

画像情報を用いた屋内移動ロボットの自己位置同定方法

橋場 参生, 吉川 毅, 鈴木 慎一

Position Identification Method for Indoor Mobile Robot Using An Image Sensor

Mitsuo HASHIBA, Takeshi KIKKAWA, Shinichi SUZUKI

抄 録

我々は、老人福祉施設内を巡回して飲料配達等を行う自律型走行ロボットを開発してきた。このようなロボットの自律化を実現するためには、ロボット自身が経路上の自己位置を認識するための「自己位置同定機能」が必要となる。そのため、上記ロボットでは、事前に老人福祉施設の地図を作成し、この地図をロボットに記憶させることによって、デッドレコニングや超音波センサによる自己位置同定を実現してきた。しかし、ロボット用の地図作成には多くの時間と労力が必要であり、また、運用施設や走行経路が変化した場合には、地図の再作成やプログラムの修正が必要になるという課題があった。

本報告では、1台のカメラを用いて移動経路の上下左右の情報を記録した二次元時空間画像を作成し、この二次元時空間画像を用いて自己位置同定を行う方法を提案する。本方法で使用する二次元時空間画像は作成が容易であるため、移動経路や運用施設が変化した場合でも柔軟に対応できる。廊下および室内通路を走行するロボットに本手法を適用し、自己位置同定実験を行った結果、その有効性を確認することができた。

キーワード：走行ロボット，位置同定，二次元時空間画像，視覚システム

Abstract

For welfare facilities, we have developed an autonomous mobile robot that can deliver drinks to elderly people in behalf of staff. Since the position identification function is necessary to move such robots automatically, we had made a map of the facility in advance, and realized map-based position identification using dead reckoning and ultrasonic sensors. However, it requires much time and labor to make a map, furthermore, if environment (route, building etc.) will be changed, we have to remake a map and correct the program.

In this paper, we propose a new position identification method for indoor mobile robot using a single camera. In this method, the route is memorized as a 2D spatiotemporal image that contains upper, lower, left and right side images of a route, and the robot can identify its position on the route using this 2D spatiotemporal image. As the way to make this 2D spatiotemporal image is easy, proposed method can cope well with changes of environments. We also applied this method to the robot in the corridor and room environment. The effectiveness is shown by experimental result.

KEY-WORDS : Mobile Robot, Position Identification, 2D Spatiotemporal Image, Vision System

1. はじめに

オフィスや福祉施設等において、運搬・清掃・案内等の作業を支援・代行する自律型移動ロボットの実用化が期待されている。そこで我々は、老人福祉施設内を巡回して飲料配達等を行う自律型運搬ロボットを開発し、実地評価試験を行ってきた¹⁾。

このようなロボットの自律化を実現するためには、ロボット自身が経路上の自己位置を認識するための「自己位置同定機能」が必要となる。この機能を実現するため、上記の実地評価試験では、事前に老人福祉施設の地図を作成し、この地図をロボットに記憶させることによって、デッドレコニングや超音波センサによる自己位置同定機能を実現してきた²⁾。しかし、現在の自己位置同定方法は事前の地図作成に多くの時間と労力を必要とし、また、運用施設や走行経路が変化した場合には、地図の再作成に加えて、自己位置同定に関するプログラム修正も必要になるという課題があった。

そこで本研究では、運用施設や走行経路が変化した場合でも柔軟に対応できる自己位置同定機能の実現を目的として、カメラからの画像情報を利用して走行経路の上下左右の情報を記録した二次元時空間画像を作成し、これを用いて自己位置同定を行う方法を開発した。本報告では、開発した自己位置同定方法の概要と、廊下および室内通路に適用した実験結果等について報告する。

2. 経路展開画像と自己位置同定方法³⁾

2.1 経路展開画像と経路射影配列

カメラを搭載したロボットが廊下の中央を走行する場合、進行方向に向けたカメラからは図1のような画像が得られる。この画像のP-Q, R-S, P-R, Q-Sを結んだ幅一画素分の一次元画像だけを、ロボットを等速で走行させながら逐次記録していくと、図2に示す二次元時空間画像を作成できる。本画像では、P-Qの記録結果に天井の蛍光灯列が、S-Rの記録結果に廊下の床面が、また、P-RとQ-Sの記録結果に左右の壁面に存在するドアや消火器が記録されていることがわかる。本報告では、図2が廊下を直方体に見立てた場合の展開図に似ていることから、このようにして得られる二次元時空間画像を経路展開画像と呼ぶことにする。



図1 廊下走行時にカメラから得られる画像

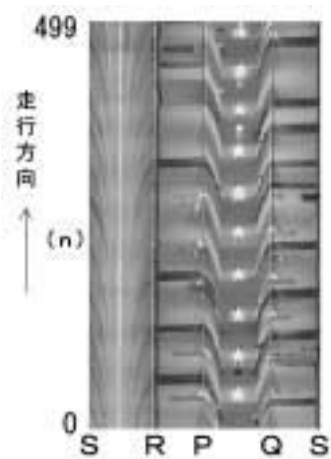


図2 経路展開画像

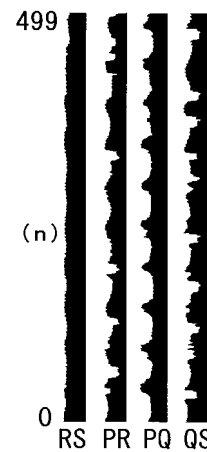


図3 経路射影配列

また、経路展開画像から、R-S, P-R, P-Q, Q-S方向の射影を計算して作成した、図3に示す4つの一次元配列を経路射影配列と呼ぶことにする。

2.2 自己位置同定方法

経路展開画像を用いた自己位置同定方法の概略を図4に示す。本方法では、事前に作成した経路展開画像をロボットに記憶させておき、自律走行時に同様の方法で得られる経路展開画像と比較を行うことによって、経路長手方向の自己位置同定を行う。この際、経路展開画像そのものを用いて自己位置同定計算を行ってもよいが、図3に示すような4つの一次元配列に情報を圧縮して計算を行うと、自己位置同定に伴う計算量をより削減することができる。

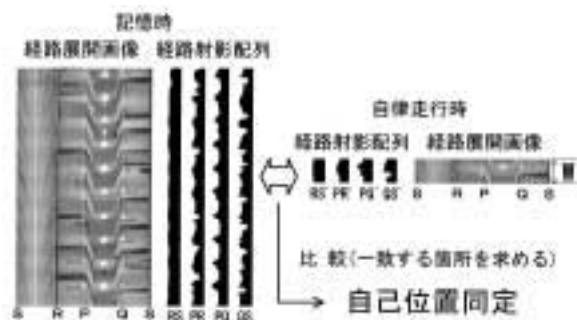


図4 自己位置同定方法

2.3 経路射影配列を用いた自己位置同定計算方法

事前に作成し、ロボットに記憶させた4つの経路射影配列を $PQ[n]$, $RS[n]$, $PR[n]$, $QS[n]$ とする。一方、自律走行時の時刻 t に同様の方法で得られた経路射影配列を $PQ[t]$, $RS[t]$, $PR[t]$, $QS[t]$ とする。図4に示すように、自律走行時の時刻 t において、長さ W の経路射影配列が得られた場合、(1)式によって全ての n について誤差 $E(t, n)$ を計算する。次に、誤差 $E(t, n)$ が最小となる n の値 n_{min} を求め、これを時刻 t でのロボットの位置とする。

$$E(t,n) = \frac{1}{W} \sum_{w=0}^{W-1} \left\{ \begin{array}{l} |PQ[n-w] - PQ[t-w]| / X \\ + |RQ[n-w] - RQ[t-w]| / X \\ + |PR[n-w] - PR[t-w]| / Y \\ + |QS[n-w] - QS[t-w]| / Y \end{array} \right\} \quad (1)$$

但し、XはP-Q,R-S上の画素数、YはP-R,Q-S上の画素数。

2.4 本方法の特長

経路展開画像は、カメラを備えたロボットを一度走行させるだけで簡単に作成できるため、運用施設や走行経路が変化した場合でも、容易に更新や追加を行える。また、走行経路の状態が時々刻々と変化するような場合でも、自律走行の度に経路展開画像を更新させることで対応できる。さらに、経路展開画像が変更された場合でも、自己位置同定の計算方法に修正を加える必要はない。

以上の他、本方法は次のような特長も有する⁴⁾。

- ・一台のCCDカメラで自己位置同定を行える。
- ・経路射影配列だけでも自己位置同定が可能なので、少ない記憶容量でロボットに実装できる。
- ・初期位置が不明であっても、走行を行うことによって自己位置同定が可能になる。
- ・カメラを進行方向に向けたままで良いので、経路上の障害物検出等を画像処理で行いながら、同時に自己位置同定を行える。

3. 廊下での自己位置同定実験

本章では、経路展開画像を用いた自己位置同定方法を廊下を走行するロボットに適用した実験結果について述べ、本方法が廊下下手方向の自己位置同定に有効であることを示す。

3.1 経路展開画像と経路射影配列

工業試験場研究棟3階廊下において、本方法による自己位置同定実験を行った。図1は、廊下を走行する際にカメラから得られる画像の一例である。また、2.1の方法により、廊下50mの区間を10cm間隔で記録して得られた経路展開画像が図2である。そして、図2から作成した経路射影配列が図3である。

3.2 自己位置同定実験

記憶用の経路射影配列を作成した後、同一経路をロボットに再走行させて、自己位置同定実験を行った。図5の左側が、ロボットに記憶させた経路展開画像と経路射影配列、右側が再走行時に取得した経路展開画像と経路射影配列である。再走行時は、t=80, 180, 280, 380, 480の計5箇所においてW=50の経路射影配列を取得し、(1)式を用いて自己位置同定計算を行った。本実験では、画像の記録間隔が10cmであ

るので、W=50は自律走行時に約5m分の経路射影配列が得られた場合に相当する。

図5の各時刻における誤差E(t, n)の計算結果を図6に示す。5箇所全てにおいて、誤差E(t, n)を最小にするn_{min}が求まっており、t=80の時n_{min}=80、t=180の時n_{min}=180というように、良好な自己位置同定結果が得られていることがわかる。

一方、図7は全てのtについてW=50として誤差E(t, n)

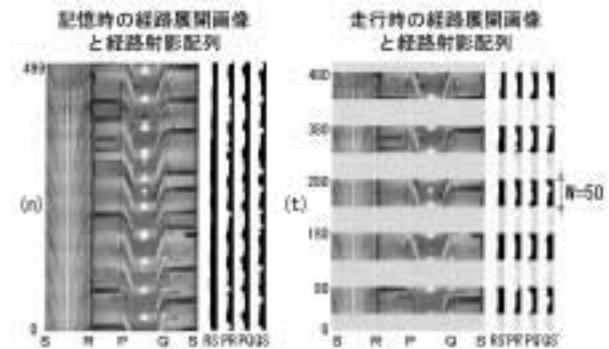


図5 記憶時・走行時の経路展開画像と経路射影配列

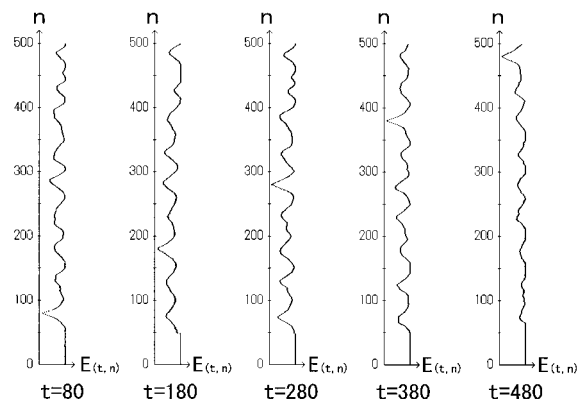


図6 各時刻における自己位置同定結果

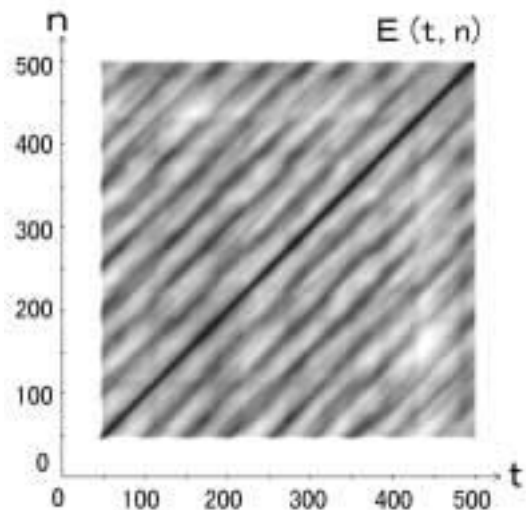


図7 誤差E(t, n)の計算結果

を計算し、 $E(t, n)$ の大きさを濃淡で表示した結果である。同図は表示が暗いほど $E(t, n)$ が小さいことを表しており、最も暗い部分に対応する n が時刻 t での n_{min} に相当する。同図より、 t が増加するに従って n_{min} も増加していくことがわかり、図6に示した5箇所以外でも自己位置同定に有効な n_{min} が求まることを確認できた³⁾。

以上の実験結果より、当場の廊下の場合には、自律走行時に5m分以上の経路射影配列を取得できれば、自己位置同定が可能であることがわかった。

4. 室内通路での自己位置同定実験

本章では、経路展開画像を用いた自己位置同定方法を室内を走行するロボットに適用した実験結果について述べる。実験は異なる部屋の2つの室内通路について行い、その結果として、本方法が、室内通路長手方向の自己位置同定にも有効であることを示す。

4.1 室内通路での自己位置同定実験—その1—

4.1.1 経路展開画像と経路射影配列

工業試験場研究棟1階事務室の通路において、本方法による自己位置同定実験を行った。室内通路をロボットが走行する様子を図8に、ロボットが走行する際、カメラから得られる画像の一例を図9に示す。

2.1と同様の方法により、室内通路10.77mの区間を3cm



図8 走行の様子



図9 カメラからの画像の例

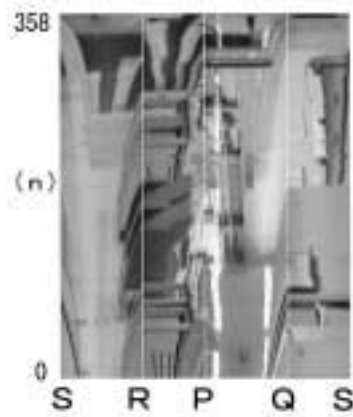


図10 経路展開画像

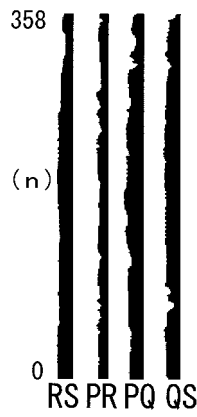


図11 経路射影配列

間隔で記録して得られた経路展開画像を図10に示す。廊下を走行した場合には、天井、床面、右壁、左壁の情報を記録した経路展開画像が得られていたが、室内の場合には直感的な把握が難しい記録結果となっている。図11は図10の経路展開画像から作成した経路射影配列である。

4.1.2 自己位置同定実験

記憶用の経路射影配列を作成した後、同一経路をロボットに再走行させて、自己位置同定実験を行った。図12の左側がロボットに記憶させた経路展開画像と経路射影配列、右側が再走行時に取得した経路展開画像と経路射影配列である。再走行時は、 $t = 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350$ の計7箇所において $W = 17$ の経路射影配列を取得し、(1)式を用いて自己位置同定計算を行った。本実験では画像の記録間隔が3cmであるので、 $W = 17$ は自律走行時に約50cm分の経路射影配列が得られた場合に相当する。

図12の各時刻における誤差 $E(t, n)$ の計算結果を図13に示す。7箇所全てにおいて $E(t, n)$ を最小にする n_{min} が求まっており、 $t = 50$ の時 $n_{min} = 50$ 、 $t = 100$ の時 $n_{min} = 100$ というように、良好な自己位置同定結果が得られていることがわかる。

一方、図14は全ての t について $W = 17$ として誤差 $E(t, n)$ を計算し、 $E(t, n)$ の大きさを濃淡で表示した結果である。図7同様、表示が暗いほど $E(t, n)$ が小さいことを表しており、最も暗い部分に対応する n が時刻 t での n_{min} に相当する。同図より、 t が増加するに従って n_{min} も増加していくことがわかり、図13に示した7箇所以外でも自己位置同定に有効な n_{min} が求まることを確認できた⁵⁾。

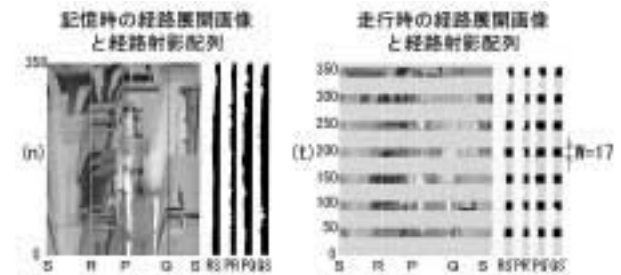


図12 記憶時・走行時の経路展開画像と経路射影配列

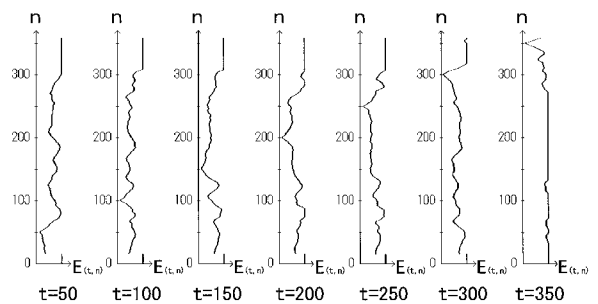


図13 各時刻における自己位置同定結果

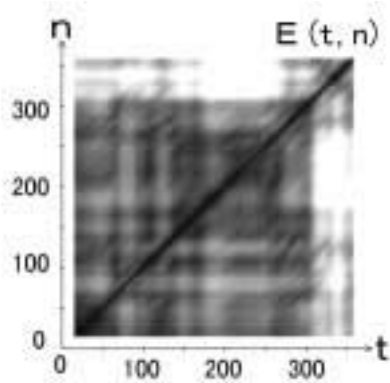


図14 誤差 $E(t, n)$ の計算結果

以上の実験結果から、本室内通路の場合には、自律走行時に50cm分以上の経路射影配列を得ることができれば、自己位置同定が可能であることがわかった。

4.2 室内通路での自己位置同定実験—その2—

4.2.1 経路展開画像と経路射影配列

工業試験場研究棟3階研究員室の通路において、本方法を用いた自己位置同定実験を行った。本室内の通路をロボットが走行する様子を図15に示す。また2.1と同様の方法により、10.05mの区間を3cm間隔で記録して得られた経路展開画像を図16に示す。図17は、図16の経路展開画像から作成した経路射影配列である。図10、図11と比較することにより、4.1の室内とは全く異なる経路展開画像と経路射影配列が得られていることがわかる。

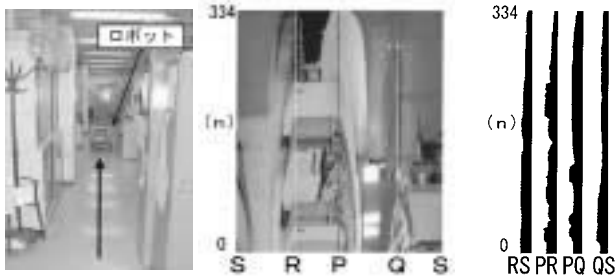


図15 走行の様子 図16 経路展開画像 図17 経路射影配列

4.2.2 自己位置同定実験

記憶用の経路射影配列を作成した後、同一経路をロボットに再走行させて、自己位置同定実験を行った。図18の左側が、ロボットに記憶させた経路展開画像と経路射影配列、右側が再走行時に取得した経路展開画像と経路射影配列である。再走行時は、 $t = 50, 100, 150, 200, 250, 300$ の計6箇所について $W = 17$ の経路射影配列を取得し、(1)式を用いて自己位置同定計算を行った。4.1.2同様、 $W = 17$ は約50cm分の経路射影配列が得られた場合に相当する。

図18の各時刻における誤差 $E(t, n)$ の計算結果を図19に

示す。6箇所全てにおいて $E(t, n)$ を最小にする n_{\min} が求まっており、自己位置同定が可能であることがわかる。

一方、図20は全ての t について $W = 17$ として誤差 $E(t, n)$ を計算し、 $E(t, n)$ の大小を濃淡で表示した結果である。図14同様、表示が暗いほど $E(t, n)$ が小さいことを表しており、最も暗い部分に対応する n が時刻 t での n_{\min} に相当する。同図より、 t が増加するに従って n_{\min} も増加していき、図19に示した6箇所以外でも自己位置同定に有効な n_{\min} が求まることを確認できた⁵⁾。

以上の実験結果から、室内の環境が異なると、取得される経路展開画像と経路射影配列は異なるが、本室内通路においても、自律走行時に50cm分以上の経路射影配列を得ることができれば、自己位置同定が可能であることがわかった。

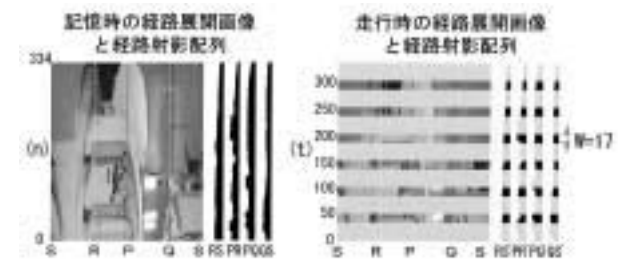


図18 記憶時・走行時の経路展開画像と経路射影配列

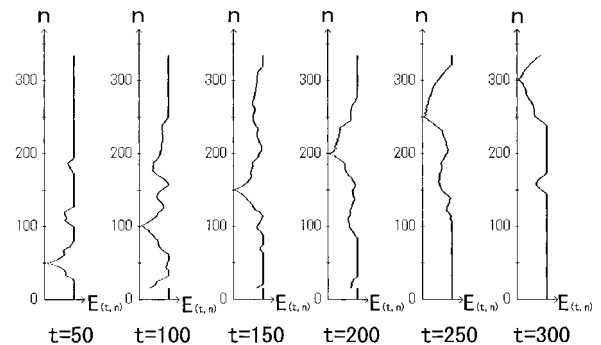


図19 各時刻における自己位置同定結果

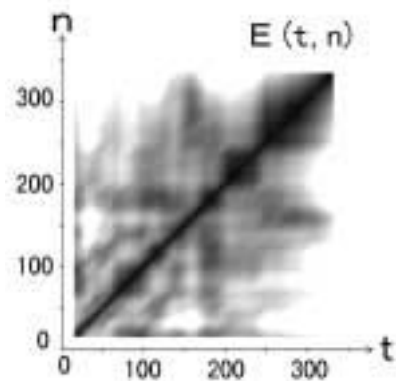


図20 誤差 $E(t, n)$ の計算結果

5 . 経路展開画像を用いた各種応用実験

第3章,第4章において,経路展開画像を用いた自己位置同定方法が,廊下,室内通路の両方に有効であることを示した。本章では,走行中に画像を取得できなかった場合や,ロボットの姿勢や走行位置が変化した場合等について行った各種の実験結果について報告する。なお,各実験は全て当場の廊下を走行経路として行っているが,図2からわかるように,当該廊下の床面には自己位置同定に有効な情報が存在しないため,以下では床面の情報を除いた経路展開画像を用いて実験を行っている。

5.1 一部区間で経路展開画像を取得できなかった場合

図21は,自律走行中, t_1 から t_2 の区間でロボットに搭載したカメラを覆い,画像の取得を阻害した場合の記録結果である。このような場合,ロボットは時刻 t_1 から t_2 の区間で自己位置を見失うことになるが, t_2 以降,再度画像を取得することで,自己位置同定が可能になる³⁾。

5.2 ロボットの姿勢が一時的に変化した場合

図22は,自律走行中,4箇所ではロボットの水平姿勢を一時的に左右に傾けた場合の記録結果である。図22に示すように,姿勢が変化した4箇所では,経路展開画像が乱れる結果となるが,経路射影配列の計算結果に大きな影響は生じず,自己位置同定は可能という結果が得られた³⁾。

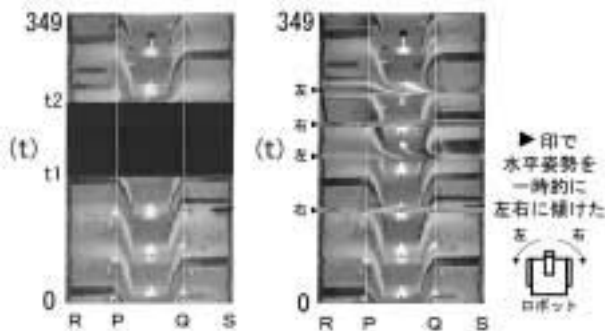


図21 一部区間で画像を取得できなかった場合

図22 ロボットの姿勢が一時的に左右に傾いた場合

5.3 往路・復路の経路展開画像を用いた走行方向の推定

図23は,同じ廊下のX-Y間を往復した場合の2つの経路展開画像である。同図より,同じ廊下を走行した場合でも走行方向が異なると経路展開画像に違いが生じることがわかる。この特徴を利用して,ロボットに往路・復路の2方向の経路射影配列を記憶させておき,自己位置同定を行わせると,自己位置だけでなく走行方向も推定できることを実験により確認している⁶⁾。

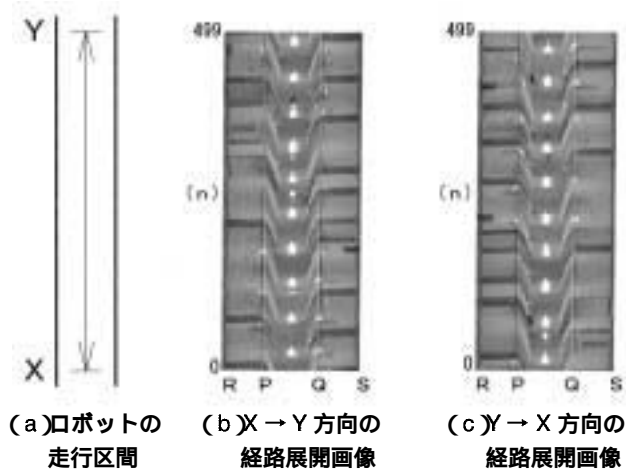


図23 往路と復路の経路展開画像

5.4 記憶時と異なる経路を走行した場合

図24(a)~(d)はそれぞれ,(a)廊下の中央を直進した場合,(b)廊下の右側を直進した場合,(c)廊下の左側から中央に向かって斜行した場合,(d)中央-右側-中央-左側-中央とS字状に蛇行した場合の記録結果である。(a)~(d)を比較すると,天井の蛍光灯はほぼ同じ間隔で記録されているが,左右の壁にあるドア等が記録される位置はそれぞれ異なっていることがわかる。このような場合,(1)式をそのまま適用して自己位置同定を行うことはできないが,同式に修正を加え,天井,右壁,左壁毎に別々に経路射影配列の比較を行うことによって,図25に示すような計算結果の軌跡を得ることができる⁷⁾。同図は,各時刻 t において,天井の経路射影配列から求めた位置の両側に,左壁の経路射影配列から求めた位置と右壁の経路射影配列から求めた位置が得られる様子を示しており,これらの結果を総合して判断することによって,廊下下手方向の自己位置同定が可能になることを確認している。また,ロボットが斜行や蛇行をした場合,天井,右壁,左壁毎に求めた位置が図25のように変化することから,これらの相対関係や時間的変化を利用することによって,廊下下手方向のロボットの位置やロボットの姿勢も推定できる見通しを得ている⁷⁾。

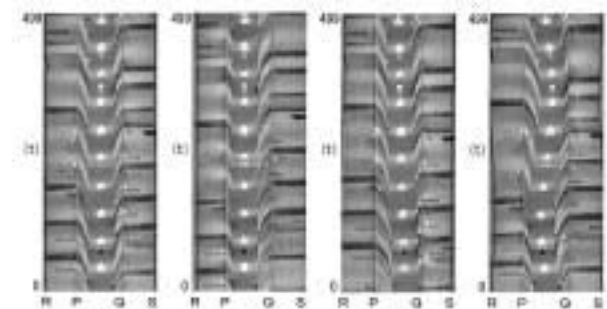


図24 走行位置を変化させた場合の記録結果
(a)中央を直進 (b)右側を直進 (c)左側から中央へ斜行 (d)S字状に蛇行

図24 走行位置を変化させた場合の記録結果

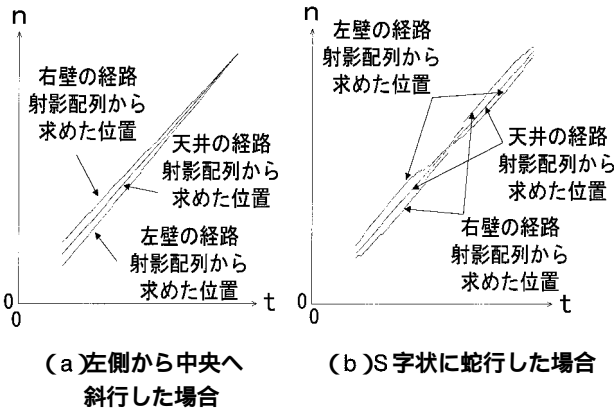


図25 天井，左壁，右壁毎に位置を計算した結果

6. おわりに

運用施設や走行経路が変化した場合でも柔軟に対応できる自己位置同定機能の実現を目的として、1台のカメラを利用して走行経路の上下左右の情報を記録した経路展開画像を作成し、自己位置同定を行う方法を提案した。

本方法を開発中のロボットに実装し、工業試験場内の廊下および室内で実験を行った結果、廊下の場合には10cm間隔で5m分の経路展開画像を取得することによって、室内の場合には3cm間隔で50cm分の経路展開画像を取得することによって、それぞれ自己位置同定が可能であるという結果を得た。また、走行中に画像を取得できなかった場合や、ロボットの姿勢や走行位置が変化した場合等について行った各種の実験結果についても記し、本手法の特長を示した。

今後は、本方法を実装したロボットを、工業試験場以外の施設で実験的に運用し、その有効性を確認することが必要と考えている。

引用文献

- 1) 吉川 毅・橋場参生ほか6名：福祉施設における自律型運搬ロボットの開発(第2報)－実地評価試験－，北海道立工業試験場報告，No.299，pp.105-110，(2000)
- 2) 吉川 毅・橋場参生ほか6名：福祉施設における自律型運搬ロボットの開発(第1報)－全体システムの構成－，北海道立工業試験場報告，No.299，pp.95-104，(2000)
- 3) 橋場参生・吉川 毅・本間稔規・鈴木慎一：画像情報を用いた屋内移動ロボットのナビゲーション－移動経路の展開画像を用いた自己位置同定－，第16回日本ロボット学会学術講演会論文集，pp.1603-1604，(1998)
- 4) 橋場参生・吉川 毅・本間稔規・鈴木慎一：単眼視による移動ロボットのための3次元地図作成方法，第15回日本ロボット学会学術講演会論文集，pp.203-204，(1997)
- 5) 橋場参生・吉川 毅・鈴木慎一：二次元時空間画像および超音波センサを用いた屋内移動ロボットの自己位置同

定実験，第19回日本ロボット学会学術講演会論文集，pp.1017-1018，(2001)

- 6) 橋場参生・吉川 毅・本間稔規・鈴木慎一：画像情報を用いた屋内移動ロボットのナビゲーション－経路展開画像による自己位置推定と自律移動－，第17回日本ロボット学会学術講演会論文集，pp.227-228，(1999)
- 7) 橋場参生・吉川 毅・鈴木慎一：画像情報を用いた屋内移動ロボットのナビゲーション－経路展開画像による自己位置同定手法の実験的検討－，第18回日本ロボット学会学術講演会論文集，pp.337-338，(2000)