

## 自動運転実証実験：位置推定精度の検証

橘川雄樹\*      加藤真平\*\*  
赤井直紀\*\*\*      竹内栄二郎\*\*\*\*      枝廣正人\*\*\*\*\*

愛知県では平成28(2016)年度、自動運転の実証実験を15市町で行った。本実証実験では、自車両の位置推定を高精度3次元地図と車載LiDARのスカンデータのNDT (Normal Distributions Transform) スキャンマッチングにより行っている。NDTスキャンマッチングを用いた位置推定は、多くの実験場所では自動運転に必要な精度、リアルタイム性を確保できたが、一部の実験場所では、環境の3次元形状の特徴の不足により、スキャンマッチングの精度の悪化、位置推定が破綻してしまうことが見られた。本稿では、15市町での自動運転実証実験を通して、自動運転車両の位置推定の評価結果を述べる。

### Field Testing of Self-Driving Vehicles: Lessons Learned on Localization

Yuki KITSUKAWA\*      Shinpei KATO\*\*  
Naoki AKAI\*\*\*      Eijiro TAKEUCHI\*\*\*\*      Masato EDAHIRO\*\*\*\*\*

We carried out the field tests of an autonomous driving system in 15 cities in Aichi prefecture during 2016. In these tests, the localization of the ego-vehicle was performed using NDT (Normal Distributions Transform) scan matching between a high-definition 3D map and the on-vehicle LiDAR scan. The results provided by this approach were precise and fast enough to autonomously control the vehicle in most of the tested locations. However, in some of these areas, localization was not successful due to the lack of features in the environment required to perform matching. In this work, we carefully describe and summarize the results of the evaluation of the NDT localization method, applied to an autonomous driving vehicle, on the previously mentioned 15 different scenarios.

#### 1. はじめに

自動運転に代表されるように、自動車・交通システムの分野でもIoTの導入が進んでいる。自動運転車には多くのセンサーが装備されており、それらから

ら収集される情報をビッグデータとして解析することによって、さらなる交通の効率化、自動運転車の安全性向上に貢献できる。例えば、自動運転車両同士が現在地を共有することにより、見通しの悪い交差点での安全運転を支援したり、交通状況から目的

\* 名古屋大学大学院情報科学研究科博士後期課程  
Graduate School of Information Science, Nagoya University

\*\* 東京大学大学院情報理工学系研究科准教授  
Associate Professor, Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*\*\* 名古屋大学未来社会創造機構特任助教  
Designated Assistant Professor, Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

\*\*\*\* 名古屋大学大学院情報学研究科准教授  
Associate Professor, Graduate School of Informatics, Nagoya University

\*\*\*\*\* 名古屋大学大学院情報学研究科教授  
Professor, Graduate School of Informatics, Nagoya University

原稿受付日 2017年7月7日

掲載決定日 2017年7月19日

地までの自動運転のルートを最適化したりといった応用が考えられる。このような応用技術は、自車両の現在地が正確に求められていることが前提であるため、車両の位置推定はステアリングやアクセル・ブレーキといった車両制御のためだけでなく、これらのような運転支援にとっても重要である。

自動運転の実用化に向けて、一般道での実証実験も国内外で進んでいる。愛知県では平成28(2016)年度、自動走行実証推進事業として、アイサンテクノロジー<sup>1)</sup>が中心となって、15市町で自動運転の実証実験を実施した。本実証実験では、自動運転プラットフォームとして、自動運转向けオープンソース・ソフトウェア「Autoware」を採用した。Autowareに実装されている自己位置推定モジュールは、高精度3次元地図と車載3次元LiDAR<sup>\*1</sup>のスカンマッチングによるものである。本稿では、一連の実証実験で得られた走行データを用いて、環境の異なる15市町での自己位置推定の精度や計算時間を検証する。

## 2. 愛知県15市町実証実験の概要

愛知県では、平成28年度、自動運転システムの技術的課題の検討、地域住民の自動運転に対するニーズの把握、社会的受容性の検証を目的として、アイサンテクノロジーを中心に、名古屋大学らと連携し、愛知県15市町で自動運転の実証実験を実施した。本実証実験の対象地域および実験実施日をTable 1に示す。

## 3. システム構成およびソフトウェア

### 3-1 実験車両およびセンサー

本実験では、ZMP製RoboCar<sup>3)</sup>を実験車両として用いた。RoboCarは、PCと車載電子制御ユニットとの間でCAN<sup>\*2</sup>通信を行うことができ、PCからステアリング角やアクセルブレーキの命令を車載電子制御ユニットに送信することで、車両を制御することが可能である。本実証実験で用いたRoboCarの車種は、トヨタエスティマおよびプリウスである。

Fig. 1は、本実証実験で用いた実験車両である。

実験車両には、周囲環境を認識するためのセンサーが搭載されている。車両のルーフには、LiDARが搭載されており、自車両の位置推定、障害物検知

Table 1 実証実験対象地域および実施日<sup>2)</sup>

実験場所	日程	区間(距離)
幸田町	2016年 6月24日	JR相見駅～永野地区ちびっこ広場 (2.3km)
一宮市	8月30日	光明寺公園内道路(1.5km)
南知多町	9月23日	日間賀島西港～日間賀島東港(1.5km)
長久手市	9月27日	モリコパーク西駐車場～めぐりん村・ ござらっせ(2.8km)
春日井市	10月5日、 6日	高齢者福祉施設どんぐりの森～サン マルシェ(3.9km)
みよし市	10月27日	細口公園～西部コミュニティ広場 (3.4km)
設楽町	11月4日	設楽町役場～養護老人ホーム宝泉寮 (3km)
岡崎市	11月9日	福祉の村～岡崎市民病院～愛知県三 河青い鳥医療療育センター(3km)
刈谷市	11月26日	刈谷ハイウェイオアシス～洲原公園 (2.3km)
豊田市	12月12日	花沢五区コミュニティセンター～JA あいちAコープ下山店(3km)
あま市	12月19日	名鉄七宝駅～あま市七宝焼アートヴィ レッジ(2km)
豊明市	2017年 1月16日	名鉄豊明駅～小所老人憩いの家 (2.9km)
犬山市	1月24日	前原団地入口～総合犬山中央病院 (2.9km)
田原市	1月31日	渥美病院～愛知県立渥美農業高等学 校(3.5km)
安城市	2月24日	安城更生病院～アピタ安城南店 (2.8km)



Fig. 1 実験車両 (ZMP製RoboCar)

等に用いられている。本実証実験で用いたVelodyne製LiDARは、縦に並んだレーザーユニットが回転することによって、周囲360度をスカン可能である。モデルによって分解能が異なり、32層のレーザーから成るHDL-32E、64層のレーザーから成るHDL-64Eなどがある。また、車両前方の障害物検知、信号認識用にカメラも搭載されている。

### 3-2 自動運転ソフトウェア「Autoware」

本実証実験では、自動運転ソフトウェアプラットフォームとして、Autoware<sup>4)、5)</sup>を用いた。AutowareはLinuxとROS(Robot Operating System)をベースとした、オープンソース自動運転ソフトウ

\* 1 Light Detection and Ranging: レーザー光を照射し、周囲の環境を計測するセンサー。

\* 2 Controller Area Network: 車載ネットワーク。

エアであり、名古屋大学および名古屋大学発ベンチャーであるティアフォーを中心に開発が進められている。Autowareには、車両の自己位置推定、3次元地図作成、障害物検知、経路計画、経路追従、信号認識といった市街地での自動運転に必要な通りの機能が実装されている。

### 3-3 高精度3次元地図

本実証実験では、自動運転システムが用いる地図データとして、アイサンテクノロジー提供の高精度3次元地図を用いた。高精度3次元地図はMobile Mapping System (MMS)<sup>3)</sup>と呼ばれる測量システムにより計測され、高精度・高密度な3次元点群と、信号や横断歩道といった一般道に存在する地物や路面表示などのベクター情報を抽出したADAS<sup>\*3</sup>マップから構成される。Autowareにおける、高精度3次元地図の使用目的は主に車両の自己位置推定である。Autowareに含まれている自己位置推定モジュールでは、高精度3次元地図と車両に搭載されたLiDARのスカンデータのスカンマッチングを行い、最も両者の3次元形状がマッチする3次元座標を求めることにより、自車位置を算出している。Fig. 2に高精度3次元地図と車載LiDARのスカンデータのスカンマッチングによる位置推定のイメージ図を示す。高精度3次元地図は、自己位置推定以外に、ADASマップの信号機情報を用いて、信号検出および色認識、道路の曲率や停止線情報を用いた経路計画、速度計画等に利用されている。

## 4. NDTスカンマッチング

本章では、3-3節で述べた3次元地図と車載LiDARのスカンデータのスカンマッチングのアルゴリズムについて述べる。Autowareでは、スカンマッチングのアルゴリズムとして、Normal Distributions Transform (NDT)<sup>6),7)</sup>を用いている。NDTスカンマッチングは、まず、地図空間を一定の大きさのボクセルに分割し、ボクセルに属するポイントの3次元座標の平均、分散を計算することにより、3次元地図を正規分布に近似する。次に、LiDARから得られる入力スカンデータの各ポイントに対して、地図データ内の対応ボクセルとの一致度を表す評価関数を最大にする座標変換をニュートン法により算出することで、地図データとスカンデータのスカンマッチングを行っている。

\* 3 Advanced Driver Assistance Systems: 先進運転支援システム。

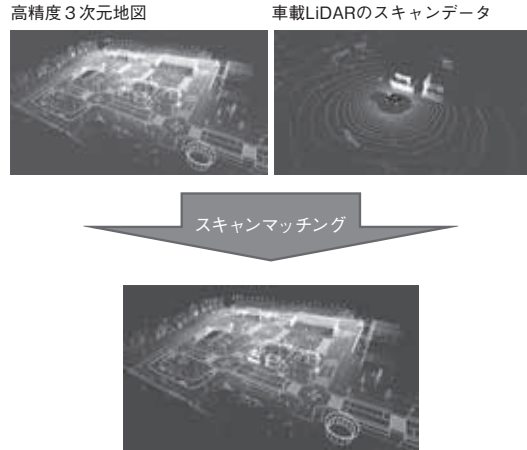


Fig. 2 高精度3次元地図と車載LiDARのスカンデータのスカンマッチングによる位置推定

NDTスカンマッチングは、地図データを正規分布から成るボクセルに変換することで、計算量を $O(N)$  ( $N$ : 入力スカンのポイント数)に抑えることが可能である。これによって、地図データの大きさに依存しない、位置推定が可能である。

また、AutowareのNDTによる位置推定では、LiDARのスカンデータの全てのポイントをマッチングに用いるのではなく、事前にボクセルグリッドフィルターを用いて、空間的に一樣になるように間引いている。ポイント数を削減することにより、計算時間を削減し、LiDARの計測周期である100ms以内にマッチング処理が完了するようにしている。ボクセルグリッドフィルターは入力点群を一樣な大きさのボクセルに分割し、ボクセル内に属する点群をそれらの重心1点に置き換えることで、入力点群をダウンサンプリングする手法である。ボクセルサイズを大きく設定することによって、点群を大きく間引くことが可能であるが、ポイント数を削減し過ぎてしまうと、マッチングに必要な特徴が少なくなり過ぎてしまい、マッチングが破綻してしまうこともあるため、環境に応じてスカンのポイントをどの程度間引くか調整することが必要である。AutowareのNDTスカンマッチングでは、デフォルトとしてボクセルサイズが2.0mのボクセルグリッドフィルターを用いている。

## 5. 実験結果

本章では、15市町での実証実験で記録されたセンサーデータのログを用いて、シミュレーション環境にてNDTスカンマッチングによる位置推定の精

度、計算時間およびTransformation Probability (以後、「TP」とする)について述べる。TPは、地図データとLiDARのスカンデータのスカンマッチングのマッチング度合いを示す指標であり、この値が大きいほど、正確にスカンマッチングされているといえる。しかし、TPはLiDARのスカンデータの各ポイントと地図データの最近傍点との距離や、スカンデータのポイント数に依存するため、正しくマッチングされている場合でも、実験場所や環境に応じて、値の分布が異なる。

Fig. 3は、各実験場所での走行開始から終了までのログデータを用いたNDTスカンマッチングによる位置推定から得られる走行軌跡、位置推定の実行時間の推移およびTPの推移である。紙面の都合上、

15カ所のうち、幸田町、一宮市、南知多町、あま市での結果を掲載している。一例として、あま市での走行では、同じ道を複数回往復しているのだが、車線レベルでの精度を保ちながら位置推定を達成していることが確認できる。計算時間のグラフは、横軸が時間軸、縦軸がスカンデータ一つのスカンマッチングに要する実行時間 (ms) である。Velodyne LiDARは、10Hzで動作するため、スカンデータの計測周期は100msである。従って、一つのスカンのマッチングが100ms以内で完了していれば、リアルタイムに位置推定ができていくといえる。あま市のデータでは、走行中、実行時間が20msから30ms程度で推移しており、Velodyne LiDARの計測周期に十分間に合っており、リアルタイムなスカン

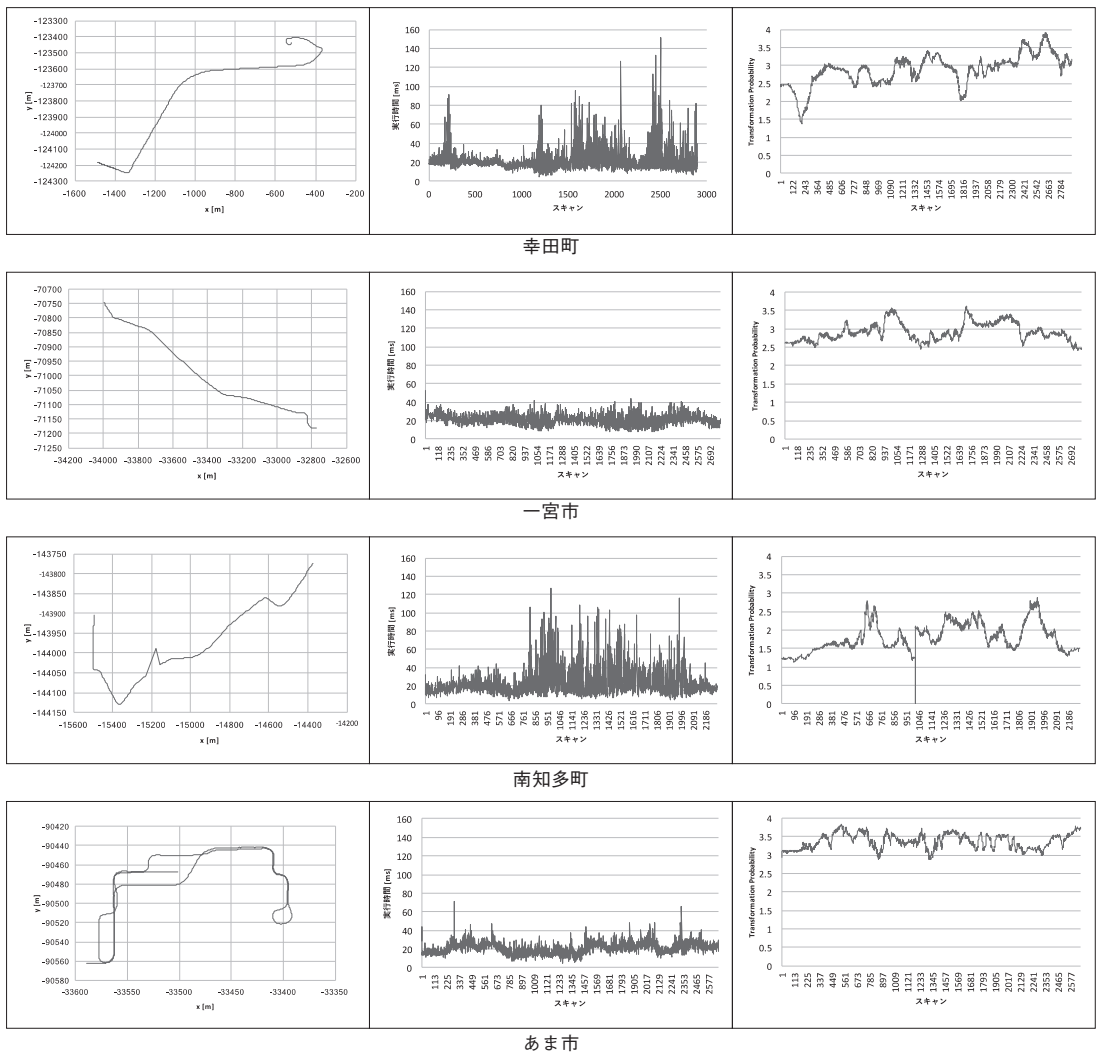


Fig. 3 各実験場所でのスカンマッチングから得られた走行軌跡、マッチングの計算時間の推移、TPの推移

ンマッチングによる位置推定がなされていることが分かる。

また、TPは、スキャンマッチングがどれだけ正確であるかの指標であり、値が大きほど地図データとスキャンデータがマッチングしている値である。あま市でのデータでは、走行の開始から終了までおおよそ2.0以上をキープしており、位置推定が安定しているといえる。

Fig. 3の一宮市およびFig. 3には掲載されていない長久手市、春日井市、みよし市、設楽町、岡崎市、刈谷市、豊田市、豊明市、犬山市、田原市、安城市についても、あま市と同様に、位置推定精度は終始安定しており、実行時間も100ms以内、TPも走行開始から終了まで急激に低下する箇所はなかった。

幸田町、南知多町については、走行の一部でスキャンマッチングが正確に行われない場面があった。スキャンマッチングが正確に行われない場所は、幸田町では水田に囲まれた場所、南知多町では道路の両側が崖の斜面と海、といったようにいずれも建造物が少なく、スキャンマッチングに用いる3次元情報が乏しい箇所であった。Fig. 4、Fig. 5はそれらの箇所の3次元地図である。

そこで、より多くのスキャンデータのポイントを用いてスキャンマッチングをするために、ボクセルグリッドフィルターのボクセルサイズを2.0mから1.0mに変更して、スキャンマッチングを試みた。その結果、南知多町ではスキャンマッチングが破綻していた箇所も破綻なくマッチングが可能であった。Fig. 6は、そのときの走行軌跡、計算時間の推移、TPの推移である。Fig. 3の南知多町の図と比較して、 $x=-15,200$ 、 $y=-14,400$  ( $t=820$ ) 周辺において、スキャンマッチングが収束せず、位置推定が破綻していたものが、Fig. 6では、位置推定が正しく継続できていることが確認できる。しかし、幸田町のデータでは、ボクセルグリッドフィルターのグリッドサイズを小さくして、マッチングに用いるポイント数を増

加させた場合でも、スキャンマッチングが収束しなくなり、位置推定が破綻してしまった。

## 6. 考察

本実証実験で、走行データを計測し、位置推定のテストを行った15カ所中13カ所は走行開始から終了までNDTスキャンマッチングによる位置推定が問題なく可能であった。また、南知多町では、デフォルトのパラメーターでは走行の途中でスキャンマッチングが収束しなくなり、位置推定が破綻してしまう部分があったが、パラメーターを調整することにより、その部分での位置推定が可能であった。しかし、幸田町では、パラメーター調整を行ったとしても、スキャンマッチングが破綻してしまった。

以上より、ある程度の建造物や地物があり、スキャンデータに3次元形状が存在すれば、NDTスキャ



Fig. 4 幸田町で位置推定が破綻してしまった箇所の3次元地図

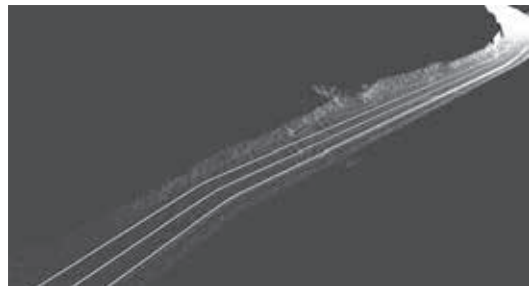


Fig. 5 南知多町で位置推定が破綻してしまった箇所の3次元地図

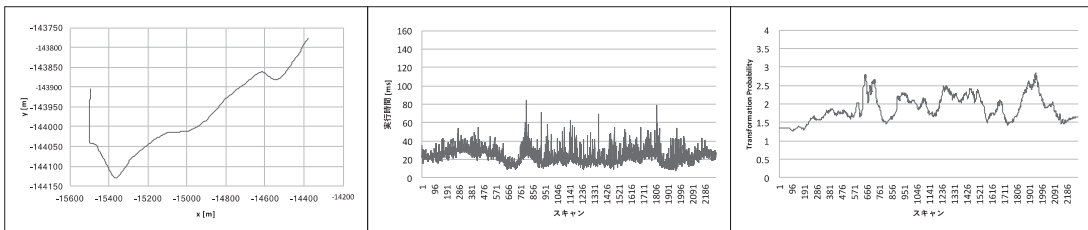


Fig. 6 南知多町において、ボクセルグリッドフィルターのボクセルサイズを1.0mに設定したときの、スキャンマッチングから得られた走行軌跡、マッチングの計算時間の推移、TPの推移

ンマッチングによる高精度な位置推定は可能であり、自動運転の位置推定手法として、活用し得る手法であると考えられる。しかし、建造物や地物が少なく開けた場所といった、3次元形状に乏しい場所であると、NDTスキャンマッチングによる位置推定が困難な場合がある。

このような場所においても、NDTスキャンマッチングによる安定的な位置推定を実現するための手法として、車載IMU<sup>\*4</sup>やオドメトリ<sup>\*5</sup>の情報を用いる手法が考えられる。LiDARの計測周期の100msでの移動分や向きの変化をIMUやオドメトリから取得することができるので、それらの情報を用いることにより、LiDAR単体でスキャンマッチングを行う場合より、安定的な位置推定が可能であると考えられる。

一般的に、GNSS<sup>\*6</sup>は建造物が多い都市部では、マルチパスといった要因により誤差を多く含む場合が多いが、3次元地図とLiDARのスキャンデータのスキャンマッチングという観点から見れば、建造物が多い都市部の方が位置推定は安定しているといえる。逆に、GNSSの誤差が少ないといわれている開けた環境の場合だと、スキャンマッチングによる位置推定が安定しにくいといえる。

今後、自動運転車両の位置推定は、車両が走行する環境に応じて、手法の切り替えや複数の位置推定手法のフュージョンといったことも必要であると考えられる。例えば、市街地であればスキャンマッチングを用い、高速道であれば3次元形状が少なく、スキャンマッチングでは十分な精度が出ないため、GNSSの情報と白線などの路面標示を用いる手法をフュージョンするといった方法が考えられる。

## 7. おわりに

本稿では、平成28年度に愛知県15市町で実施された自動運転実証実験での、自動運転車両の自己位置推定を検証した。スキャンマッチングによる自己位置推定は、多くの市街地においては自動運転システムに求められる十分な精度とリアルタイム性が得ら

れるが、一部の環境ではスキャンマッチングが収束せず、位置推定が破綻してしまう場面もあった。そのような場所では、パラメーターチューニングを行ったり、他のセンサーデータをフュージョンしたりすることによって、位置推定を精度向上させることが可能であることを紹介した。

今後、自動運転車にIoTの導入が進み、各地で計測されたセンサーデータを収集し、それらをビッグデータとして解析することによって、自動運転車の安全性向上にとどまらず、さらなる交通の効率化にも貢献できるだろう。

## 参考文献

- 1) アイサンテクノロジー  
▶<http://www.aisantec.co.jp/>
- 2) H28年度愛知県15市町自動走行実証推進事業報告サイト  
▶<https://www.aisantec-automobile.com/>
- 3) ZMP RoboCar  
▶[http://www.zmp.co.jp/products/robocar\\_top](http://www.zmp.co.jp/products/robocar_top)
- 4) Autoware 開発者サイト  
▶<https://github.com/CPFL/Autoware>
- 5) Kato, S., Takeuchi, E., Ishiguro, Y., Ninomiya, Y., Takeda, K., Hamada, T.: An Open Approach to Autonomous Vehicles, IEEE Micro, Vol. 35, No. 6, pp. 60-68, Nov.-Dec. 2015
- 6) アイサンテクノロジーモービルマッピングシステム  
▶<http://www.whatmms.com/>
- 7) Takeuchi, E., Tsubouchi, T.: 3-D scan matching using improved 3-D normal distributions transform for mobile robotic mapping, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006
- 8) Magnusson, M., Lilienthal, A., Duckett, T.: Scan registration for autonomous mining vehicles using 3D-NDT, J. Field Robotics, 24:80, 2007

\* 4 Inertial Measurement Unit:慣性計測装置。角速度および加速度を計測するセンサー

\* 5 車輪の回転量から車両の移動量を推定する手法

\* 6 Global Navigation Satellite System : 衛星測位システム