解説

実証実験「つくばチャレンジ」の背後にある取り組みの事例と完走するための自律移動技術

山本健次郎（日立製作所）　大久保剛史（つくば市）
小野幸彦（日立製作所）　原　祥尭（日立製作所）

持続可能型社会実現への取り組み

昨今，少子高齢化，地球温暖化，環境破壊，都市空洞化，自治体の破綻など，さまざまな社会課題が顕在化し深刻な問題となっている．そこで，上記課題を解決する，将来にわたり持続的に活性化可能な社会の実現を目指したさまざまな取り組みが行われている．こうした取り組みには，化石燃料を使用する数人乗りの従来型自動車への依存を減らした徒歩中心のコンパクトなまちづくりを推進する都市構造変革や，低炭素社会に向けた新しい公共設備や社会基盤の整備，少子高齢化社会に向けた新サービス構築など，さまざまな組織レベルでの事例がある．以下に，産業界における事例として，日立のロボット技術活用の取り組みを，また行政（自治体）における事例として，つくば市での取り組みを紹介する．

▶ロボット技術活用の取り組み

少子高齢化社会に向けた人の生活を支援する将来の社会サービス構築には，ロボット技術の活用が期待されている．このロボットは，従来の工場内限定の産業ロボットとは異なり，人と共存し人に直接サービスを提供する新しい種類のロボットであり，日立では「人間共生ロボット」と呼んでいる．図 -1 に，都市内でのサービス提供を目的とした人間共生ロボットの例を示す．機能によりロボットに要求される仕様が異なるため，3 つのタイプに分けて開発をしている．以下その将来像について述べる．

(1) 情報・サービスを運ぶ：案内ロボット EMIEW2 ☆1

人と能動的なインタラクションを行い，情報サービスネットワークの連携により適切なサービスを提供する．特にこのタイプのロボットには，高齢者が一人で安心して行動できるよう，案内・監視支援を行うことが望まれる．このロボットには，人の混雑環境での安全安心なサービス提供が必要なため，小型軽量化による本質安全とサービス提供に必要な運動性能を両立する技術が求められる．



図 -1　日立の人間共生ロボット
（© 日立製作所）

(2) 物を運ぶ：物流支援ロボット Lapi ☆2

現在運搬に使用している従来型自動車の進入を制限し，都市機能が密集した徒歩中心のまちづくり促進のため，都市内の各戸ごとの自動物流を実現する．特に，徒歩中心のまちで，高齢者等の交通弱者活性化のため，日常の買い物や荷物運びを支援することが望まれている．このロボットには，搬送物に応じた搬送方法の選択と，配送時間管理のための複数ロボットの群管理技術が求められる．

☆1 http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/emiew2_01.html
EMIEW : Excellent Mobility and Interactive Existence as Workmate
☆2 http://www.hitachi.co.jp/rd/research/robotics/Lapi1_01.html
Lapi : Logistics Automation Partner with Intelligence
図 -1 Lapi は工場内搬送用途に（株）日立産機システムと共同開発．

(3) 人を運ぶ：搭乗型移動支援ロボット

将来の都市内移動システムに求められる以下の課題を解決するための一案として，**図 -2** に示す次世代近距離移動システムを検討している．

- **少子化**：省人化，自動化
- **高齢化**：安全安心な弱者支援サービス
- **低環境負荷**：システムの小型電動化
- **持続性**：低コスト，変更容易化(導入・運用)
- **親和性**：オンデマンド，歩行者等との共存

ここでは，都市間の長距離の移動を鉄道などの高速公共交通機関，中距離の移動を低環境負荷型自動車で担い，徒歩中心の都市内の最寄り駅と自宅，あるいは目的地間の移動を，搭乗型移動支援ロボットで行う．資源節約および都市内の駐車スペース削減のため，ロボットはシェアリングする．利用者の希望時に自宅まで配車し，目的地で乗り捨てられるようにすることで，体力の落ちた高齢者でも容易に移動ができるようにする．さらに，配車や回送を自律走行で行うことで，運用コストを削減する．このロボットでは，搭乗者や歩行者との親和性が重要課題となる．

上記 3 タイプのロボットは，連携することで幅広いサービス提供が可能となる．いずれも人が共存する環境での自律移動技術が核であり，この技術によりロボットのための新たな環境整備が不要で，導入／運用コストが少なくできる．

以上のロボット技術を活用した都市内新サービスを導入するためには，実際の公共空間で実証実験を継続的に実施し，以下の社会的影響を検証する必要がある．

- **社会的有効性**：低炭素効果，コストメリット，高齢者活性化等の有用性，運用の持続性
- **社会的受容性**：安全性，親和性，法規制等の社会制度，住民と利用者の理解と継続利用

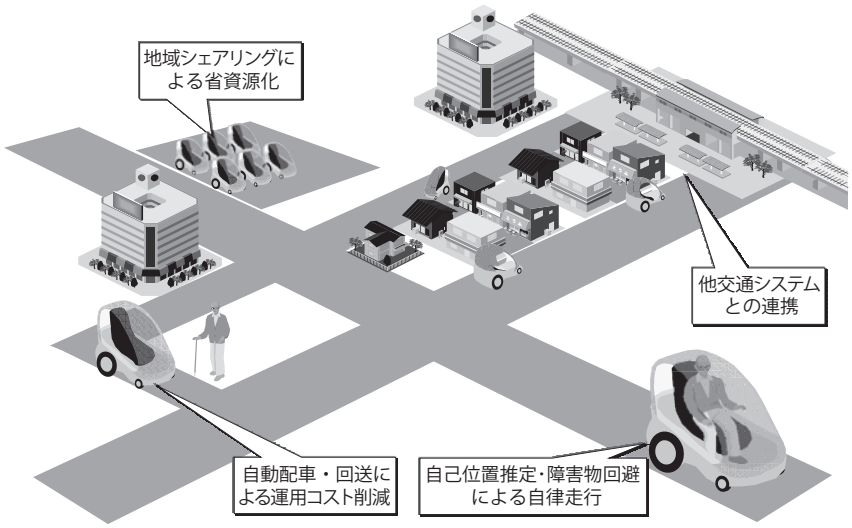


図 -2　自律移動技術を用いた次世代近距離移動システム(© 日立製作所)

このような実証実験は，茨城県つくば市のような先進的なまちづくりを主導する自治体と協力して進める必要があると考えている．

▶茨城県つくば市での取り組み

つくば市は，少子高齢社会の到来，低炭素社会の実現，安全安心なまちづくりを見据え，研究学園都市として計画的に整備された環境を活かした先端技術の社会実証実験を通し，地方型コンパクトシティなどの社会モデルを全国に発信することを目指している．特にロボット技術への期待から，ロボットが人間と共生し，生活を支え，役立つ社会の実現を目指して「ロボットの街つくば」推進プロジェクト☆3(座長：筑波大学　油田信一教授)のもと，以下を推進している．

(1) 次世代ロボット技術産業の育成支援

「チャレンジができる街」を掲げ，新たな社会システム・ビジネスモデル検証および拠点誘致の支援を行っている．この一環として，将来つくばでロボットの安全認証試験を行うことを念頭に，生活支援ロボット実用化に必要となる安全性基準の国際標準化を目指す国の事業「生活支援ロボット実用化プロジェクト☆4」の試験施設「生活支援ロボット安全検証

☆3 http://www.rt-tsukuba.jp
☆4 http://www.nedo.go.jp/activities/EP_00270.html

センター」を誘致している．ロボット事業化にとって安全は最重要課題であり，メーカの徹底した安全設計／安全管理に加え，この第三者機関による認証も必要となる．

(2) 社会実証実験の支援

「実証実験のまち」を掲げ，以下の実証実験が推進している．

• 自律ロボット公道走行実験「つくばチャレンジ」

「つくばチャレンジ☆5」は，人々が生活している空間の中で，ロボットが確実に自律的に動き回って働くための技術を追求することを目的として，2007 年より開催されている（主催：(財) ニューテクノロジー振興財団，つくば市［2010 年〜］）．公道 1km 自律移動の技術チャレンジとして 5 年間の取り組みで推進されており，今年で一区切りとなる．類似の試みとしてはロボカップ☆6 のようなロボット競技（ロボットコンテスト）や，米国 DARPA によるアーバンチャレンジ☆7（無人市街地での自律走行自動車レース）などがあるが，「つくばチャレンジ」は以下の点で他に類を見ない．

- ロボットの実用化を想定し，人が生活する実環境（公園／つくば駅周辺の歩道）で実施
- 参加する自律ロボットは，目的により姿／大きさ／運動性能／挙動が異なることと，生活している人の状況により条件が異なることから，競技ではなく，自律移動の課題達成（完走）を重視
- ロボットが市民とふれあうことにより，「ロボットの街つくば」として市民がロボットの理解を深める機会を提供

現在，ロボット公道実験は，安全運用体制，関係者との調整および警察署の道路使用許可により，実施することが可能であり，つくば市では本手続きを含めた実験支援を行っている．

• 搭乗型移動支援ロボット公道走行実証実験「モビリティロボット実験特区」

つくば市は，本年 3 月に「つくばモビリティロボット実験特区計画」の内閣総理大臣認定を受けており，現在国内唯一，モビリティロボット（人が搭乗して移動するためのロボット技術応用機器）の公道（歩道）走行実験が可能である．実施主体は「ロボット特区実証実験推進協議会☆8（会長：つくば市長）」であり，日立のほか，（独）産業技術総合研究所とセグウェイジャパン（株）が参画し，本年 6 月より実験が開始されている．日立は図 -1 の搭乗型移動支援ロボットを用いて実験を行うが，ここでは前述のように，低炭素新交通システム（自動車の代替としての新たな近距離移動手段）や高齢者等の交通弱者を支援するモビリティの社会有用性と社会受容性の実証実験を行う．今後，実証実験の成果（データ）を基に，企業，自治体，官庁，市民，研究機関など多角的観点から将来の社会システムや新しいロボットサービス産業の実現性について協議を進める予定である．

「つくばチャレンジ」の自律移動技術

「つくばチャレンジ」は，前述のように，ロボット技術を活用した新しい社会システム実現を視野に，人が生活する空間での自律ロボット公道走行実験の機会として提供されている．したがって，その特徴は，人混在かつロボットのために整備されていない屋外歩道での自律移動である．以下にその概要と技術について紹介する．

▶「つくばチャレンジ 2010☆9」の概要

コースを**図 -3** に示す．「つくばエキスポセンター」から「つくばサイエンスインフォメーションセンター」の中までの 1.1km 強のコースである．その概要（一例）を以下に紹介する．

(1) 走行環境

- 木に囲まれた「つくば中央公園」の歩道
- 柵／ガードレール／ポールが境界の車道脇歩道
- 通過区間が制限される車止め間の狭い空間
- 人や自転車の往来が多い遊歩道
- 建物が隣接する「つくばセンター広場」

☆5 http://www.ntf.or.jp/challenge/
☆6 http://www.robocup.or.jp/
☆7 http://archive.darpa.mil/grandchallenge/
☆8 http://www.rt-tsukuba.jp/council/
☆9 http://www.ntf.or.jp/challenge/challenge10/

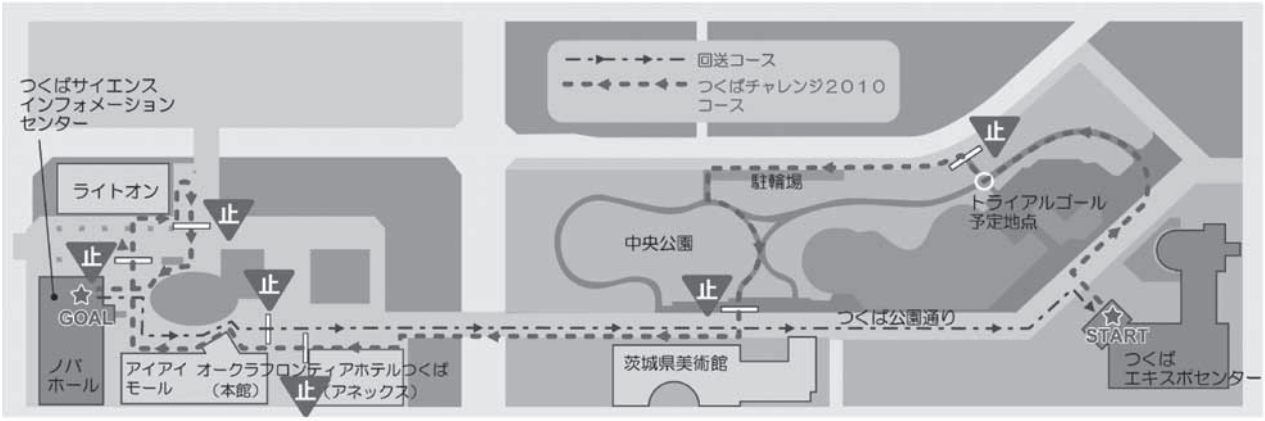


図 -3 「つくばチャレンジ 2010」のコース（© ニューテクノロジー振興財団）

- 「つくばサイエンスインフォメーションセンター」の自動ドア通過と屋内

(2) ルール

- 通路が交差する地点では白線直前で一時停止
- 歩道では左側通行
- 歩行者／自転車／ロボット等の邪魔／接触をしない
- 環境に手を加えない
  （落ち葉／雑草／石／虫の除去，マーク等の設置）

(3) ロボットの要求仕様（人との親和性より）

- 長さ 1.2m 以下，横幅 0.75m 以下，高さ 0.6 ～ 1.5m
- 重量 100kg 以下
- 最高速度 4km/h 以下

(4) 実験日程

8 日間の実験走行（雨天も実施）があり，240m のトライアル完走チームがファイナル走行（上記コース）に参加することができる．

▶自律移動技術（人混在屋外環境対応）

以下に自律移動の処理概要と技術例を紹介する．

【自律移動の処理概要】

自律移動の以下の 4 つの主要機能につき，人の行動を例に必要機能を説明し，次にその技術概要を述べる．

(1) 自律移動の機能（人の場合）

①地図生成（事前準備）

人が初めての場所に行く場合，まずすでに第三者が作成した地図を入手する．この地図には，出発地から目的地までの道や交差点の情報以外に，自分の位置（自己位置）を確認するため，「ガソリンスタンド」や「信号」等の目印（ランドマーク）が記載されている必要がある．

②経路計画（事前準備）

地図に記載されている情報に基づき，道順（経路）を決定する．詳細は以下．

- 住所等をもとに出発地と目的地を確認
- 出発地から目的地までの道の候補を選定
- 距離，道の広さ，ランドマーク，分岐点の数などから，迷わずに早く行ける経路を総合的に判断
- 決定した経路シーケンス（100m ほど行ったところの 2 つめの角を曲がるなど）を再確認．

③自己位置推定（現地移動）

- 地図と現地環境を比較し，現在位置／方向を確認
- 経路である実際の道を認識し，通行帯（歩道，車道左側等）を決定
- 経路から逸脱しないように，経路シーケンスに従い，距離やランドマークを把握
- 上記を繰り返し経路シーケンスに従い目的地まで移動

④障害物回避／局所的経路計画（現地移動）

- 路面／歩行者／自転車／設置物／交差点などの環境を認識し，経路や通行帯から逸脱せずに危険を回避する軌道（方向／速度の時系列情報）を生成

(2) 自律移動の技術概要

以下，上記機能をロボットに実装する際の技術概要を述べる．

①地図生成

「つくばチャレンジ」では，実験走行の期間中に地図のデータベースを作成する．地図は経路計画と自己位置推定のために使用され，ここでは区別のためにそれぞれ経路地図，ランドマーク地図と呼ぶ．一般に経路地図には，交差点等のノードの座標とその接続関係，ノード間の道路情報が記述される．ロボットは通行帯等を認識することが難しいため，規制／制約等を道路情報として記述する．この地図は，交差点等の関係性を表現することから，トポロジカル（位相幾何学的表現）地図と呼ばれ，自動車のナビゲーションシステムに用いられている．屋外環境で用いられるランドマーク地図は，ロボット固有の自己位置推定手法に対応した独自仕様のものが多い．自己位置推定手法には，画像を利用する手法，建物／木などの形状を利用する手法，特徴的な地点を離散的に使用する手法，環境全体を連続的に使用する手法などさまざまなものが考えられる．これらは環境に依存して一長一短であり，自己位置推定手法／地図表現／地図精度（分解能）は実際に使用する環境に応じて選択，または複数の手法を併用する必要がある．「つくばチャレンジ」のような木に囲まれた環境では，形状を利用する手法が多く利用されている．環境の形状を利用する場合は，走行環境全体の高精度な形状地図を作成する必要があり，メトリック（定量幾何学的表現）地図と呼ばれる．このとき測距センサを用い，移動しながら計測したロボット中心の相対的な距離データを地図座標に変換し，高精度に繋ぎ合わせる技術が必要となる．自己位置推定と地図生成を同時に行う技術（SLAM : Simultaneous Localization and Mapping）が利用できる．また，形状地図を利用する場合は，季節や都市開発の状況により，地図を変更／更新する技術が必要となる．「つくばチャレンジ」でも，実験走行の夏（葉が生い茂った状態）とファイナル走行の秋（葉が散った状態）では，異なる地図を用いる方が良い．

②経路計画

一般に経路計画では，出発地と目的地が与えられたときに，経路地図上のノード間の道路に対し，距離や通行帯の幅等のコストを定義し，選択した経路のコストの総和が最小となる，最小コスト経路探索を行う．ただし「つくばチャレンジ」は，あらかじめ指定された単一経路のみで，経路探索は必要なく，経路地図は，分岐のない単純なもので良い．

③自己位置推定

前述のようにさまざまな手法が考えられるが，「つくばチャレンジ」で多く用いられる，地図と現在の計測情報とのマッチングにより地図上の位置を推定する手法はスキャンマッチングと呼ばれる．このとき，現在のロボット周囲の計測情報を局所的地図（ローカルマップ）とし，この局所的地図を大局的な地図（グローバルマップ）とマッチングする意味ではマップマッチングと呼ぶ．マッチング処理（勾配法やサンプリング法などさまざま）は，間欠的に行われ，誤差は環境に依存する．

また，車輪の回転量およびジャイロセンサを応用した慣性姿勢計測装置の姿勢変化量を積算した移動量（オドメトリ）からも自己位置が推定でき，デッドレコニング（相対的自己位置推定）と呼ばれる．この方法では自己位置は連続的に算出できるが積算誤差があることから，マッチング手法と補完的に用いられる．さらに，自己位置を計測する装置としては衛星からの電波を利用した GPS（Global Positioning System）がある．電波状況が良ければ環境に依存せずに地球座標での自己位置が得られる利点はあるが，「つくばチャレンジ」では屋内や木に囲まれた電波の届かない環境，建物近くの電波が反射する環境（マルチパスの発生）があり，全領域では利用できない．完走するためには，人の生活する屋外環境でロバスト性の高い自己位置推定技術が要求され，上記手法を組み合わせた技術が必要となる．

④障害物回避／局所的経路計画

「つくばチャレンジ」では，路面の段差，歩行者／自転車等の移動障害物，通行幅の狭い個所が存在するので，この環境を安全かつ確実に走破する技術が求められる．そのため，測距センサ，ステレオカメラ等の画像センサ，ミリ波レーダ，超音波センサ等を用いて障害物の存在を検出し走行可能領域を抽出

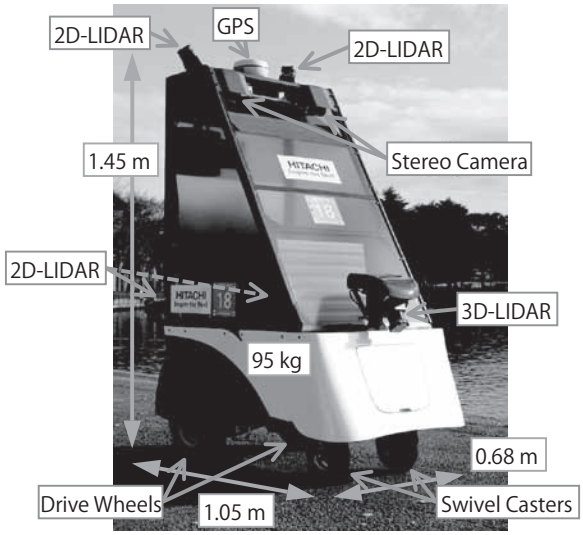


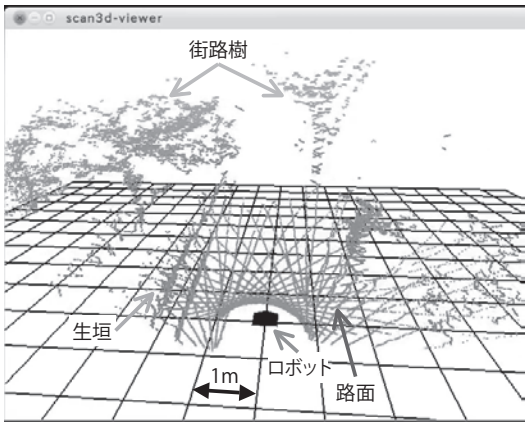
図 -4　日立のロボット（© 日立製作所）

する必要がある．ここではセンサを組み合わせて，路面凹凸，歩行者等の障害物を確実に検出する技術が必要となる．また回避軌道を生成する一般的手法としては，走行可能領域を小領域に分割した占有格子地図を用いてその小領域をノードとして最短経路探索（グラフ探索）を行う手法，遠くまで進める方向に進む開空間法，障害物とロボット間に仮想的な斥力を加えるポテンシャル法が用いられている．この技術も完走には必須であり，ロバスト性／信頼性が要求され，安全／安心な動きを実現する必要がある．

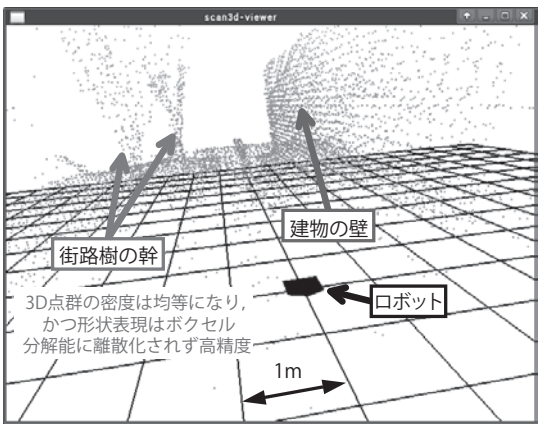
【自律移動の技術例】

最後に具体例として「つくばチャレンジ 2010」を完走した日立のロボットを紹介する．**図 -4** にロボットの外観を示す．移動機構はシンプルな差動二輪型で，縁石等歩道に存在する段差である 50mm 程度の段差乗り越え性能を持たせた．そのため，レーザ式測距センサ（LIDAR : Light Detection and Ranging）とステレオカメラの距離データを時系列融合処理し，走行方向の 50mm 以上の障害物を見落としなく検出する構成とした [1]．また安全のため，側後方の移動体を監視する測距センサも配置した．

自己位置推定には，人や車等の地上移動物体が影響しないよう最上部に最適配置 [2] した 2 個の 2 次元測距センサと，ロボット正面の 3 次元測距センサ，およびディファレンシャル GPS を用いる．**図 -5（a）**に，測距センサ群の計測により得られた 3 次元データの例を示す．**図 -5（b）**のデータは，自己位置推定処理において，街路樹の葉など複雑な形状のマッチング精度を高めるために，ランダムな位置の測定データをボクセル分割した領域内の重心位置に集約し，データ配列を整列させたものである．この処理により，つくばチャレンジのコースで平均誤差 0.121m の精度を実現 [3] した（地上移動物体の影響を受けない高い位置をランドマークに使用）．また，自己位置推定のロバスト性を高めるため，前述のデッドレコニング，マップマッチング，GPS 測位の 3 つの位置推定値を拡張カルマンフィルタにより確率的に融合し，さらに，χ^2 検定による外れ値除去を適用することで，精度が高く信頼性の高い自己位置推定を可能とした．**図 -6** は，自己位置推定の例を示したものである．これは，建物の近傍を通過する状態を示しているが，χ^2 検定により建物壁面のマルチパスの影響



（a）取得データの例



（b）自己位置推定用に加工した例

図 -5
3 次元データの例
（© 日立製作所）

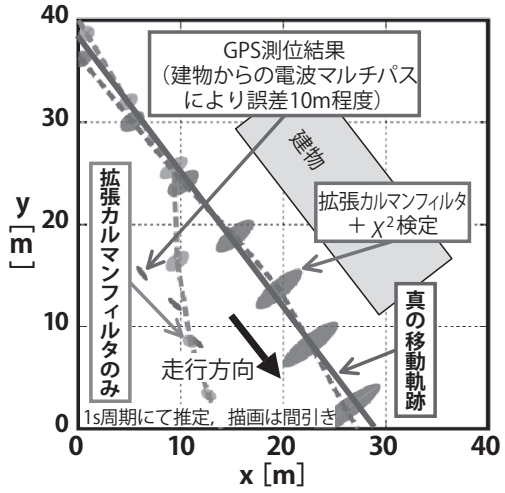


図 -6　拡張カルマンフィルタと χ^2 検定を用いた自己位置推定の効果（© 日立製作所）

による GPS 測位の外れ値誤差の影響を排除し真の移動軌跡に沿った自己位置推定を実現している．

障害物回避に関しては，次世代近距離移動システムを想定して，安全／迅速かつ狭路走破性の高い手法を搭載した．**図 -7** に示すように，経路（Route）に沿うための移動方向 TP1（Target Point）に対し，移動方向 TP1 近傍で障害物を回避可能かつ通行幅の異なる移動方向（図 -7 の例では移動方向 TP2：最小通行幅，TP3：最大通行幅）を探索する [1]．通行幅を可変とすることで，障害物との間隔が広く取れる個所では，安全な距離をとり迅速に通過し，狭い個所も低速で走破することができる．

なお上記処理は，運動性能／センサ性能／環境／目的により最適な構成が異なり，完走するためにはシステム全体を適正にインテグレーションする必要がある．

上記の屋外人混在環境に対応した自律移動技術を用い，ファイナル走行では，数台のロボットを安全に追い抜いて，一昨年に引き続き完走できた．実験走行では，あえて進路を妨害したロバスト性／信頼性の確認を行ったが，1 度の軽微なハードトラブルを除き 14 回すべての走行（雨天含む）で完走した．

今後の展望

「つくばチャレンジ」により，技術的には，人が生活する環境でロボットが安全に自律走行できること

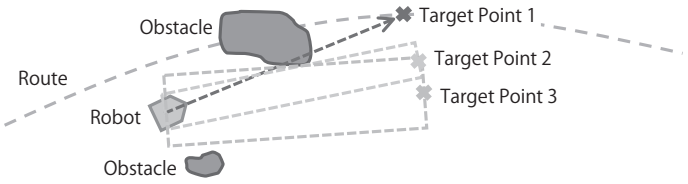


図 -7　障害物回避の例（© 日立製作所）

が示された．この成果は，「モビリティロボット実験特区」の認可に繋がっており，今後はロボット技術を用いた新サービス実用化，さらには持続可能型社会システムを導入した先端的な「ロボットの街つくば」の実現に繋いでいく必要がある．しかし，実用化までには前述のさらなる課題が山積みであり，1 つずつ解決していく必要がある．「つくばチャレンジ」は，本年で一区切りを迎え，来年度からは新しい枠組み／体制で運営されると思われるが，本活動が実用化への課題解決ステップとなるよう，本会誌読者には，多角的な観点で忌憚ないご意見をいただければ幸いである．

参考文献

1）大島　章，他：多様な環境での安全かつ迅速なナビゲーション技術の開発と自律移動ロボット Sofara-T による実証実験，Proc. of Tsukuba Challenge 2010 Symposium（2011）．
2）原　祥尭：環境ロバスト性とシステム信頼性を備えた屋外自律移動ロボット QUVIC の開発，計測自動制御学会誌，Vol.49, No.9（2010）．
3）原　祥尭，他：街路樹などの複雑な形状に適応したマップマッチングによる自己位置推定，Proc. of ROBOMEC'11（2011）．

（2011 年 6 月 13 日受付）

山本健次郎　kenjiro.yamamoto.bq@hitachi.com
1994 年早稲田大学大学院修士課程修了．同年，（株）日立製作所入社．現在，同社日立研究所主任研究員．日本ロボット学会会員．

大久保剛史　eco050@info.tsukuba.ibaraki.jp
2003 年青山学院大学大学院修士課程修了．同年，つくば市入庁．現在，つくば市経済部産業振興課主査．

小野幸彦　yukihiko.ono.qr@hitachi.com
2000 年東北大学大学院博士課程前期修了．同年，同大助手を経て，2005 年（株）日立製作所入社．現在，同社日立研究所研究員．日本ロボット学会，IEEE 各会員．

原　祥尭　yoshitaka.hara.nr@hitachi.com
2007 年筑波大学大学院博士前期課程修了．同年，（株）日立製作所入社．現在，同社日立研究所企画員．日本ロボット学会会員．