

動的環境における自律的な道案内ロボットの提案

A Novel Approach for Route Guidance Robots in Dynamic Environments

精密工学専攻 10号 上野山直貴
Naoki Uenoyama

1. はじめに

近年、オフィスやショッピングモールといった人が生活する空間において人と共存するロボットの研究が盛んに行われている。人が生活する環境で使用されるロボットにおいて、自律移動機能は基礎的な機能の一つとして位置づけられる。自律移動ロボットによる人への支援の内容として荷物の運搬や人の道案内などが考えられる。本研究では人の道案内をする自律移動ロボットについて考える。

自律移動ロボットが人の道案内を効率的に行うためには、道案内をする対象者をロボット自身で検出し、ロボット自身が対象者にアプローチする必要がある。そのためには、各歩行者が道案内を必要としているかそうでないかの2パターンに歩行状態を識別する必要があると考える。

人の道案内をする自律移動ロボットとして、博物館の展示物の案内をするロボットがある⁽¹⁾。このロボットはツアー参加者とその他の来訪者を区別しながら展示物まで案内することが可能である。ツアー参加者がロボットから離れたときは説明を中断し、離れた人を呼び止めることもできる。しかし、道案内の対象者はあらかじめ登録されたツアー参加者に限定される。そのため、案内の対象者をロボットが自ら見つけ出すことは難しいと考えられる。道案内の対象者を自律的に決定する研究として、人に店舗の情報提供や道案内をするロボットの研究がある⁽²⁾⁽³⁾。これらの研究では、歩行者の軌跡を「速く歩く」「ゆっくり歩く」「止まる」「うろうろする」の4状態にクラスタリングし、地図の前で停止している人とうろうろしている人を道案内の対象者とした。この研究では事前に入力された地図の場所などの意味的情報をもとに道案内をする対象者を選択している。そのため、他の場所で立ち止まった道案内が必要な人の検出は難しいと考えられる。

そこで、著者らは事前にそのような意味的情報を入力することなく人の歩行状態を識別し、道案内が必要な人を検出する手法を提案してきた⁽⁴⁾。具体的には、人が日常的に空間内のどの場所で活動しているかの度合を表す活動度合によって重み付けされた環境地図⁽⁵⁾を参考にして人の活動場所を抽出する。そして、環境地図と人の歩く速さを用いた歩行状態の評価と、人の移動経路を用いた評価方法を提案しその有用性を評価した。しかし、二つの評価方法を個別に用いただけで、同時に評価する方法については考慮されていない。そこで本研究では、二つの評価の組み合わせ方を提案する。

さらに、人の活動領域はランチタイムや通勤時間帯などのイベントの発生により異なることが考えられる。そのため、道案内に必要な人を精度良く識別するためにはイベントに合わせて適切な環境地図を用いる必要がある。本稿では、人の活動場所が変化したときに環境地図を分割するタイミングを決定する手法についても提案する。

2. 人の歩行状態の評価および識別方法

道案内が必要な人は、目的地がわからないため、立ち止まる、うろうろ歩くといった傾向があると考えられる。ただし、行列に並んでいる人など、道案内が必要でない人でも立ち止まる可能性はある。そこで、空間の利用頻度を考慮するため、人が日常的に空間内のどの場所で活動しているかの度合を表す活動度合によって重み付けされた環境地図⁽⁵⁾を用いる。これにより、どこに行けばいいかわからず立ち止まっている道案内に必要な人と順番待ちで立ち止まっている道案内

のいない人を区別できると考える。

2.1 活動度合および歩く速さに基づく人の歩行状態の評価

この手法では毎ステップにおいて活動度合と歩く速さから各歩行者の評価値を算出する⁽⁴⁾。歩行者 i が計測範囲内に現れてから経過したステップ数を t_i ($t_i = 0, 1, 2, \dots$) とする。道案内が必要かどうかの判断に用いる評価値 $P_i(t_i)$ は t_i における人の歩く速さ $v_i(t_i)$ 、および人がいるグリッド群における活動度合の平均値 $\omega_i(t_i)$ から式 (1) のように導出する。

$$P_i(t_i) = \alpha v_i(t_i) + \beta \omega_i(t_i) \quad (1)$$

ここで、 α と β は設計パラメータである。歩く速が遅く、活動度合が低い場所にいるほど評価値は低くなり、道案内が必要となる可能性が上がる。ただし、人同士がすれ違うときなどに偶然 $P_i(t_i)$ が低くなる可能性を考慮し、式 (2) のように $P_i(t_i)$ が閾値 Th_1 を下回ったとき、歩行者が活動度合の低い場所で立ち止まったと判別し、その回数 $N_i(t_i)$ を数える。

$$N_i(t_i) = N_i(t_i - 1) + 1, \quad \text{if } P_i(t_i) < Th_1. \quad (2)$$

2.2 歩行者が歩いた道のりと直線距離に基づく人の歩行状態の評価

この手法では一定時間 T_c 毎に評価値を算出する⁽⁴⁾。歩行者 i の評価値を算出した回数を n_i ($n_i = 0, 1, 2, \dots$) としたとき、評価値 $Q_i(n_i)$ は一定時間内で歩行者が移動した直線距離 $L(n_i)$ と一定時間内で歩行者が移動した道のり $l(n_i)$ から式 (3) のように算出する。ただし、歩行者が停止している場合、計測時の誤差により $L(n_i)$ に比べ $l(n_i)$ が大きくなり、閾値を下回る可能性があると考えられる。そのため $L(n_i)$ が一定の値 L_{min} を超えた場合にのみ $Q_i(n_i)$ を算出する。

$$Q_i(n_i) = L(n_i) / l(n_i), \quad \text{if } L_{min} < L(n_i). \quad (3)$$

活動度合を用いる手法と同様に、式 (4) のように $Q_i(n_i)$ が閾値 Th_2 を下回ったとき、うろうろ歩いたと判別し、その回数 $M_i(n_i)$ を数える。

$$M_i(n_i) = M_i(n_i - 1) + 1, \quad \text{if } Q_i(n_i) < Th_2. \quad (4)$$

2.3 二つの評価を組み合わせた人の歩行状態の識別

この節では 2.1 節および 2.2 節で示した評価値を同時に考慮する方法を提案する。それぞれの手法において閾値を下回った回数 $N_i(t_i)$ 、 $M_i(n_i)$ が大きくなるほど道案内が必要となる可能性が高いと考えられる。そこで、 $N_i(t_i)$ 、 $M_i(n_i)$ それぞれに重みとなる設計パラメータ σ 、 τ を掛け合わせることでより評価値 $R_i(t_i)$ を以下のように算出する。

$$R_i(t_i) = \sigma N_i(t_i) + \tau M_i(n_i) \quad (5)$$

算出した評価値が閾値 Th_3 以上、すなわち式 (6) の条件を満たしたときに道案内が必要な歩行状態と判別する。

$$R_i(t_i) \geq Th_3 \quad (6)$$

3. 人の歩行状態の識別実験

活動度合および歩く速さに基づく人の歩行状態の評価と歩行者が歩いた道のりと直線距離に基づく人の歩行状態の評価それぞれの有用性については先行研究にて検証実験を行った⁽⁴⁾。本研究では、二つの評価を組み合わせた人の歩行状態の識別方法の有用性について検証する。

3.1 実験環境

実験環境として Fig. 1 に示す実験室内の 4 m × 6 m の領域を用いて実験を行った。環境内には空の箱や筆箱などがあり、物を隠すことができるようにした。

被験者は以下に示すあらかじめ目的地が与えられたタス

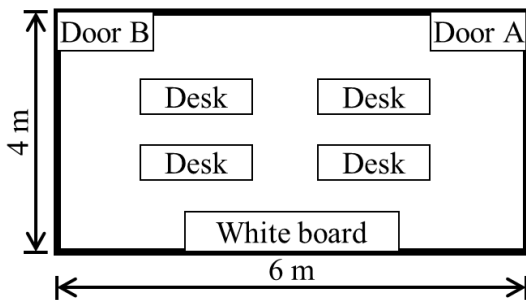


Fig. 1 Experimental environment of walking status classification

クと目的地が与えられていないタスクをそれぞれ三つずつ行う。

<目的地が与えられたタスク>

- 入口 A から入口 B に行く。
- 入口 B からホワイトボードへ行き、絵を描き入口 A に行く。
- 入口 B から机に置かれた帽子を取り、入口 B に戻る。

<目的地が与えられていないタスク>

- 入口 B から机の上のどこかに隠されたペンを探し、ホワイトボードに絵を描き、入口 A に行く。
- 入口 B から机の上に隠された電池を探し、入口 B に戻る。
- 入口 B からホワイトボードに行き、絵を描き、机の上に隠されたホワイトボード消しを探し、ホワイトボードに描いた絵を消し、入口 A に行く。

このうち、目的地が与えられていないタスクを行ったときの歩行経路を道案内が必要な歩行状態とみなし、その識別精度を求める。

使用するセンサは、活動度合の重み付けにはタグの装着なしに複数人を追跡可能であるレーザレンジファインダ LRF (北陽電機株式会社 UTM-30LX)、タスクを行うときの人の位置の計測は確実に人のトラッキングを行うために超音波式三次元位置計測装置 ZPS (古河機金属株式会社) を用いる。

二つの評価指標を個別に用いて道案内が必要な人の識別を行いその精度を求め、提案した方法との比較対象とする。具体的には、式 (2) における $N_i(t_i)$ が閾値 Th_4 以上になる、または式 (4) における $M_i(n)$ が閾値 Th_5 以上になったときに道案内が必要とする手法である。

3.2 活動度合の重み付け

Fig. 1 に示す実験室内において、机の前に滞在する、ホワイトボードに文字を書き込むといった日常生活を想定して歩行したときの活動度合の重み付けの結果を Fig. 2 に示す。色が濃いグリッドほど活動度合が高いことを示す。この環境地図を用いて実験を行う。今回の実験では、歩行状態の判別は 0.25 秒ごとに行い、 $T_c = 5 \text{ sec}$ とする。

3.3 実験結果

20 代男性 10 名の被験者がそれぞれ六つのタスクを行い、合計 60 軌跡を計測した。計測したデータをもとに、二つの評価を個別に判断した方法、提案した方法の二種類の手法に基づき道案内が必要かどうかを判断した結果を以下に示す。

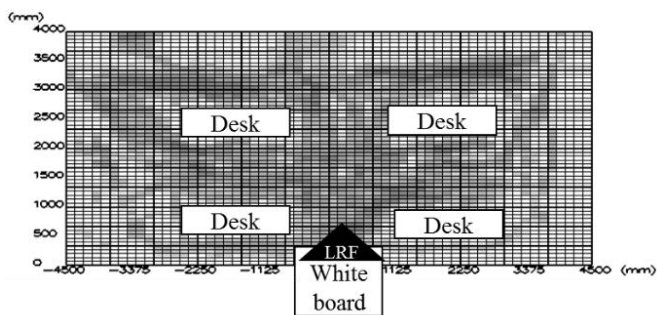


Fig. 2 Visit frequency map

正答数は目的地が与えられたタスクを行ったときの軌跡を道案内が必要と判断した数と目的地が与えられていないタスクを行ったときの軌跡を道案内が必要と判断した数の合計値であり、正答率 [%] = (正答数 / 全軌跡数) × 100 となる。

3.3.1 二つの評価を個別に判断する方法

この方法では、設計パラメータ α は 0.1 ~ 0.19 (0.01 刻み)、 β は 0 ~ 0.049 (0.001 刻み)、閾値 Th_2 は 0 ~ 0.99 (0.01 刻み) とした。このとき、道案内が必要な人の検出精度に大きく影響しないと考えられるパラメータはこれまでの実験で良い結果が得られた値に固定して実験を行った。具体的には、 $Th_1 = 100$, $Th_4 = 24$, $T_c = 5 \text{ sec}$, $L_{min} = 1000 \text{ mm}$, $Th_5 = 2$ とした。

実験の結果、正答率の最大値は 96.7 % となり、そのときの設計パラメータや閾値の組み合わせは 222 通りあり、すべて $\alpha = 0.12$ のときであった。 $\alpha = 0.12$ のときの結果を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 より、 $\beta = 0$ のときは識別の正答率が低くなっているため、高精度で歩行状態の識別を行う場合は活動度合を考慮することは重要であると考えられる。また、 Th_2 が小さく β が大きいときに正答率が高くなり、 Th_2 が大きくなるにつれて β の値も大きいときに正答率が高い値になることがわかる。ここで、 Th_2 はうろろう歩いていると判別するときの閾値であり、 β は活動度合をどの程度考慮するかを決める設計パラメータである。そのため、うろろうしていると判別する感度を上げたときは、活動度合が低いと判断するときの感度を下げた方が歩行状態の識別精度は高くなることがわかる。

3.3.2 提案した方法

この方法では、 α および β はそれぞれ 0.01 ~ 0.1 (0.01 刻み)、 Th_2 は 0 ~ 0.9 (0.1 刻み) とし、 σ は 10 ~ 100 (10 刻み)、 τ は 100 ~ 1000 (100 刻み) の全ての組み合わせで実験を行った。このとき、 $Th_1 = 100$, $T_c = 5 \text{ sec}$, $L_{min} = 1000 \text{ mm}$, $Th_3 = 1000$ と固定した。

このときの正答率の最大値は 100 % であり、全ての軌跡を正しく識別することができる α , β , Th_2 , σ , τ の組み合わせが 9 通りあった。このうち、各パラメータの最頻値は $\alpha = 0.03$, $\beta = 0.01$, $Th_2 = 0.6$, $\sigma = 10$, $\tau = 200$ であり、この組み合わせのときも正答率は 100 % であった。このとき α と β を変化させたときの歩行状態の識別精度を Fig. 4 に、 σ と τ を変化させたときの識別精度を Fig. 5 に示す。

Fig. 4 から、正答率が同程度のとき、 β が小さいときには α が大きく、 β が大きくなるにつれて α が小さくなっている。ここで、 α は歩く速さ、 β は活動度合をどの程度考慮するかを決める設計パラメータである。そのため、立ち止まっていると判断する感度を下げたときは、活動度合が低いと判断する感度は上げたほうが歩行状態の識別精度は上がるがわかる。

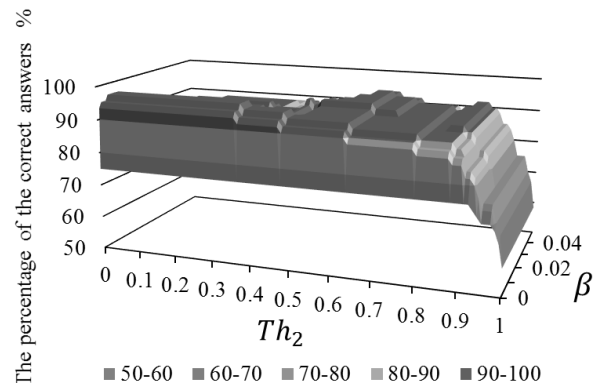


Fig. 3 Experimental result using individual method when $\alpha = 0.12$

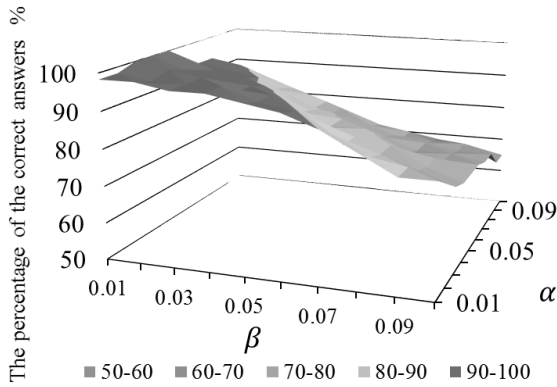


Fig. 4 Experimental result using proposed method when $Th_2 = 0.6$, $\sigma = 10$, and $\tau = 200$

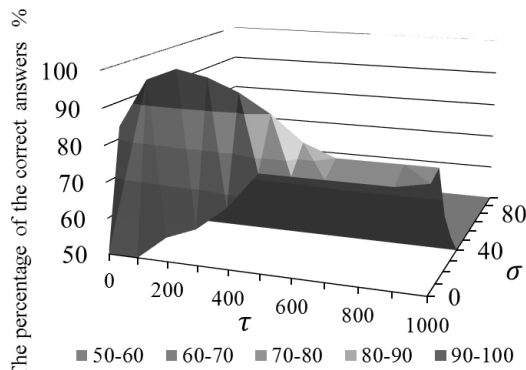


Fig. 5 Experimental result using proposed method when $\alpha = 0.03$, $\beta = 0.01$, and $Th_2 = 0.6$

また Fig. 5 より、正答率が高いとき、 σ に比べ τ の方が大きい値になっている。 σ は活動度合と歩く速さによる評価、 τ は移動経路による評価をどの程度考慮するかを決める設計パラメータである。評価値を計算する時間が活動度合と歩く速さは 0.25 sec に 1 回、移動経路は 5 sec に 1 回であるため、移動経路の評価値 $Q_i(n_i)$ の方が閾値を超える回数が少なくなりやすいため、 τ の方が大きい値になったと考えられる。

3.4 考察

道案内が必要な人はうろうろ歩く状態と立ち止まる状態に交互になる可能性がある。そのため二つの状態を個別に考えるよりも、提案した方法のように二つの状態を両方とも同時に考慮した結果の方が高い精度で歩行状態を識別できたと考えられる。

提案した道案内の必要な人の識別方法の精度を維持し、さらにその精度を上げるためには高い精度で人のトラッキングが行えることと、環境地図の活動度合が適切に重み付けされていることが前提となる。そのため、著者らはまずトラッキング手法の改善を行った⁶⁾。さらに、人の活動場所は時間により変化する可能性があるため、人の活動場所が変化したタイミングで環境地図を分割して保存しておく必要がある。そのため、次章にて環境地図を分割する方法について述べる。

4. 環境地図を分割するタイミングの決定方法

瀧本らが提案した活動度合を表す環境地図⁵⁾は環境全体の活動度合の数值は観測時間や人口密度によって変化する。本研究において、歩行状態の識別のためには歩行者がいる地点における人の活動の頻度が他の地点と比較して高いか低いかわかることが重要である。そのため、活動頻度が相対的に高い地点を抽出するためには観測時間や人口密度によらないように活動度合の数值を補正する必要がある。

また、ランチタイムや通勤の時間帯などが存在するため、

人の活動領域は、時間帯によって変化すると考えられる。そのため、活動領域が変化したタイミングで環境地図を分割して別々に記録しておく必要がある。そこで本研究では、短時間に重み付けされた環境地図のそれぞれのグリッドの変化率の平均を求めることにより、環境地図を分割するタイミングを決定する手法を提案する。

本章では、人の活動領域を抽出するために使われる活動度合を表す環境地図の数值の補正方法、および環境地図を分割するタイミングの決定方法について述べる。

4.1 活動度合の数值の補正方法

時刻 t 、グリッド (p, q) における活動度合 $\omega(t, p, q)$ から環境全体の活動度合の平均値 $\omega_a(t)$ を計算する。その後、活動度合の補正值 $\omega_c(t, p, q)$ は式 (7) のように得られる。

$$\omega_c(t, p, q) = \frac{\omega(t, p, q)}{\omega_a(t)} \quad (7)$$

4.2 環境地図を分割するタイミングの決定方法

環境地図を分割するタイミングを決めるために、短時間で重み付けされた二つの環境地図を比較する。まずグリッド (p, q) の変化率 $C(t, p, q)$ を式 (8) のように計算する。

$$C(t, p, q) = \frac{|\omega_c(t, p, q) - \omega_c(t + \Delta t, p, q)|}{\omega_c(t, p, q)} \quad (8)$$

ここで、 $\omega_c(t, p, q)$ は時刻 $t - \Delta t$ から t の間、 $\omega_c(t + \Delta t, p, q)$ は時刻 t から $t + \Delta t$ の間にグリッド (p, q) に重み付けされた活動度合を補正した値を示す。次に環境内の全グリッドの変化率の平均値を計算する。この変化率の平均値が閾値よりも大きいとき、活動場所が変化したと考え、時刻 t を環境地図を分割するタイミングとする。観測する環境によって変化率の平均値は異なることが考えられる。そこで、変化率の平均値の観測時間全体の平均と標準偏差を使用することにより、環境によらない閾値が決定できると考える。

本研究では、観測時間内に活動場所が変化しない程度に短時間で、かつ重み付けにむらがない時間として $\Delta t = 5 \text{ min}$ とする。

5. 環境地図の分割実験

実環境において重み付けされた活動度合に提案した分割方法を適用し、分割が妥当かどうかを調べることを目的として本実験を行う。実験は平日の日中に大学内の廊下で行われ、本研究とは無関係の歩行者を 75 分間観測した。

5.1 実験環境

実験環境を Fig. 6 に示す。LRF を図内の矢印の位置と向きに 4 台設置した。

5.2 実験結果と考察

観測の結果、変化率の平均は Fig. 7 のようになった。Fig. 7 より、40 分から 60 分の変化率の平均は他の時間に比べて高

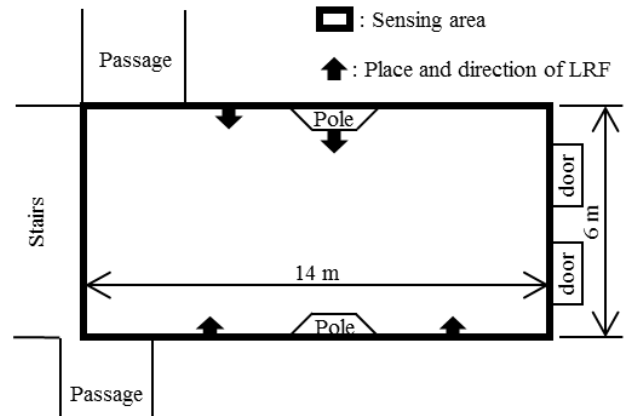


Fig. 6 Experimental environment used to determine environmental map segmentation timing

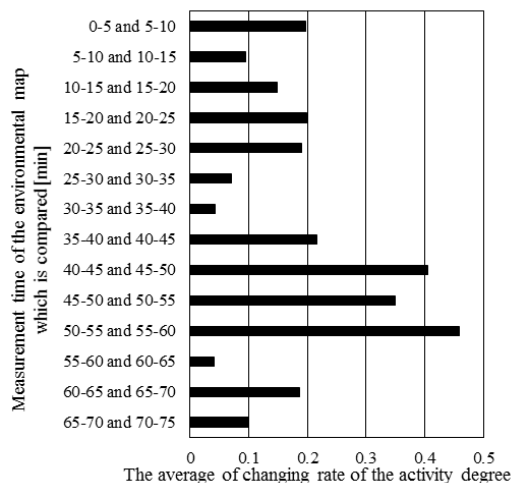


Fig. 7 Experimental results used to determine environmental map segmentation timing

くなっていることがわかる。この時間帯は講義間の休憩時間であり、通路を通る歩行者が増加し、歩行者が通路の端まで広がって歩いていた。また、通路内に立ち止まって話をしている人も見られた。これにより、変化率の平均が高くなったと考えられる。

Fig. 7の結果において、変化率の平均の観測時間全体の平均値は0.193、標準偏差は0.126であった。環境地図を分割する閾値を平均値と標準偏差の和からなる0.319とすると、環境地図は0-45分、45-50分、50-55分、55-75分の四つに分割される。分割された環境地図をFig. 8に示す。

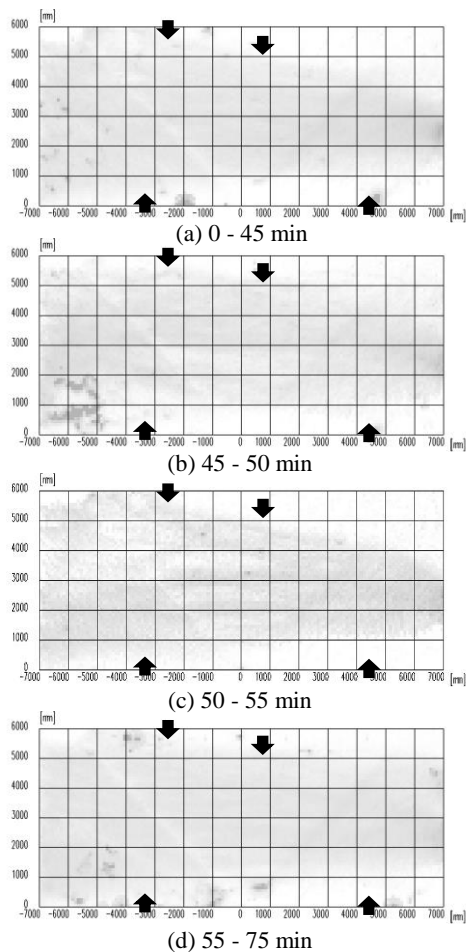


Fig. 8 Environmental map after segmentation

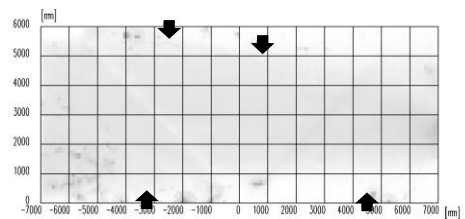


Fig. 9 Environmental map weighted for 75 min

観測時間全体で重み付けされた環境地図をFig. 9に示す。Fig. 9より、環境地図の左下の地点は活動頻度が高くなっている。一方、Fig. 8を見ると、左下の地点の活動頻度が高いのは45-50分に観測された環境地図だけであることがわかる。そのため、人の活動場所が変わったタイミングで環境地図を分割する必要があると考えられる。

以上のことから、道案内を必要としている人を高い精度で識別するためには活動場所が変わったときに環境地図を分割する必要があると考えられる。

6. おわりに

本研究では活動度合および歩く速さと歩行経路から歩行者の道案内が必要かどうかを識別する二つの評価を組み合わせた方法を提案した。実験により、二つの評価方法を個別に用いるよりも提案した方法の方が高い精度で歩行状態の識別を行えることがわかった。また、活動度合を表す環境地図のそれぞれのグリッドの変化率の平均値を求めることにより環境地図を分割するタイミングを決定する方法を提案した。実験により人の活動場所が変化したときに環境地図を分割することの重要性を示した。

今後の課題は、分割して保存した環境地図を使って道案内が必要な人の識別精度を検証することである。

参考文献

- (1) T. Oyama, E. Yoshida, Y. Kobayashi and Y. Kuno, "Tracking Visitors with Sensor Poles for Robot's Museum Guide Tour", HSI2013, pp. 645 - 650, 2013.
- (2) M. Shiomi, T. Kanda, D. F. Glas, S. Satake, H. Ishiguro, N. Hagita, "Field Trial of Networked Social Robots in a Shopping Mall", The 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2846 - 2853, 2009.
- (3) 神田崇行, D. F. Glas, 塩見昌裕, 萩田紀博, "移動する人にサービス提供するロボットのための環境情報構造化", 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 4, pp. 81 - 91, 2009.
- (4) 上野山直貴, 新妻実保子, "道案内ロボットのための自律的な目的地設定一人の活動度合を表す環境地図および歩行経路を用いた人の歩行状態の区別", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講習会 2014, 1P2 - G01, 2014.
- (5) A. Takimoto, H. Hashimoto, M. Niitsuma, "Effective destination determination for Semi-Autonomous Smart Electric Wheelchair Based on History of Human Activity", Int. Conf. on Industrial Informatics, pp. 163 - 169, 2014.
- (6) N. Uenoyama, M. Niitsuma, "Temporal Segmentation of Environmental Map Based on Changing Rate of Activity Areas and Improvement of Tracking Method using LRF", IEEE/SICE Int. Symp. on System Integration (SII), pp. 57 - 62, 2015.