中管理するためのサーバーシステムである。車載器からは課金結果や位置情報を受信し、一方で課金に必要な料金テーブルの配信などを行う。不正取締りシステムからは監視情報を

受信し、不正情報を集約する。

(3) 不正取締りシステム

ANPR (Automatic Number Plate Recognition) カメラ、および車載器との通信機能を有しており、車載器不搭載車両や料金不払い等の各種違反を自動的に検知し、違反車両の画像をナンバープレート読取結果とともにセンターシステムに送信する。不正取締りシステムは、道路上に常設されたものと、移動可能な簡易式のものの2種類がある。

3 位置標定技術の概要⁴⁾

位置情報を利用した道路課金では、誤課金や未課金を防ぐためにも正確な位置情報が必要となる。天空が開けた場所であれば、測位衛星からの信号が正常に受信できるため、衛星からの信号だけで車両位置が正確にわかる。しかし、都市中心部のように、道路周辺にある構造物により天空の見通しが悪い場合には、衛星の信号が反射・回折することで大きな誤

差が発生するため、正確な位置を算出できなくなる(図2)。

この問題に対応するために、当社が開発した位置標定方式では、測位衛星から得られた位置情報を、加速度センサー／ジャイロスコープを用いた推測航法(DR: Dead Reckoning navigation)とカルマンフィルタにより補正し、精度を向上させている。5章に走行試験による評価結果を記載した。

なお、本稿では触れていないが、地図上の道路情報を用いたマップマッチング技術を適用することにより、さらに正確な車両位置を算出することができる(図3)。

4 試作システム²⁾

4.1 概要

走行距離課金を行う場合、走行距離の計測と、その結果に基づいた課金計算が必要となる。

実現方式の1つとして、車両から送られる時々刻々の位置情報をセンターシステムに蓄積し、地図データと照合するセンター方式が一般的である。この方式では、車載器の機能がシンプルにできるが、大量の車両の位置情報がセンターシステムに集中するため、通信費とセンターシステム側の処理負荷の増大が課題となる。また、センターシステムでは走行履歴そのものが把握できるため、道路利用者のプライバシーをどう担保するかについても留意する必要がある。

もう1つは、車両側で処理を行い、課金計算の結果のみをセンターシステムに送る方式である。車載器の機能が複雑化

するため、車載器コストが増大する恐れがあるが、車両台数が増加しても通信費・処理負荷への影響が少なく、プライバシーの懸念も最小にできる。

後者の可能性を探るため、3章の位置標定技術を搭載し、走行距離・時間計測および課金計算を車両側で処理する車載器を試作し、走行試験を通して評価を行った。

4.2 試作システムの構成

試作システムは、車載器とセンターシステムから構成される(図4)。

試作車載器は、GNSS 受信機から現在の位置情報を取得しつつ、高精度の推測航法により位置補正を行い、課金ゾーンへの進入・退出検知、ゾーン内での走行距離計測、課金値の算出を行い、センターシステムに通知する。

ここで課金ゾーン(または単にゾーン)とは、課金対象となる地図上の領域を指す。

車載器の構成と基本動作は以下のとおりである。

(1) 車載器

車載器は、GNSS受信機とCPU基板、及びセンターシステムと通信するためのセルラー通信ユニットから構成されている(図4)。

i) GNSS受信機の動作

- ・測位衛星からの測位信号を受信する。
- ・ジャイロセンサーにより車両の進行方向を取得し、推測航法の入力情報として使用する。

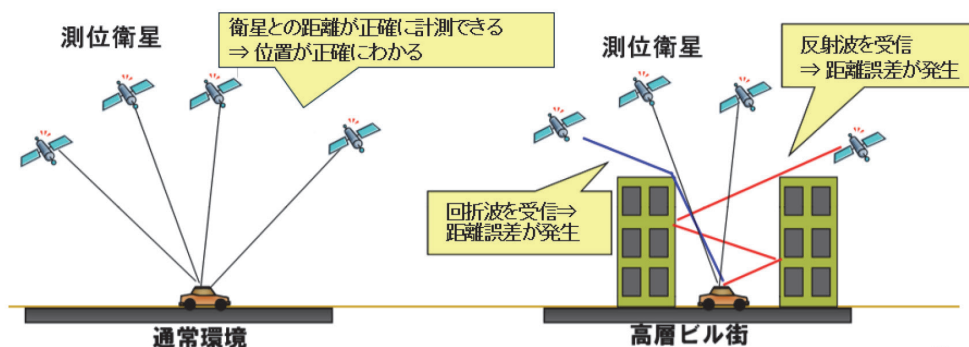


図2 ビルの谷間の道路における位置標定の課題⁴⁾

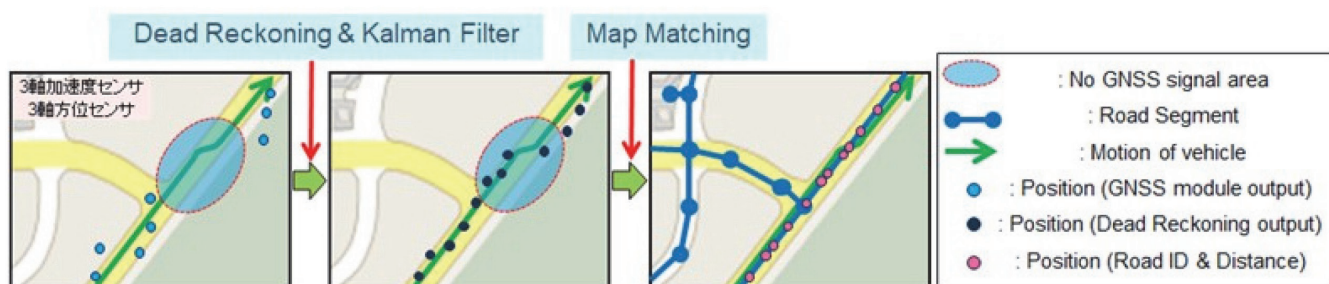


図3 位置標定精度の向上技術⁴⁾

- ・GNSSによる測位結果と、推測航法による測位結果とを重み付けし、カルマンフィルタに入力、演算結果として推測された車両位置を得る。

ii) 車載器の動作

- ・課金ゾーンが予め設定してある。
- ・GNSS受信機から得られる位置情報を1秒毎に取り出し、ゾーン境界の通過判定を行う。
- ・ゾーンへの進入を検出した場合、ゾーン退出までの走行距離の積算を行う。
- ・ゾーン退出を検知した場合、走行距離に基づいた課金額を計算する。
- ・ゾーン内での走行距離と課金額を、セルラー通信ユニットを経由してセンターシステムに通知する。

(2) センターシステム

試作システムでは課金までの全ての処理を車載器が行うため、センターシステムは必ずしも必要ではないが、走行試験

の記録・確認用として、① 車載器から走行距離、課金額を受信しデータベースに登録する、② 車両の走行軌跡を地図上に表示する、機能を持つセンターシステムを準備した。車両の走行軌跡を表示するために、車載器には5秒ごとに位置情報をセンターシステムに送信させる。

5 評価

5.1 開発した位置標定技術の評価²⁾

3章で触れた位置標定技術を試作車載器に実装し、道路課金に適用できるか、また実際に車両側で全て処理可能かを走行試験により実際に評価した。

評価試験は、シンガポールにおいて都市環境を代表する、高層ビル街、ショッピングセンターが立ち並ぶ商業地区及び、郊外の道路を選定した(図5)。

課金ゾーンは地図上の4つの点で囲われた領域として設定

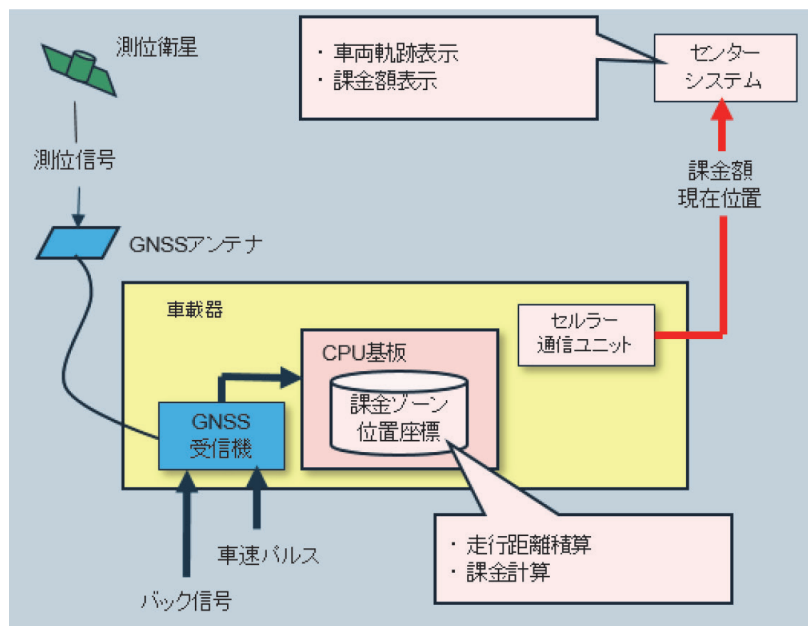


図4 試作システムの構成²⁾

	高層ビル街	商業地区	郊外の道路
風景			

図5 走行試験場所²⁾

した (図6)。図中、赤い軌跡は実際に走行を行った周回軌道である。

車載器に蓄積した走行時の位置情報の記録データから、2つの測定精度を評価した。

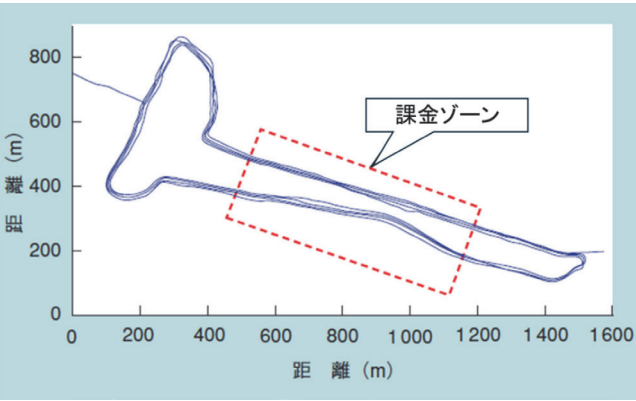


図6 課金ゾーンを含む周回走行軌跡(商業地域)²⁾

(1) ゾーン境界の検知精度

課金ゾーンを高層ビル街・商業地区・郊外の道路に設定し、設定したゾーンの境界から課金ゾーンに進入／退出を検知した位置までの距離を求め誤差がどの程度発生するかを確認した。

図7は、課金ゾーンの境界を赤点線の枠で示し、矢印の方向に走行する車両の走行軌跡を線で結び、境界を追加して最初に測位した位置を赤点の丸印で示している。

図7から求まるゾーン境界から、ゾーン検知位置までの距離の出現分布を図8に示す。いずれの場合も、ゾーン境界の検知誤差は20m以内に収まる結果が得られた。処理系の遅れが影響し、GNSS測位誤差は車両の進行方向に現れるため、課金ゾーンを設定する場合は、進行方向に20m程度の長さの緩衝ゾーンが必要になると考えられる。このデータは利用者への料金通知タイミング等を検討するための基本データとして利用することができるが、実運用に際しては、実際の課金地点における車両速度、衛星の受信状況等のパラメータを勘案する必要がある。

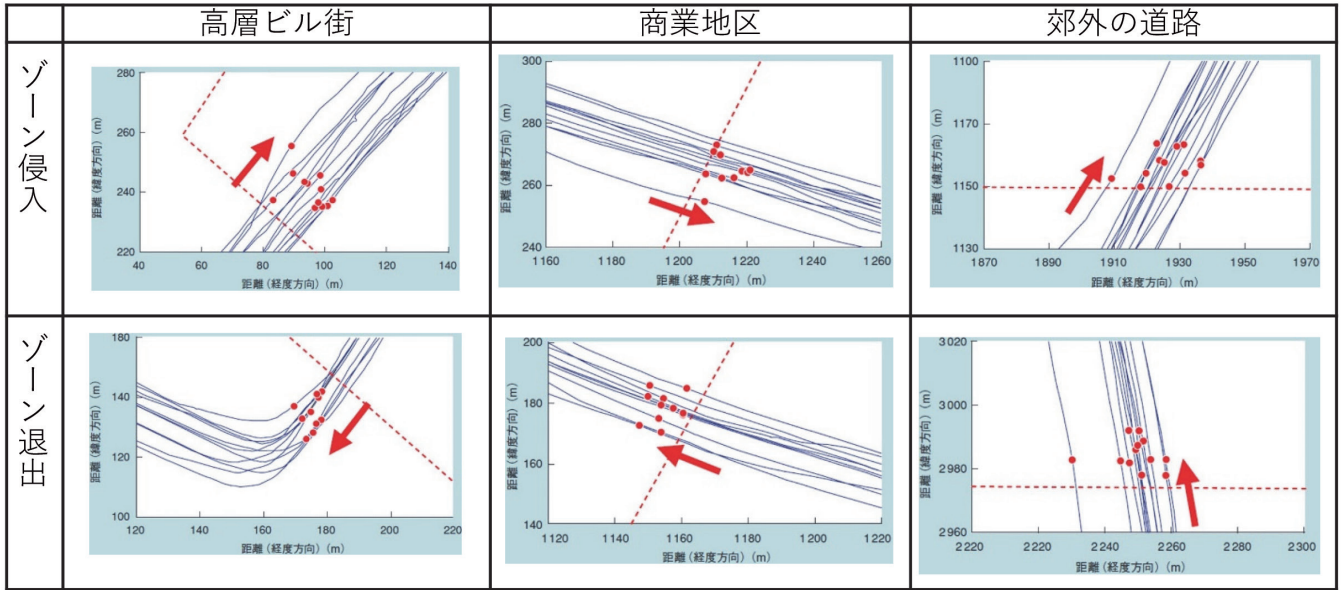


図7 課金ゾーンと境界通過後の車両標定位置²⁾

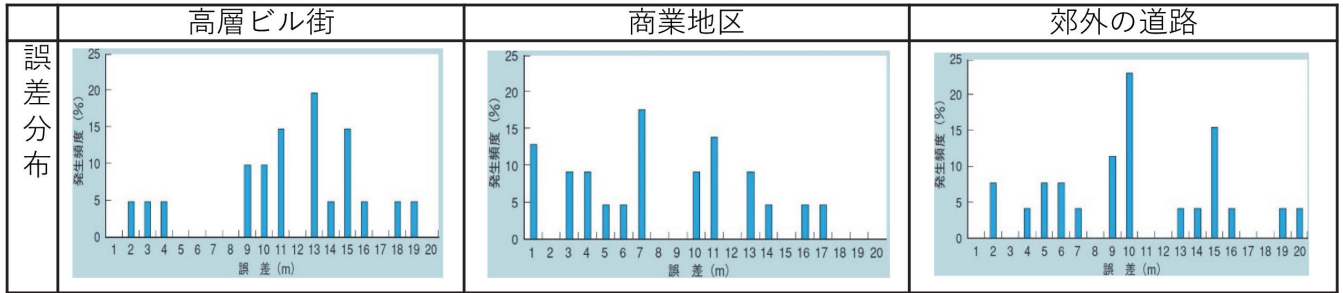


図8 課金ゾーン境界の検知誤差分布²⁾

(2) 課金ゾーン内の走行距離測定の精度

課金ゾーン内での車両が走行した距離の計測精度を表2に示す。GNSS情報の計測誤差だけでなく走行時の車線位置や車両の挙動が走行毎に変化するために発生する誤差も含まれているが、高層ビル街、商業地区、郊外とも、積算走行距離の最大誤差は2%以内に収まる結果が得られた。実際の走行した距離で課金する仕組みとして受容できる範囲であるかどうかを検討するときの材料として活用することができる。

5.2 システム性能評価³⁾

次に、システムとしての性能を評価するためシンガポールの公道を使用して2か月間のテストを実施した。様々な道路交通条件をカバーするため、表3に示す3つの地域で、車載器を搭載したテスト車両が他の一般車両に混在して走行し、走行速度・走行レーンなど実運用時と同様のリアルな走行状況で測位・課金の精度を評価した。

システム性能は、課金額が課金ポイントの近傍で通知されたかについて評価した。走行回数は約10000回、評価地点数は約50000カ所であった。発生分布グラフは、設定した課金

表2 距離計測の精度²⁾

	基準距離 (m)	最大距離誤差 (m)	最大誤差 (%)
高層ビル街	587	11	1.9
商業地区	725	9	1.2
郊外	1889	8	0.4

表3 テスト環境概要

地域	環境
郊外	- GNSS信号の受信感度良好 - 幅の広い道路、狭い道路が混在、道路が入り組んでいる
高速道路	- GNSS信号の受信感度が最も良好 - 高速運転をしている状態でも課金を正確に行う
高層ビル	- 高層ビルによりGNSS信号が反射して測位誤差が発生 - ラッシュアワーの渋滞により、車両の発信・停止が頻繁に発生

表4 実道路の走行試験の評価結果³⁾

	郊外	高速道路	高層ビル
走行結果の分布			
結果	±2.5m以内の表示が約45% - ほぼすべてのケースで±12.5m以内で表示	- 郊外一般道と同等の結果 - 高速走行時には先行して課金計算する処理も実装	- 位置精度が低下した影響が見られる。 - 課金ポイントから離れた地点で表示された割合が高い

地点と、課金額通知が車載器の表示器に現れた位置との間の距離の分布を表している。

なお、前述のとおり、誤差は車両の進行方向に現れることが分かっているため、車両速度に基づき検知タイミングを予測し車両位置を補正している。本走行試験により、ほぼすべてのケースで±12.5m以内で正確な課金額がドライバーに通知された。これは、現行のERPシステムと遜色がないレベルであり、実用に足る性能であることを確認できた(表4)。

6 まとめ

良好な測位精度が難しい都市部でも適用可能な次世代道路課金システムのための位置標定技術を開発した。試作システムにより、実交通環境にて評価を行った結果、システムとして実用に足る性能が得られていることが確認できた。また、試作システムは、課金ゾーンへの進入・退出検知、ゾーン内での走行距離計測、課金計算を車両側で全て処理するものであり、これによりセンターシステムの負荷が軽減可能で車両側の機能のみで実現できることが明らかとなった。

位置情報を利用した次世代課金システムの実現は当社にとって大きなチャレンジである。現行のERPは20年以上の運用実績があり、その安定した動作から当地の生活の一部として完全に溶け込んでいる。

次世代システムは、この信頼性やドライバーにとっての分かりやすさを維持しつつ、新たに課金設定の柔軟性やきめ細

かさを実現していくことが求められる。また世界的にも高名な高層ビル街、狭い路地が張り巡らされた市街地に対応しなければならない点も難易度を高くしている。

このような高い要求に対し、当社は早くから技術開発とフィールドでの評価に取り組み、成果を蓄積してきた。当社が現在手掛けている、シンガポール次世代道路課金システム用の車載器はその集大成となっている。今後は、道路課金以外にも、位置情報を利用することで、スクールゾーンの自動案内などの交通安全のサービスや、各国が掲げる大型貨物車向け流入規制に対して物流効率化のための経路案内を行うなど、多種多様なITSアプリケーションへの応用への検討も深めていく予定である。

参考文献

- 1) 交通事業部 制御技術部 ITS設計課：三菱重工技報, 49 (2012) 2, 21.
- 2) 大野秀和, 鈴木達, 山口泰弘, 岡本茂生, 飯塚健二：三菱重工技報, 44 (2007) 2, 16.
- 3) 日浦亮太, 山口太三, 馬淵義弘, 岡崎拓馬, 宅原雅人, 深瀬武：三菱重工技報, 50 (2013) 4, 15.
- 4) 早川祥史, 山本公之, 北嶋一欽, 小田毅：平成30年電気学会産業応用部門大会講演論文集, (2018), 4-S8-5.

(2020年11月27日受付)