2台のカメラを用いたAGVナビゲーションのための 人工ランドマークの配置計画法と観測計画法*

太田 順** 藤本智也*** 鬼頭朋見+ 新井民夫** 植山 剛** 西山強志**

Locational Planning and Observation Planning of Artificial Landmarks for AGV navigation using Two Cameras

Jun OTA, Tomoya FUJIMOTO, Tomomi KITO, Tamio ARAI, Tsuyoshi UYEYAMA and Tsuyoshi NISHIYAMA

This paper proposes AGV (Automated Guided Vehicle) navigation methodology by using two cameras and artificial landmarks. This method doesn't need high cost sensors and doesn't have to model motion errors of AGV. It is proposed that (a) a landmark arrangement planning algorithm in a given working environment of the AGV, and (b) a landmark observation planning algorithm along a given path of the AGV. Navigation experiments with a real AGV show the effectiveness of the proposed methodology.

Key Words: mobile robot navigation, artificial landmarks, observation planning, locational optimization

1 はじめに

生産現場における搬送装置の一つとして無人搬送車 (Automated Guided Vehicle, AGV) が広く普及している。そのナビゲーション手法としては(a)フルガイド方式, (b)レーザナビゲータ方式, (c)天井カメラ方式等が提案されている。(a)の「フルガイド方式」とは、磁気テープなどのガイドを走行経路全域に沿ってあらかじめ施工し、AGVに搭載した磁気センサを用いてナビゲーションする方式である¹⁾。この手法は信頼性が高いが、新たな搬送経路の導入には経路全域に渡りガイドを敷設しなおす必要があり、柔軟性に問題がある。(b)はAGVの走行環境の壁部にレーザの反射体を貼付し、AGVからレーザを発射して、その反射光をとらえることでナビゲーションする方法である²⁾。この方式はレイアウトの自由度が高く、信頼性も高いが、設備導入コストが高い短所を有する。(c)はAGVが走行する領域を俯瞰する天井部にカメラを設置し、移動ロボットの位置を計測しつつナビゲーションする手法である³⁾。この手法はAGVの走行領域が広くなるにつれて必要なカメラの個数が多くなり、コストの観点から問題がある。このように、従来広く用いられているAGVのナビゲーション手法には問題点が存在する。

筆者らはAGVの作業環境内の適切な位置に人工的なランドマークを敷設し、AGV上に搭載したCCDカメラで観測することで自己位置を同定しナビゲーションする手法を提案してきた⁴⁾。この手法は、安価で汎用的なセンサであるCCDカメラのみをAGV用位置決め用センサとして利用し、作業環境内の適切な場所にランドマーク配置設計を行うことにより

環境内の任意の2地点間のナビゲーションが可能である。ノイズから識別容易なランドマークを用いることが可能であるため、系としてのロバストネスが高い、という利点を有していた。しかしながら、単一のランドマークの観測情報のみからカメラ・ランドマーク間の相対位置姿勢を算出するため、急な角度からランドマークを計測する時の姿勢計測誤差が大であり、ナビゲーション性能が悪かった。また、カルマンフィルタを用いたナビゲーションを行っていたため、AGVの走行誤差の正確なモデル化が必要であるが、実機の誤差パラメータの同定が困難であった。

本研究では、上記の問題点を解決するナビゲーション手法の構築を目的とする。本研究では以下のアプローチを採用する。AGVにカメラを2台搭載し、各カメラがそれぞれ一つのランドマークを常時トラッキングしつつ、相対距離のみを計測する (Fig. 1)。カメラを2台用いることによりAGVの自己位置が常時わかりそれに基づきナビゲーションする方法論である。常にランドマークを監視しているため、走行誤差のモデル化が不必要であるという利点も有する。

Fig.1 AGV navigation methodology by using two cameras

* 原稿受付 平成14年4月15日

** 正会員 東京大学大学院工学系研究科 (東京都文京区本郷7-3-1)

*** 東京大学大学院 (現、(株)本田技術研究所; 栃木県芳賀郡芳賀町下高根沢4630)

+ 東京大学大学院

** (株)デンソーウエーブ (刈谷市昭和町1-1)

ここでは以下の問題を解決する必要がある。(a) 作業領域内のすべての場所から常に最低二つのランドマークを観測できるランドマーク配置計画法。(b) ある決められた経路に沿ってナビゲーションする際に、どのランドマークを観測するかを計画を立てるランドマーク観測計画法。(a)については、急角度、遠距離からでも観測可能な人工ランドマークの形状設計とランドマーク配置計画、(b)についてはグラフ理論に基づくランドマーク切り替え回数最小化観測計画手法を提案する。

研究第一ステップとしての本研究の目標位置決め精度としては、ナビゲーション後に別の作業実現が可能であるための50mm以下と設定する。また、ここではAGVの自己位置同定に基づくナビゲーションに焦点を絞り、未知障害物の回避手法については扱わない。

2 提案システムの概要

2台のカメラを用いた計測原理は、Fig. 2に示す通りAGV上に搭載したカメラ・ランドマーク間の相対距離 d_1, d_2 及びカメラとAGVのなす角 θ_1, θ_2 から自己位置を同定する。計測値に基づく四つの拘束式から x, y, θ の三変数を求める。これよりAGVは常に自己位置計測が可能となる。ここでは、以下の手順でシステム構築を図る。

● ランドマーク配置計画

AGVが作業する環境地図(Fig.3(a))が与えられた時、ロボットがどのような経路を走行しても常に2つのカメラが別々のランドマークをトラッキング可能でなければいけない。この条件を満たすランドマークを環境内の適切な位置に設置するランドマーク配置計画問題を解く(Fig.3(b))。

● ランドマーク観測計画

AGVの初期位置と目標位置を結ぶ軌道を決定した後、どの瞬間にどの2つのマークをトラッキングすれば良いかというランドマーク観測計画を立てる必要がある(Fig.3(c))。

● ランドマークトラッキングにもとづく実際の走行

AGVの走行中、上記の観測計画に基づき観測をし、自己位置計測をしつつ目標位置まで走行する。これをロボットのナビゲーション問題と呼ぶ(Fig.3(d))。

本研究では、2地点を結ぶ経路計画と計画軌道に追従する制御手法としては既存の方法⁷⁾を改良して用いる。

Fig. 2 Principle of self-localization

3 実験システムとランドマークの選定

3.1 実験システム

本研究で用いる実験システムについて述べる。AGVとして(株)デンソー製4DW4S(4 Driving Wheel 4 Steering)型移動台

車(縦1018mm 横618mm)を採用した。カメラはソニー製カメラEVI-D30(水平画角:44.8°,ズーム最大12倍,パン角度水平±100°,最大回転速度80°/秒,オートトラッキング機能付き)2台を、画像処理ボードは(株)日立製IP5005を使用した。概観をFig.3に示す。2台のカメラはAGVの側面部に互いに正反対の向きに設置した。

(a) Initial situation

(b) Landmark arrangement planning

(c) Mark selection planning

(d) AGV navigation

Fig. 3 Robot navigation process

Fig. 4 Camera-mounted AGV System (Denso CO.)

3.2 人工ランドマークの選定

従来多くの人工ランドマークが提案されてきた⁷⁾が、本研究では、カメラとの相対距離が測定可能でシンプルである、広い角度から歪なく計測できる、という観点から半円筒型のランドマークを利用する(Fig.5)。このマークの画像内での高さ計測により距離を導出する。色は自然画像からの分離抽出がしやすいシアンを採用した。ランドマークの形状とカメラ自身のズーム機能の利用により、ランドマークの計測エリアは、ランドマーク正面に対して構成する角度が±90°,相対距離に関しては、0.6mから5mの範囲で計測可能であり、広いレンジの距離、角度からの距離計測が可能となった。Fig.6に、ランドマークを正面から計測した際の距離と計測精度の関係を示した計測結果の例を示す。マークの見えの大きさに

radius=60mm, height = 200 mm

Fig.5 Proposed landmark

Fig. 6 Relationship between measured distance and errors

Fig. 7 Working environment and landmark location

応じて 5 段階のズームをすることで、ほぼ目標精度を満たしていることがわかる。

4 ランドマーク配置法の提案

作業環境の外形が与えられた時に、どの場所においても 2 台のカメラにより別々のランドマークをトラッキング可能とする配置を求める。最適配置理論⁹⁾を用いて当該問題の解決を図る。同様なランドマーク配置問題は著者らの既論文⁴⁾⁹⁾でも扱われているが、ここでは(a)常に二つのランドマークを観測しなければならない点、(b)AGV やカメラのコンフィグレーションを考慮したランドマーク配置が必要な点、が特徴である。そこで以下の方法を採用。(1)まず AGV の大きさ、AGV 上のカメラ設置場所、方向を規定する。(2)作業環境内で AGV が走行する領域をグリッドで切る。AGV がとりうる姿勢ならびに壁上でランドマークを設置できる場所も離散化する。この結果、ランドマーク配置計画は制約条件つき離散最適化問題として定式化できる。

・ 評価関数

$$Q_1 = \text{count}(P_m) \rightarrow \min \quad (1)$$

・ 制約条件

$$P_m = \{p_m | \forall p_c \in P_c, \forall i (i = 1, 2), \exists p_m \in P_m, n_i(p_m, p_c, i) = 1\} \quad (2)$$

ただし、 P_m ：ランドマーク配置候補点集合、 p_m ：ランドマーク配置候補点、 P_c ：カメラの走行位置候補点集合、 p_c ：カメラの走行位置・姿勢候補点、 $n_i(p_m, p_c, i)$ ：AGV の位置・姿勢が p_c である時にカメラ i の観測領域内にランド

マーク p_m が含まれている時には 1 を、含まれていない時には 0 を返す関数、count:集合中の要素数を返す関数

式(1)はランドマーク数を最小化する評価関数である。ランドマーク数の増大は、ランドマーク設置コスト増大やカメラによる観測時に複数個存在するランドマーク誤認識の危険性の増大を招くため、避ける必要がある。式(2)は作業環境中の全ての地点において、カメラがランドマークを最低でも 1 つずつトラッキング可能でなければならないという条件であり、要求仕様を表している。

上記の条件のみでは解が一意に定まらない時には、解が一意に定まるまで「制約条件を最低限満足するだけの走行位置候補点数の最小化」、「各走行位置において観測可能なランドマーク数の総和の最大化」なる評価関数を順に評価していき解を導出する。

当該問題を解く上において、Fig.7 に示す 4[m]×6[m]の長方形領域で障害物(ついでに)が二つある環境という問題設定(ランドマーク候補点数が 20 個、位置・姿勢候補点総数が 448 個)では、PC (866MHzCPU)を用いて全探索をした場合でも 4 分弱で解を得ることができたため、ヒューリスティクスを適用しなかった。より複雑な環境に対しては、遺伝的アルゴリズム等のメタヒューリスティクスを用いたアルゴリズムの改良が必要である。Fig.7 に 7 つのランドマークが環境内に配置された結果も示す。スクリーンの近傍にランドマークが配置されているのは、その場所の近くではスクリーンに遮蔽されて他のランドマークが見にくいためであると考えられる。このように直感的にも妥当な配置計画がなされていることがわかる。

5 ランドマーク観測計画

5.1 観測計画アルゴリズムの概要

AGV の初期位置と目標位置が定まったときに、その間を結ぶ経路はクロソイド曲線等を用いて生成する。一般に経路上のすべての場所において、あるカメラが同一のランドマークを監視し続けるのは不可能である。このため、どのタイミングでどのランドマークを観測するかをランドマーク観測計画が重要である。この課題に対し、従来は計画アルゴリズムのみの提案はなされている¹⁰⁾ものの、実ロボットに適用する際のコストの実装方法や首振り動作自体に要する時間の評価方法について述べられておらず、そのまま用いることができない。

5.2 ランドマーク観測計画アルゴリズム

本研究では、ナビゲーションの失敗を最小限に抑える観測計画の構築を目指す。ナビゲーション時には、ランドマーク切り替え回数が成功率に最も影響を与える。ここでは、評価関数としてランドマーク切り替え回数を設定した最適化問題として定式化し、グラフ理論の最短路解法をベースに解を求める。以下の手順から構成される観測計画により、「ランドマーク切り替え開始タイミング」と「カメラを向ける方向」の二つを決定し、ナビゲーションする。

(0) AGV の時間軌道の付与

(1) AGV が軌道上を走行する際の各カメラに対する各ランドマークの観測可能性の検証及びグラフ表現

(2) グラフ探索によるランドマークの切り替えタイミング算出

(3) AGV のナビゲーション

(1) では、AGV の目標時間軌道が与えられた時、AGV のサンプリング時間に合わせて経路を離散化する。各時刻におけるカメラ 1, 2 の目標位置・姿勢が算出できるため、それぞれから観測できるランドマークの集合が抽出される。サンプリング時間おきに計算していくことにより、カメラ 1, 2 が観測できるランドマークが、経路上のどの時刻からどの時刻の間かが計算できる。

(2) では、カメラ 1, 2 それぞれに対して探索木を生成する。連続したサンプリング時刻で全く同じランドマークが観測可能ときには、それらをランドマーク毎にひとつのノードと考える。連続した時間で観測可能なノード同士をコスト 0 のアークで結ぶ。同一時間帯において相互に観測可能なランドマーク番号に対応するノード同士をコスト 1 のアークで結合する。この時、初期状態からコスト最小で目標状態に到達するランドマーク切り替え手順を、Dijkstra の探索手法を用いて獲得する¹¹⁾。この結果、切り替え回数を最小化するランドマーク観測手順が求まる。例えば Fig. 8 の場合、縦線に相当するアークのコストを 1 とし、横線に相当するアークのコストを 0 としている。AGV はランドマーク N-2 を見た後、ランドマーク 0, N を見る観測計画を建てる。ただしここで以下のことに注意しなければならない。すなわち、ランドマークの切り替え時にはカメラを回転させる必要があるが、回転角に応じて回転に要する時間が定まる。ある時刻で回転を開始したときに、その定まった時間後に次のランドマークが観測可能であるかどうかをチェックし、それが観測可能であればその時刻にカメラ切り替えを開始することが可能である。また同時にカメラの目標方向を決定できる。もし観測不可能である場合には、すなわち次の候補となっているランドマークがそのカメラにとって非常に短い時間しか見えないため、その時刻に切り替えを開始してはならないことを意味する。よって対応する切り替え時間においてアークを切ることを意味する。その場合は、切り替え開始時刻が早まる計画が立てられる。これよりランドマーク観測計画が完了した。

Fig. 8 Graph representation and minimal cost path

Fig. 9 Experimental environment and planned path [m]

Fig. 10 Final result of landmark observation planning

Fig. 9 に示す環境は、Fig. 7 でランドマーク配置を行った環境と同一である。周縁部の半円についている数字はランドマークとその番号を示している。その環境内で初期位置の座標値 (1.0m, 2.6m) より、ゴール位置の座標値 (5.5m, 2.6m) まで、速度 0.1m/sec で直進する経路が与えられた時のランドマーク観測計画を行う。なお、サンプリング時間を 50msec とした。(1) に示すグラフ表現を各カメラに対して行う。Fig. 10(a) が AGV 進行方向左側方についているカメラ 1 に関するグラフであり、Fig. 10(b) が AGV 進行方向右側方についているカメラ 2 に関するグラフである。例えば Fig. 10(a) のグラフからは、カメラ 1 から当初ランドマーク 3 のみが見え、進むにつれて 1 と 3 が見え、次に 1, 2, 3 が見え、1 と 2、最後に 0, 1, 2 が見える状況がわかる。ここで、本研究で用いるカメラについて基礎実験を行った結果、(首振り時間 [秒]) = $0.73 \times (\text{首振り角度} [\text{rad}]) + 0.43$ という関係が得られた。その情報を用いつつグラフ探索を行い、Table 1 に示す結果が得られた。Fig. 10 の太線部に対応するランドマーク 3 から 1 に首振りをする計画が最もランドマーク切り替え回数が少ないことがわかる。カメラ 2 に対しても同様な手続きにより結果が得られた。この場合においては、カメラ 1, 2 共に 1 回ずつランドマーク切り替えを行っている。この例において軌道決定後、すべてのランドマーク観測計画が終了するのにかかった時間は数秒程度であり、問題がないことがわかる。

Table 1 Timing planning of landmark changing process

	Camera 1	Camera 2
Landmark change	No.3 → No.1	No.4 → No.6
Rotation-starting position x[m]	2.44	4.30
Rotation-starting position y[m]	2.60	2.60
Rotation angle [rad]	-0.85	0.21

6 走行実験

ランドマーク観測計画を行った例と同じ条件でナビゲーション実験を行った。ランドマークは設計により求められた場所にカメラと同じ高さに設置した。

ナビゲーションは、前述の通り金山の手法⁹⁾をベースに行った。Fig. 11 にブロック図を示す。センサ遅れ補償器 (Sensor delay compensator) とは、カメラが画像を取得してから位置検出までの時間遅れが約 0.35 秒あるため、AGV のオドメトリ

情報を用いて自己位置情報の補間を行う部分である。この部分は特にランドマーク切り替え時に大きな意味を持つ。機構変換器 (Transference mechanism exchanger) は金山の手法で想定している 2 輪速度差方式機構における指令値を、本研究で用いた 4WDS 機構へのものに変換する部分である。

Fig. 12 に AGV の目標軌道と、自己位置推定値、実際の走行経路の比較を示す。なお実際の走行経路は走行時の状況をビデオで撮影し、その後位置情報を抽出することにより得た。図中縦のスケールが横のスケールの 6 倍になっていることに注意されたい。Fig. 12 において、以下の考察ができる。

- 実走行結果と自己位置推定結果の傾向が似ており、例えば $x=3.5\text{m}$ の辺りで両者とも $y>0$ の方向に誤差が生じている事も分かる。このため、ランドマーク計測により自己位置が正しく更新されていると言える。その情報に基づき軌道追従制御を行っているため、目標軌道に滑らかに追従している。また適切なランドマーク観測計画の導入により、AGV の走行誤差があっても、適切なランドマーク切り替えが実現できた。これより、提案システムの有効性が確認できた。
- 推定位置が断続的に変動している理由としては、センサ遅れ補償器においてオドメトリに基づく自己位置推定値がランドマーク計測により更新されるためである。自己位置推定値の大きな揺らぎは必ずしもランドマーク切り替え時のみではないので、ランドマーク設置誤差のみならず距離計測値の誤差も自己位置同定精度に影響していると考えられる。
- 推定結果と実走行軌道間に差が生じた要因としては、先に示したカメラによる自己位置同定誤差の影響、AGV の実際の走行経路の計画軌道からの最大ずれは、 $x=3.5\text{m}$ 付近で、およそ 80mm であった。また最終位置において、要求精度である 50mm 以下の位置決めが可能であった。

これらの結果より、ゴール到達が確認され、提案手法の有効性が示された。走行途中の 80mm の誤差は、ランドマーク設置誤差の低減、ランドマーク形状のより正確な設計、カメラパラメータのより正確な同定をすることにより軽減が可能であると考えられる。また、ここでは観測計画器の有効性の検証を目的としたため、直線経路を走行させたが、曲率を有

Fig. 11 Navigation algorithm

する軌道に対しても提案したランドマーク観測計画手法を適用することで問題なく拡張することが可能である。

7 結 論

本研究では、2 台のカメラと人工ランドマークを用いた AGV の走行制御システムを提案した。単純かつ汎用的なシステム構成で、任意のスタート地点とゴール地点を選択できる方法論を提案した。どの点からも 2 つのランドマークが観測可能な「ランドマーク配置計画法」と走行中にどのランドマークをどのタイミングで観測するかを決定する「ランドマーク観測計画法」を提案した。実環境で走行実験を行い、走行中での最大誤差 80mm 、最終的な位置決め精度 50mm 以下という位置決め精度を得ることができた。

未知障害物回避動作の組み込み、動的環境への対応が今後の課題である。

謝 辞

本研究の一部は「東京大学と (株) デンソーとの共同研究」の援助を受けた。

参 考 文 献

- 1) 中村 明德: 車輪移動機構の ABC (第 5 回) 物流システム, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 6, 788/719 (1995).
- 2) 津村俊弘: AGV の位置決め技術, 精密工学会誌, Vol. 65, No. 10, 1398/1401 (1999).
- 3) 村田機械株式会社ホームページ: <http://www.muratec.co.jp>
- 4) 竹内一雅, 太田順, 池田和生, 相山康道, 新井民夫: 人工ランドマークを用いた移動ロボットのナビゲーション, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 66, No. 647, 2239/2246 (2000).
- 5) Kanayama, Y., A Stable Tracking Control Method for an Autonomous Mobile Robot, Proc. IEEE Inter. Conf. on Robotics and Automation, 384/389 (1990).
- 6) 高野政晴: 車輪移動機構の ABC (第 3 回) 運動学, 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, 355/360 (1995).
- 7) 太田順: 知能ロボットのための環境整備, 精密工学会誌 Vol. 65, No. 10, 1407/1410 (1999).
- 8) 岡部 篤行, 鈴木 敦夫: 最適配置の教理, 朝倉書店, (1992).
- 9) 田代健治, 太田順, 林遠球, 新井民夫: 人工ランドマークの最適配置設計法, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 6, 896/902 (1996).
- 10) Deng, X., Milios, E., and Mirzaian, A., Landmark selection strategies for path relocation, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 17, 171/185 (1996).
- 11) 太田 順, 倉林 大輔, 新井 民夫: 知能ロボット入門, コロナ社 (2001).

Fig. 12 Experimental result