

市街地移動ビークルにおける周辺環境地図の生成と提示

Construction and Display of Surrounding Environment Map for Outdoor Mobile Vehicle in Residential Area

香山 健太郎*¹ 矢入 (江口) 郁子*¹ 猪木 誠二*¹
Kentaro KAYAMA Ikuko Eguchi YAIRI Seiji IGI

*¹独立行政法人 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

We have been developing the Intelligent City Walker (ICW), which is a user-carrying intelligent wheeled vehicle based on commercial electric scooter for outdoor use. ICW is one element of Robotic Communication Terminals (RCTs) project. In this paper we describe a system to do 3-D localization, construct surrounding environment map, and display it to the user for the vehicle. We construct the system that can estimate rotation and translation from the value of rotary encoder on rear wheels and images obtained from three-eye stereo vision camera. Moreover, the estimate is modified by values of the electric compass. Then, the environment map by using 3-D occupancy grid is constructed and the dangerous area is calculated from this. Moreover, this system is equipped for an outdoor semi-autonomous electric scooter and performed in real world.

1. はじめに

人間にとって、移動とは自立的かつ快適に生活するための手段として不可欠な行動である。しかし、現在の社会環境では、視覚・聴覚・下肢駆動機能に障害を持つ高齢者・障害者の場合、移動に不可欠な認知・駆動・情報入手の3つの要素行動に問題が生じるため、自立的な移動が困難になっている。

そこで、我々は認知、駆動、および情報入手の3つの要素行動を包括的に支援するようなシステムとしてロボティック通信端末 (Robotic Communication Terminals, RCT) を開発している [矢入 04]。これはまた、歩行者 ITS の現実世界を対象としたシステム構築の一例と位置づけることができる。

その一環として、我々は、高齢者・障害者のための半自律型屋外移動ビークル Intelligent City Walker (ICW) を研究開発している [香山 04]。これは、RCT においてはユーザ搭乗型移動端末としての役割を果たす。そして、我々は、この ICW 上において走行の際の周囲の静的・動的環境地図を作成し、それを搭乗者に提示できるシステムを作成している。さらに、この ICW は RCT の他端末と通信して様々な情報を搭乗者に提示する機能も備える。

環境地図の作成においては、各瞬間での観測結果を統合して環境記述を作成することになるが、屋外は屋内などと異なり、わずかな傾斜などが多数存在し、完全な平面でない部分が多い。さらに、低速・小型のため、坂道・歩道の縁の段差などが相対的に大きな影響を与えることとなり、ビークルが平面上を移動するという仮定が成立しなくなる。そこで、3次元的位置決めを行い、3次元的環境地図を作成する必要がある。

本稿では、ICW における周囲の環境地図の生成方法について詳述する。以下では、まず、2. で ICW のシステム構成と各種情報の提示方法について述べる。次に、3. で環境地図生成のための位置決め手法を、4. で環境地図の作成・統合方法を述べる。そして、5. で実環境を対象に行った位置決め実験結果について説明する。



図 1: Intelligent City Walker (ICW)

2. 半自律型屋外移動ビークル ICW

2.1 ICW のハードウェア

半自律型屋外移動ビークル ICW (図 1) は市販の 4 輪電動スクーター (スズキ社の「セニアカー」) を改造したものであり、下記のような特徴がある。

- 屋外を移動する
- 通常時は搭乗者の運転通りに動き、危険時のみ制御をサポートする (半自律)
- 低速である (最高時速 6km)
- 車道ではなく歩行者と同様の場所を移動する

そして、周囲環境認識のために様々なセンサが、外界との通信のために無線 LAN 端末が、搭乗者とのインタフェースのためにタッチパネル付きモニタが搭載されている。

これまでの ICW では、屋外での障害物回避のために超音波センサ・赤外線センサを用いていたが、本稿では、3次元的な

環境地図を作成するために次のようなセンサからの情報を利用している。

- ロータリーエンコーダ (左右後輪に設置)
- PointGray 社製 3 眼カメラ Triclops(ICW 正面に、水平面から 30 度下に傾けて設置)
- Sensation 社製電子コンパス VC-03

2.2 ICW における情報提示

ICW には

- ICW 自らが求めた周囲数 m の動的環境情報
- 一般道路監視システムが求めた周囲十数 m ~ 数十 m の動的環境情報
- 歩行者支援 GIS による広範囲の静的環境情報

の 3 種類の情報が集められ、それがタッチパネル付液晶モニタを通じてユーザに提示される (図 2)。

一般道路監視システム (RCT の環境端末) [Kayama 02] からは、ICW と衝突する危険のある動物体があるかどうかの情報が送られてくる。ICW はその情報をモニタに表示するとともに、必要に応じて自動的に停止するなどの行動を取る。

また、歩行者支援 GIS [矢入 03] を通じて、適切な移動経路の検索をすることができる。

なお、現在一般道路監視システム・歩行者支援 GIS とは無線 LAN を通じて通信を行っている。

これ以外に、ICW は自分自身のセンサで集めた周囲の環境情報を内部で処理し、モニタを通じてユーザに提示することができる。この環境情報の作成方法について次節以降で述べる。

3. 環境地図作成のための位置決め手法

3.1 処理の流れ

環境地図の作成においては、以下のような処理を行って自己位置・姿勢を推定する。なお、自己位置・姿勢の表記法としては quaternion 記法を用いている。

- ロータリーエンコーダによる相対的移動量の大きな推定
- ステレオカメラを利用した移動量の詳細な推定

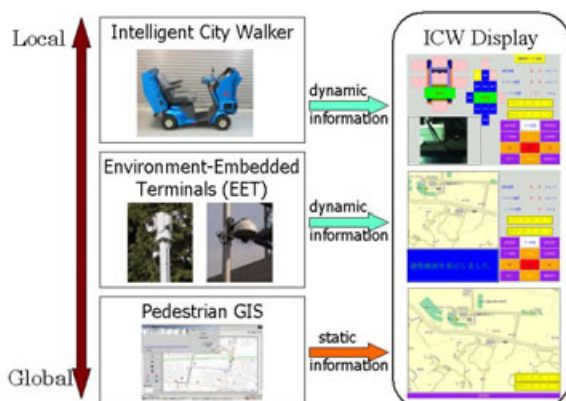


図 2: ICW における情報提示

- 推定された移動量と電子コンパスを用いた自己位置・姿勢の更新

本節では、まず quaternion 記法について説明した後、この個々の処理について説明する。

3.2 quaternion 記法

2 次元を移動する物体の場合、位置・姿勢の自由度は 3 であり、位置を示す 2 変数 x, y と姿勢を示す 1 変数 θ で簡単に表すことができる。

しかし、3 次元を対象とした場合、自由度が 6 に増加する上、3 次元的な姿勢の表し方が複雑となり、計算過程で非線形な式が多数発生することとなる。従って、位置姿勢の表記法・位置決め方法にも工夫が必要となる。

本システムでは、3 次元の位置を通常のデカルト座標系 $t = (x, y, z)$ で表す。また、3 次元姿勢を扱いやすい形で記述するため、コンピュータグラフィックスでよく用いられている quaternion 記法を採用する。これは、 $q = (q_0, q_1, q_2, q_3)^T$ の形で記述される。

$\|q\| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$ とし、 $(u_x, u_y, u_z)^T$ を軸として θ だけワールド座標系を回転させる場合の quaternion は以下のように表される。

$$q = \|q\| \cdot \left(\cos \frac{\theta}{2}, u_x \sin \frac{\theta}{2}, u_y \sin \frac{\theta}{2}, u_z \sin \frac{\theta}{2} \right)^T$$

この quaternion の和・差・積、およびこれを用いた座標変換の定義は簡単な式で表される。そのため、自己姿勢とその更新、それによる座標変換を容易に扱うことができる。

3.3 ロータリーエンコーダを用いた移動量推定

ICW の左右後輪には、回転数を測定するためのロータリーエンコーダが取り付けられている。

それをもとに、まず、時刻 $t-1$ から t までの車両全体の並進量 r^{t-1} と回転量 q_t^{t-1} を以下のように推定する。ここでは、車両は完全に平らな面を移動すると仮定している。

$$q_t^{t-1} = \left(\cos \frac{\theta}{2}, 0, \sin \frac{\theta}{2}, 0 \right)^T$$

$$r^{t-1} = R(q_t^{t-1}) \left(0, 0, T \left(\frac{V_r + V_l}{V_r - V_l} \right) (1 - \cos \theta) \right)^T$$

ただし、 $R(q_t^{t-1})$ は q_t^{t-1} に対応する回転行列であり、 V_l, V_r は左右の後輪の回転角である。そして、 D を車輪の半径、 T を左右車輪間の距離としたとき、

$$\theta = \frac{D(V_r - V_l)}{T}$$

である。

3.4 画像を用いた移動量の最尤推定

Olson, Matthies らは、時刻 $t-1$ および時刻 t のステレオ画像のペアが与えられたとき、その間の回転量 R と並進量 t の最尤推定を行う方法を求めた [Olson 03]。

画像中の i 番目の特徴点の、それぞれの時刻のピークル座標系による 3 次元座標のペアを $p_i^{(t-1)}, p_i^{(t)}$ とすると、その関係は次の式で与えられる。

$$p_i^{(t-1)} = R p_i^{(t)} + t + e_i \quad (1)$$

ただし、 e_i は時刻 $t-1$ および t の 3 次元座標の観測誤差を結合したものである。そして、この誤差を最小にする $p_i^{(t)}$, t の良好な近似値を少ない計算量で得ることができる。

しかし、このような移動量推定は、外れ値によって大きな影響を受ける。

そこで、本システムでは次のような方法で外れ値を排除している。

1. ロータリーエンコーダからの推定移動量と時刻 $t-1, t$ の単眼画像からの画像上の移動量の推定
2. 追跡対象点の選択
3. 現推定量をもとにした追跡対象点の時刻 $t-1, t$ の 3 次元座標の計算
4. 外れ値を排除した新追跡対象点の決定
5. 3. の結果に基づく新移動量の推定
6. 収束するまで 3.-5. の繰り返し

1. では、まず大雑把に求めた画像全体のオプティカルフローとロータリーエンコーダからの推定移動量を比較して、ロータリーエンコーダのノイズ・画像中に動物体があるかどうかなどを考慮したより正確な推定移動量を求める。

そして、時刻 $t-1$ の画像から、そのテクスチャに基づきより正確な追跡結果が期待できる点を十数点求める。

次に、選択された各点について、3D オプティカルフローを計算する。これは、時刻 $t-1$ の画像の追跡対象点、およびそれに対応する時刻 t の画像上の各点について、ステレオ法により各時刻のカメラ座標系による 3 次元座標を求める。ここで、時刻 $t-1$ と t の間の対応点計算の際に、これまでに推定した移動量を用いて探索空間を狭めることにより、処理時間を節約する。

ここで、求めた移動量から予測される時刻 t での座標と予測に用いた時刻 t での座標の差が大きい点、および追跡対象点間の距離の時刻 $t-1$ と t での差が、他の点と比べて大きい点を追跡対象点から除外し、以後の計算には用いないこととする。

そして、この 3 次元座標のセットを元に、上述の方法によって移動量とその誤差を計算する。

3.5 自己位置・姿勢の更新

このようにして得られた移動量をもとに、カルマンフィルタを用いて自己位置・姿勢を更新する。

また、本システムでは、電動スクーターに sensation 社の地磁気コンパスモジュール VC-03 をとりつけ、方位角と 2 軸の傾斜角を得ている。そのセンサ値を元に、カルマンフィルタを用いて自己姿勢値のみの更新を行う。

4. 3次元占有格子法による環境地図の作成

4.1 占有格子法

この位置決め手法から得られた自己位置から、まず、3次元占有格子の作成を行う。

占有格子法は、様々なノイズを含むセンサ情報からよりロバストな周囲の環境情報を得るため、Elfes らによって提案された環境記述法である [Elfes 87, Martin 96, Moravec 96]。

もともとの手法では、周囲の環境を 2次元の格子状に分割し、それぞれの格子に物体（地面、障害物など）が存在する確率値 p を設定する。そして、観測された情報をベイズの定理に基づいて更新する。

実装では、各格子が取る値 C を

$$C = a \log \frac{p}{1-p} + b \quad (2)$$

と設定すると扱いが容易となる。また、各格子の値は独立であること、各瞬間に観測されるセンサの値は独立であること、また未観察部分の物体存在確率は $1/2$ であることを仮定する。

そして、センサ分布、すなわちセンサ値と実際の値との対応を示す確率分布から求まる値を $R(t)$ とすると、

$$C(t) = C(t-1) + R(t) \quad (3)$$

で値が更新できる。

本手法では、特に地面の段差に着目し、

- 階段（回避）とスロープ（そのまま進む）の区別
- 普通の歩道の縁（回避）と低くなっている歩道の縁（そのまま進む）の区別

を実現するため、高さ方向を特に細かくした 3次元格子を採用した。現在の格子サイズは、高さが 4cm、幅・奥行きがそれぞれ 8cm となっている。また、格子数は $64 \times 128 \times 128$ である。

さらに、本論文では、各画素を個々のセンサと見なし、対応探索の結果得られる 3次元座標をセンサの値と見なす。そして、

- 画像（光センサ）は超音波センサ等と異なり拡散性が低いこと
- 画素は超音波センサ等とくらべて数が膨大となること
- 格子が 2次元ではなく 3次元であるため数が増えること

という理由により、各格子値の更新にあたっては、各画素に対してその画素が表す座標を求めた後、その座標が属する格子の値は +3、視点とその格子の間に存在する格子の値は -1 するというシンプルな方法を採用した。

4.2 危険領域の判定

このように作成した 3次元占有格子をもとに、次のような手順で危険領域を検出する。

1. 各地点において、物体存在確率が一定値以上となる格子の最大高さを求め、2次元段差地図を作成する
2. 2次元段差地図の各地点において、4近傍とのどれかの地点との高さの差が 2単位高さ（ここでは 8cm）以上となった地点を危険領域とみなす

なお、このとき、正確な高さが出ていない領域は対象外とする。

5. 屋外実験

このシステムを用いて実際に屋外環境を走行し、そこから得られたデータから移動軌跡を求めた結果、良好な結果が得られた。

その走行環境の一例を図 3 に、その際に得られた移動軌跡の平面上の軌跡、および高さの変化を図 4 に示す。

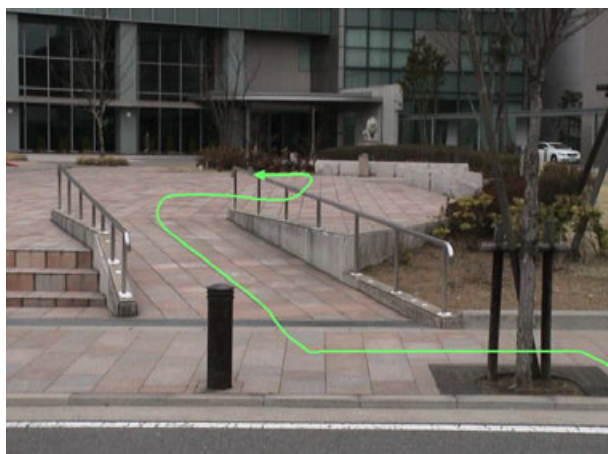


図 3: 走行環境例

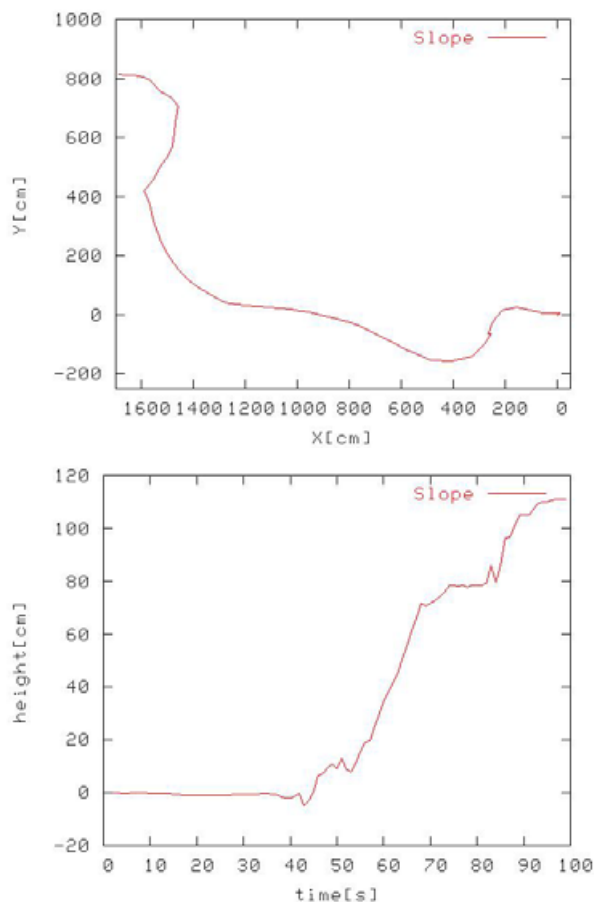


図 4: 移動軌跡 上:2次元軌跡, 下:高さの変化

6. おわりに

我々は、ロボティック通信端末 (RCT) の構成要素であるユーザ搭乗型移動端末として、屋外市街地を低速で移動する半自律型ビークル Intelligent City Walker (ICW) を開発している。

本稿では、その ICW における精細な 3 次元位置決めと地図の作成、およびそれらの情報の提示方法について説明した。

位置決めにおいては、3 次元座標を扱いやすい quaternion 記法を導入し、ステレオカメラからの情報を中心に、ロータリーエンコーダ・電子コンパスからの情報を援用して位置決めを行った。

さらに、上下方向に精細な 3 次元占有格子を用いてきめ細かな環境記述の作成を行った。そして、それをもとに段差地図を作成し、屋外環境において搭乗者に危険な領域を提示できるようなシステムを作成した。

今後の課題としては、SLAM などの手法を応用して位置決め精度をさらに上げること、また、歩行者支援 GIS などの広域地図情報と連携して環境認識の精度を上げるとともに、認識結果を地図情報にフィードバックして洗練させることなどがあげられる。

参考文献

- [Elfes 87] Alberto Elfes: Sonar-based real-world mapping and navigation, IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 3, No. 3, pp. 249–265 (1987).
- [Kayama 02] K. Kayama, I.E. Yairi, S. Igi, and H. Yoshimizu: Road Observation System for Robotic Communication Terminals supporting Pedestrians, Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp.347–352 (2002).
- [香山 04] 香山健太郎, 矢入 (江口) 郁子, 猪木誠二: 周囲の環境を認識・提示するユーザ搭乗型屋外移動ビークル, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 6, No. 1, pp. 91–96, 2004.
- [Martin 96] Martin C. Martin and Hans P. Moravec: Robot evidence grids, Technical Report CMU-RI-TR-96-06, Carnegie Mellon University (1996).
- [Moravec 96] Hans P. Moravec: Robot spatial perception by stereoscopic vision and 3d evidence grids, Technical Report CMU-RI-TR-96-34, Carnegie Mellon University (1996).
- [Olson 03] Clark F. Olson, Larry H. Matthies, Marcel Schoppers, and Mark W. Maimone: Rover navigation using stereo ego-motion, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 43, pp. 215–229 (2003).
- [矢入 03] 矢入 (江口) 郁子, 吉岡裕, 小松正典, 猪木誠二: 歩行空間のアクセシビリティ情報を提供する歩行者支援 GIS, 人工知能学会全国大会論文集 (第 17 回), 2B3-07 (2003).
- [矢入 04] 矢入 (江口) 郁子, 香山健太郎, 猪木誠二: 高齢者・障害者の移動を支援する Robotic Communication Terminals (4), 人工知能学会誌 Vol. 19, No. 3 (2004).