

移動ロボットのための反射シールを用いたナビゲーション

A Mobile Robot Guidance System Using Optical Reflectors

目崎 祐史 増田 功
Yuji Mesaki Isao Masuda

セコム IS 研究所
SECOM Intelligent Systems Laboratory

Abstract We present a new guidance system using optical reflectors as landmarks. The advantages of using the reflectors are; (1) easy to identify, (2) inexpensive, (3) easy to set up, and (4) inconspicuous to human. We also present a method to generate and follow smooth paths between the discrete landmarks, and to control a mobile robot in real-time for a smooth and non-stop motion.

1 はじめに

近年、自動搬送車の適用分野が拡大している。自動搬送車は主に工場内で用いられていたが、最近では普通のオフィスや病院などの一般的な環境で用いられるようになってきている。自動搬送システムの重要な構成要素として挙げられるのは、ロボットの位置の検出と、軌道追跡のための制御法である。

ロボットの位置検出については数多くの手法が報告されている [1]。電磁氣的センサや光センサを用いたガイドラインの上をロボットが追跡するという手法は一般的に用いられている。超音波ビーコン [2] や赤外線ビーコン [3] はロボットの自己位置検出のために用いられる。また、光を用いたロボットの誘導法についても数多くの手法が報告されている。レーザー光の走査によるビーコンの検出手法は良く用いられている [4]。また、CCD カメラを用いたランドマークの検出についても報告がある [5]。画像処理によって特別な形をしたランドマーク [6] を検出する方法は移動ロボットの自己位置検出に用いられている。

軌道追跡については、連続的なガイドラインの追跡と離散的なランドマークの追跡の 2 種類に分けて考えることができる。連続的なガイドラインの追跡は、ライン検出のためのセンサからの入力信号と、駆動用モータとの間でフィードバックループを構成することにより実現している。離散的なランドマークの追跡の場合には、(a) 軌道の生成と (b) 生成した軌道の追跡という 2 つの問題を解決する必要がある。軌道として良く用いられてきたものに、円弧と直線の組み合わせがある [7]。また、そのほかにも離散的な点の間をなめらかに補間する関数として、クローンイド [8]、B-スプライン [9]、多項式 [10] などの利用が提案されている。このような補関数によって生成された軌道の追跡は、フィードバックループで

行われることが多い [7, 11]。

我々の目的は、工場などではなく、一般のオフィスのような室内環境でロボットを移動させることである。このような環境下で用いることができるランドマークは、(1) 人間には目立たないが、ロボットが容易に検出できる、(2) 設置や変更が容易である、(3) 汚れに対して強い、(4) 安価である、のような条件を満たす必要がある。

本報告では、上記の条件を満たすような、反射シールをランドマークとして用いたナビゲーションシステムについて報告する。このシステムでは、入手容易な反射シールを天井に貼付し、ロボットから光を照射することによって明るく輝くランドマークを CCD カメラを用いて検出する。また、離散的なランドマーク間の補間には、Nelson [10] によって提案された多項式を用いる。さらに、移動ロボットを実時間制御することにより、停止することなくスムーズにランドマークを追跡する。

2 反射シールの特性とランドマークの設置方法

2.1 反射シールの特性

ランドマークとして用いた反射シールは、夜間の交通の安全確保を目的として広く用いられているものである。このシールは、図 1 に示すように、中に大量の小さなプリズムを埋め込むことにより入射光と同じ方向に反射光を返すという性質を持っている。このため、反射シールに光を照射した場合、光源の付近に置いたカメラでは、非常に強い反射光が観測できる。この反射シールをランドマークとして用いた場合、ランドマークの検出に用いるセンサとして、光源とカメラをできるだけ近くに設置したものをを用いる。以降、このセンサを“CL”と呼ぶ。

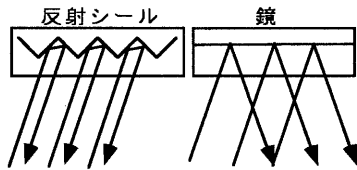


図 1: 反射シールの原理

反射シールの特性を調べるために以下に示す2つの実験を行った。カメラと光源は図 2の左側に示すよう設置し、角 θ を変化させて反射シールからの反射光の強度を測定した。反射光の強度を、ランドマークと同じ位置に置いた白い紙の反射強度を1とする比率で表したときの値をプロットしたグラフを図 2の右側に示した。この値が1に近いときは、背景とランドマークの分離が難しいことを示し、この値が十分に大きいときには容易に分離できることを示す。

実験 1

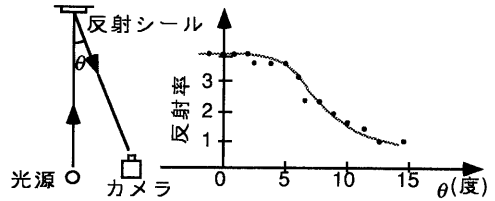
カメラと光源を設置するときに、両者の位置が完全に一致していることが望ましいが、物理的な制約からある距離をもって設置しなければならない。そこで、両者の距離はどの程度まで許容されるのかということを調べるために、光源を固定し、カメラを動かしていく実験を行った。実験の結果、ランドマークを中心として光源とカメラのなす角は3度程度まで許容されることがわかった。ランドマークはCLから2 m程度の距離において設置された場合、カメラと光源の距離は15 cmまで許容される。我々が用いたCLでは、この距離は約7 cmであるため、カメラと光源は同じ位置にあるとしても問題がない。

実験 2

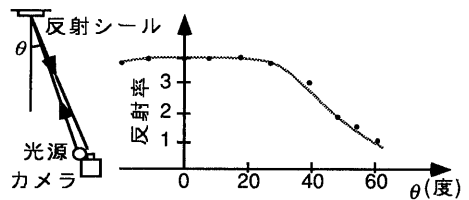
ランドマークの検出可能領域を調べるために、CLをランドマークの正面から少しずつ動かして行きながら反射光の強度を調べた。実験の結果、CLとランドマークの法線方向とのなす角が約40度以内の場合に、十分に強い反射光が得られることがわかった。ランドマークがCLから2 mの距離にある場合、検出可能領域は約1.2 mの円になる。この領域の大きさは十分に満足できる値である。

2.2 ランドマークの設置方法

床面を移動するロボットから見つけやすいように、天井面にランドマークを張り付ける。ロボットは、ランドマークを追跡するように制御されるが、交差点などでは分岐情報をランドマークに埋め込んでおく必要がある。ここで、1つのランドマークは、複数の反射シールを交差点や屈曲部での方向の情報を表すように組み合わせたものであるとする。以降、1枚の反射シール自身を“L”で表し、反射シールの組み合わせによる、方向の意味付けがなされたランドマークを“LS”と呼ぶ。LSやLに番号付けが必要なときには、LS1, LS2, ..., LSn, あるいはL1, L2, ..., Lnのように表記する。



(1) カメラと光源の間の距離の評価実験 (実験 1)



(2) 検出可能領域の評価実験 (実験 2)

図 2: 反射シールの評価実験

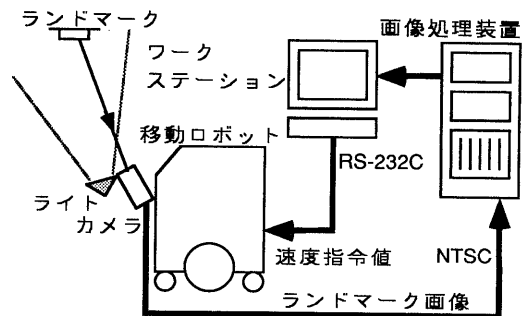


図 3: ハードウェア構成

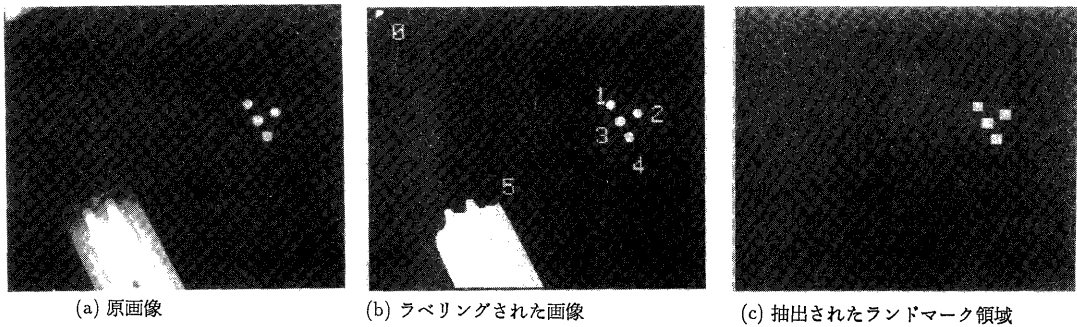


図 4: ランドマーク領域の抽出処理例

表 1: 移動ロボットの主な仕様

移動・回転方式	左右両輪に対する独立速度制御
最高速度	1 (m/s)
速度制御分解能	256
電源	12 (V) 鉛蓄電池 × 4
大きさ	55(W) × 65(L) × 120(H) (cm)
重さ	120 (kg)
通信	RS-232C 9600 (bps)

3 ハードウェア構成

本報告で述べるシステムのハードウェア構成を図 3 に示す。反射シールは直径約 3 cm の円形をしたシールであり、これを天井に貼ってランドマークとする。ランドマーク検出用のセンサとして、CCD カメラと 12V DC で駆動されるハロゲンライトを組み合わせて用いた。ライトはランドマークを検出するときに、ごく短い時間 (約 0.3 秒) だけ点灯する。移動ロボットには、自作の研究用移動ロボットを用いた。この移動ロボットの主な仕様を表 1 に示す。

CCD カメラからの画像に対して、画像処理装置でランドマークの抽出処理を施し、結果をワークステーションに送る。この画像処理装置は、 8×8 のマスクによるフィルタリングを実時間 (1/30 秒)、ラベリング処理を約 1 秒で行う。ワークステーションでは、座標計算、軌道の生成を行い、移動ロボットを RS-232C を通じて約 1/30 秒の周期で制御する。

このシステムでは、室内の床は平で傾斜がなく、天井の高さが既知であり、経路上に障害物がないものと仮定している。また、ランドマークは通常のロボットの移動誤差範囲内からは必ず見えるものとしている。

4 ランドマークの抽出

この章では、ランドマークを画像中から検出し、その位置を計算する手法について述べる。

4.1 画像からのランドマークの抽出

ランドマークを含んだ画像には、蛍光灯などの明るい物体も写り込んでいる。このような画像から正しくランドマークだけを抽出する処理について述べる。図 4 に、処理の例を示す。

1. 単純なしきい値による 2 値化を行う。しきい値は、実験的に定めるが、反射シールは非常に明るく輝いているため、2 値化処理の結果はしきい値にあまり敏感ではない。
2. 2 値画像中の明るい領域に対してラベリング処理を施す。図 4 (b) では、各領域に与えられたラベルを数字で表示した。
3. 以下に示すような、面積、長さ、位置のパラメータを用いて、各領域がランドマークを表しているかどうかを判定する。
 - (a) 各領域の面積 S に対する最大値 S_{max} と最小値 S_{min} 。
 - (b) 図 5 に示すような、各領域に外接する四角形の縦横の長さ L_x と L_y に対する最大値 L_{max} と最小値 L_{min} 。反射シールとして円形のものを用いたため、細長い領域をこの条件によって除去する。
 - (c) 画像の端からの距離の最小値 E_{min} 。図 5 の右下の領域のように、部分的に見える大きな領域は、この条件によって除去される。

上に示した条件をすべて満たす領域をランドマークを表す領域として抽出する。各パラメータは実験的に定める。図 4 (b) に示した例では、ラベル 0 から 5 までの 6

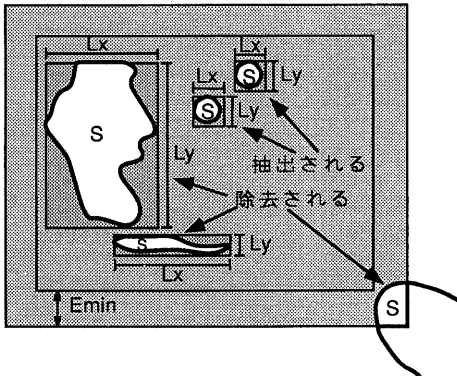


図 5: ランドマーク領域抽出のための条件

つの領域がある。実際は蛍光灯の一部である領域 0 については面積 S および長さ L_x と L_y についての条件 (a) と (b) を満たしているが、位置が画像の端に近すぎるため条件 (c) を満たさず、正しく除去される。また、領域 5 については、面積 S が大きすぎるため、条件 (a) を満たさず、正しく除去される。残りの領域 1,2,3,4 は正しくランドマークを表す領域として抽出される。

4.2 ランドマークの位置の計算

画像中のランドマークを表す領域から、天井の高さ h 、カメラのチルト角 α 、焦点距離 λ などのパラメータを用いて、ロボット中心の座標系でのランドマークの座標値を求める。

まず、画像内のランドマークの領域それぞれについて重心点の座標を求める。このとき用いるカメラ座標系は、画像の中心に原点をおき、画像の垂直方向に x 軸、水平方向に y 軸を合わせるように設定する。また、ロボット座標系を、カメラの焦点に原点をおき、 X 軸と Y 軸を x 軸と y 軸に平行になるように、また光軸に Z 軸を合わせるように設定する。これらの座標系の設定を図 6 に示す。ここで、 XZ 平面と YZ 平面への正射影を考える。このとき、ロボットの真上の点から見たランドマークの位置 (dX, dY) は、画像中でのランドマークの重心の座標 (x, y) から以下の式を用いて計算される。

$$\begin{aligned} dX &= h \tan \alpha + X \cos \alpha + X \sin \alpha \tan(\alpha + \beta_X), \\ X &= x(\lambda - Z)/\lambda, \quad Z = h/\cos \alpha, \quad \beta_X = \tan^{-1}(x/\lambda). \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} dY &= Z \tan \beta_Y, \\ Z &= h/\cos \alpha, \quad \beta_Y = \tan^{-1}(y/\lambda). \end{aligned} \quad (2)$$

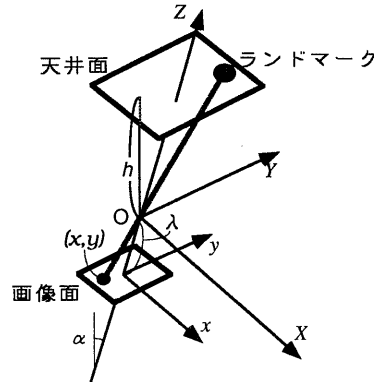


図 6: カメラ座標系とロボット座標系

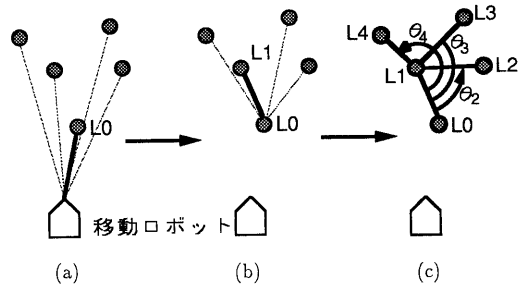


図 7: ランドマークの番号付け

5 ランドマークの番号付けとコマンド

5.1 ランドマークの番号付け

反射シールの組み合わせによって方向の意味付けがなされたランドマーク (LS) を正しく認識するために、ランドマークの番号付けを行う。番号付けは、前の章で求めた各々の反射シールの座標値をもとにして、以下の規則に従って行われる。 n という番号が与えられたランドマークを L_n と呼ぶ。図 7 に番号付けの処理を示す。

1. L_0 はロボットからいちばん近いランドマークとする (図 7a 参照)。
2. L_1 は L_0 からいちばん近いランドマークとする (図 7b 参照)。
3. θ_n を線分 $L_n L_1$ と $L_0 L_1$ のなす角 (反時計回り) とする。各ランドマークに対応する θ が小さい順に、 $L_2, L_3, L_4, \dots, L_n$ であるとする (図 7c 参照)。

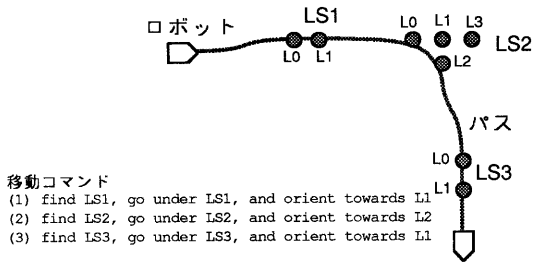


図 8: コマンド列とパスの例

5.2 コマンド

ロボットに対して、天井に設置されたランドマークを追跡し、分岐点で所望の方向に進行するようにコマンドを与える。コマンドに必要な要素は、ロボットをランドマークの位置に誘導することと、ランドマークによって指示された方向に回転させることである。そこで、次のようなただ 1 種類の形式でコマンドを与える。

find LS n , go under LS n , and orient towards L m .

ここで、 n と m は、LS と L に与えられた番号を指定するための整数である。このコマンドにより、ロボットは LS n の直下に行き、L m の方向を向く。コマンド列と、そのコマンド列によって表されるパスの例を図 8 に示す。

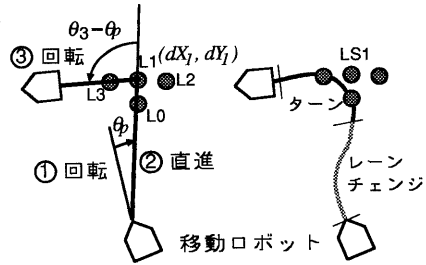
6 軌道生成

図 9 に示したようなロボットの動きは、“go under LS1 and orient towards L3” のようなコマンドで実現される。 θ_n を線分 L1Ln とロボットの正面の方向との間の角、 (dX_1, dY_1) を LS1 の中の L1 をロボットからみた位置としたとき、このコマンドは、“点 (dX_1, dY_1) に行き、 θ_3 だけ回転する” という動きの指令と等価である。

単純な方法として、図 9 (a) に示したように、① 点 (dX_1, dY_1) の方向に θ_p だけ回転する、② $\sqrt{dX_1^2 + dY_1^2}$ の長さ進む、③ $\theta_3 - \theta_p$ だけ回転するという手順が考えられる。しかし、このような停止と移動・回転を繰り返す方法では、ロボットの動きが連続的でないため、平均速度には限界がある。反対に、図 9 (b) に示したような連続的でスムーズな動きは、ロボットの挙動がぎくしゃくすることもなく、高速移動に適している。

そこで、補関数を用いてスムーズな軌道を生成する方法をこの章で述べる。補関数として、曲率が連続であることによりぎくしゃくした動きを抑えることができるという理由で、Nelson [10] によって提案された多項式を一部改良して用いた。この多項式は、(1) レーンチェンジ、(2) ターンの 2 つに分けられる。

レーンチェンジ レーンチェンジは、ロボットを指定された位置・向きに移動させるときに用いる。



(a) 停止 - 移動の組み合わせ (b) なめらかな動き

図 9: ランドマークを追跡する動きの例

ターン 図 9 (b) に示した場合のように、指定された向きに回転するための回転量が $\pi/4$ を超えたとき、レーンチェンジとターンを組み合わせる。

6.1 レーンチェンジ

Nelson [10] によって提案された曲率が連続な補関数は、次の式によって表される。

$$Y(X) = Y_e [10(\frac{X}{X_e})^3 - 15(\frac{X}{X_e})^4 + 6(\frac{X}{X_e})^5]. \quad (3)$$

この式は、平行なレーンチェンジ ($X = X_e$ で $dY/dX = 0$) だけを対象としているが、我々は平行でない場合 ($X = X_e$ で $dY/dX = m$) も考慮した補関数を提案する。この関数は、次の式によって表現される。

$$Y(X) = (10Y_e - 4mX_e)(\frac{X}{X_e})^3 + (-15Y_e + 7mX_e)(\frac{X}{X_e})^4 + (6Y_e - 3mX_e)(\frac{X}{X_e})^5. \quad (4)$$

$Y(X)$ の曲率 κ は、次の式で与えられる。

$$\kappa = (d^2Y/dX^2) / [1 + (dY/dX)^2]^{3/2}. \quad (5)$$

図 10 にこの関数の例と、曲率 κ を示す。図 10 (a) に示した座標系の中で、ロボットは原点を出発し、点 (X_e, Y_e) に到達する。

6.2 ターン

Nelson [10] は、ロボットをスムーズに回転させるための関数を提案した。この関数は、極座標形式の多項式で表される。図 11 (a) に示す座標系の中で、ロボットは原点を出発し、点 P に到達する。回転半径 R と、回転角 θ が与えられたとき、補関数は次の式で与えられる。

$$r(\phi) = R(1 + \frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^3}{\theta} + \frac{\phi^4}{2\theta^2}). \quad (6)$$

$r(\phi)$ の曲率 κ は次の式で与えられる。

$$\kappa = \frac{r^2 + 2r'^2 - rr''}{(r^2 + r'^2)^{3/2}}, \quad r' \equiv dr/d\phi, \quad r'' \equiv d^2r/d\phi^2. \quad (7)$$

図 11 にターン関数の例と ϕ の関数として表した曲率を示す。

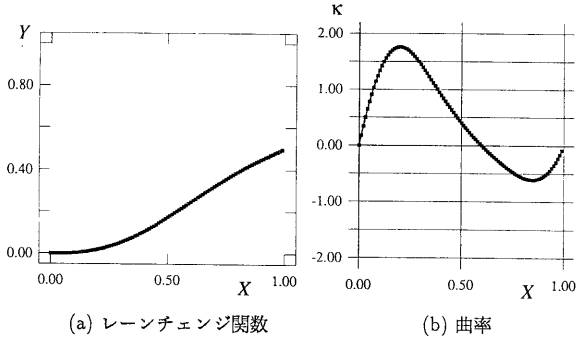


図 10: レーンチェンジ関数と曲率

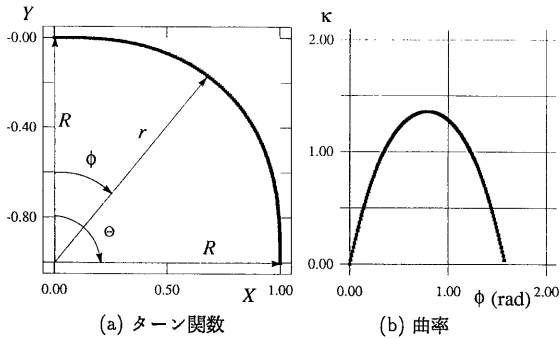


図 11: ターン関数と曲率

6.3 レーンチェンジとターンの組み合わせ

図 9 に示したようなパスを追跡する場合、レーンチェンジとターンの組み合わせによってロボットの軌道を生成する。この時、レーンチェンジからターンに切り替える点 (X_c, Y_c) を求める必要がある。この点は、現在のロボットの向きと指定された方向にターンするための回転角の大きさ θ から、レーンチェンジとターンの繋ぎ目がスムーズになるように決定される。すなわち、切り替え点においてロボットの向きがレーンチェンジ開始時と平行になり、その状態からターンを開始するように切り替え点が設定される。この点を、以下の手順によって求める。この手順の例を図 12 に示す。

1. 座標系の原点を点 O から点 O' (dX_1, dY_1) に移動する。
2. 点 $A(0, R)$ を $\theta - \pi/2$ だけ点 O' を中心に回転し、点 B を得る。
3. 点 $C(-R, R)$ を $\theta - \pi/2$ だけ点 O' を中心に回転し、点 D を得る。
4. 点 B を $-\theta$ だけ点 D を中心に回転し、点 E を得る。
5. 座標系の原点を点 O' からもとの原点 O に戻す。

この手順は、ロボットの回転角 θ が $\theta \geq 0$ の場合に用いる。 $\theta < 0$ の場合には、ほぼ同様の手順によって点 E を求め

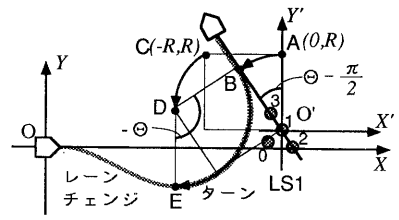


図 12: ターン開始点 E の計算方法

る。以上の手順によって得られた点 E の座標 (X_c, Y_c) は、以下の式で表される。

$$X_c = \begin{cases} dX_1 + R(-\sin \theta + \cos \theta) & (\theta \geq 0) \\ dX_1 + R(\sin \theta + \cos \theta) & (\theta < 0) \end{cases}, \quad (8)$$

$$Y_c = \begin{cases} dY_1 + R(-1 + \cos \theta + \sin \theta) & (\theta \geq 0) \\ dY_1 + R(1 - \cos \theta + \sin \theta) & (\theta < 0) \end{cases}$$

7 実時間制御

この章では、今までに述べた手法によって得られたランドマーク追跡のための軌道を、実際に追跡させるための制御方法について述べる。

図 8 に示したようなコマンド列を与えることにより、ランドマークを追跡するようにロボットを制御する。制御は約 1/30 秒の周期でロボットに与えられるが、実験に用いた計算機は UNIX ベースのワークステーションであるため、実時間性が保証されない。しかし、計算機が通常の負荷状態であれば、ロボットの動きに大きな影響がない。

今回作製した実験システムでは、あるランドマークの直下にロボットが到達したときに、ランドマーク検出のための画像を取り込む。このことは、ランドマークはひとつ前のランドマークの真下から見えるように設置しておく必要があることを示している。ロボットの向きの修正や回転は、図 8 に示したようなコマンドと反射シールの組み合わせによる方向の指示によって行う。

取り込んだ画像からのランドマークの抽出や認識処理に約 1 秒かかる。その間、ロボットはただまっすぐ進む。認識処理が終了し、ランドマークの座標値が得られた後すぐに、軌道の生成を行う。この時、ロボットの現在地は、認識処理の間ロボットが直進していたとして計算された点とする。また、ランドマーク照明用のライトは、画像取り込みの 0.3 秒前に点灯され、画像取り込みの直後に消灯される。

制御のタイムチャートの例を図 13 に示した。ランドマークの抽出と認識処理に要する時間が全体のボトルネックである。この部分は、近い将来ハードウェア技術の進歩により短縮される可能性が高い。

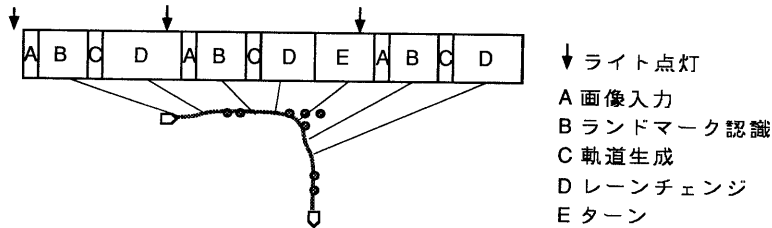


図 13: 制御のタイムチャート

8 実験結果

この章では、ナビゲーションシステムを評価するための実験の結果について述べる。実験のために天井に張り付けたランドマークの位置と、与えたコマンド列を図 14 に示す。この実験でロボットは、LS1 から LS3 まで追跡し、LS3 で左向きに回転し、LS4 から LS6 まで追跡し、LS6 の直下で停止するように制御される。実験はスピードを変えて 2 回行い、ランドマークの認識処理に要する時間がロボットの動きに与える影響を調べた。

実験 (A) (高速) ロボットの速度を 0.12 m/s とした。

実験 (B) (低速) ロボットの速度を 0.06 m/s とした。

図 15 にロボットが移動したパスを示す。この結果は、ロボットに与えた速度指令値を積分することにより求めたため、実際のパスとは多少ずれている。図中、太い線はロボットが約 1/30 秒の周期で制御されていた区間、細い線はランドマークの認識処理の間制御されずにただ直進していた区間を表す。

実験結果から、非常になめらかなパスが生成され、ロボットがスムーズな動きをしていることがわかる。また、図 16 は、図 15 の中に矢印で示した部分、すなわちロボットの回転している部分を拡大したものである。この実験では回転半径を Y(m) 0.3 m とした。この回転半径の場合、回転中はロボットの片方の車輪はほとんど停止している。拡大したパスからわかるように、レーンチェンジとターンの切り替えはスムーズに行われており、ロボットにぎくしゃくした動きは生じない。

図 17 は実験 (A) と (B) の曲率の変化を示している。もし曲率が連続でない場合、ロボットの動きはぎくしゃくしたものになるが、実験結果は曲率の連続性が保たれていること、すなわちロボットの動きがなめらかであることを示している。実験 (A) の曲率が部分的に非常に高くなっているが、これはランドマークの認識処理に要する時間が長く、ロボットの位置の修正に使うことができる時間が短かったため、急激な動きが要求されたためである。実験 (B) では、ランドマークの認識処理に要する時間がロボットの速さに対して十分に短いため、このように急激な動きは要求されていないことがわかる。

移動コマンド

- (1) find LS1, go under LS1, and orient towards L1
- (2) find LS2, go under LS2, and orient towards L1
- (3) find LS3, go under LS3, and orient towards L3
- (4) find LS4, go under LS4, and orient towards L1
- (5) find LS5, go under LS5, and orient towards L1
- (6) find LS6, go under LS6, and orient towards L1

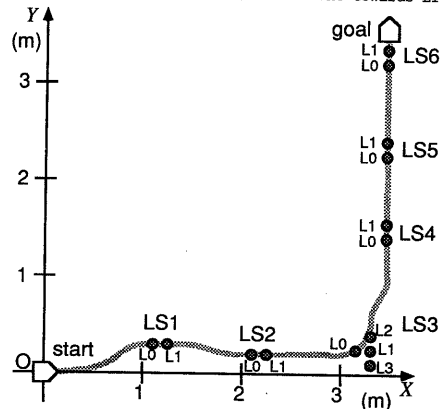


図 14: 実験に用いたランドマーク

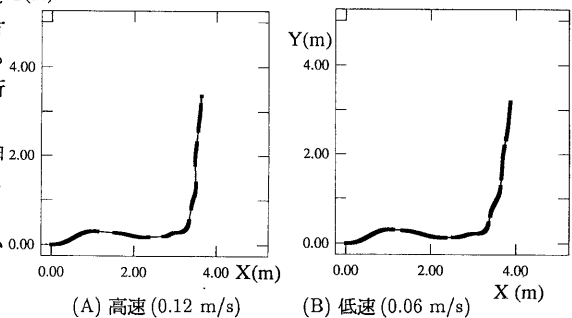


図 15: ロボットのパス

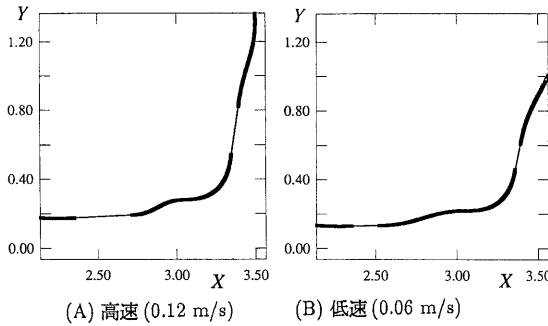


図 16: 回転部分のロボットのパス (拡大図)

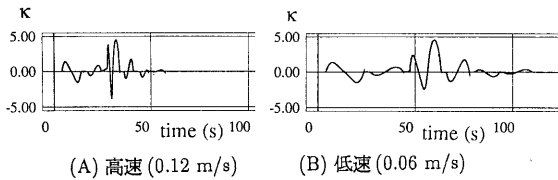


図 17: 曲率

9 結論

本報告では、反射シールをランドマークとして用いたナビゲーションシステムについて述べた。このナビゲーションシステムの特徴として、(1) 安価で設置の容易な反射シールをランドマークとして用いること、(2) ランドマークを追跡するロボットのパスとして曲率の連続性が保証される補間関数を用いることによりスムーズなロボットの動きを実現したことが挙げられる。

ランドマークの抽出・認識処理に要する時間がロボットの速度のボトルネックになっている。この処理は主に画像処理であるため近い将来における高速化が期待できる。そうすれば、曲率の連続性を特徴とする本システムは、大きな変更を加えることなくロボットの高速移動を可能にするであろう。

今後は、ランドマークを効率的に設置するための、ランドマーク間の距離、カメラのチルト角、カメラの画角などのパラメータをロボットの移動誤差から求める手法や、ロボットの速度を上げるためのさらに複雑な実時間制御法、エラー処理システムなどについて研究を行う必要がある。

謝辞 本報告を発表するに当たり、研究の機会を与えて下さり、有益な助言をもって我々を励まして下さった橋本新一郎セコム IS 研究所長に感謝します。

参考文献

- [1] Toshihiro Tsumura, "Survey of Automated Guided Vehicle in Japanese Factory", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp.1329-1334 (1986).
- [2] Lindsay Kleeman, "Ultrasonic Autonomous Robot Localisation System", Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots Syst. '89, pp.212-219 (Sep.1989).
- [3] Clare D. McGillem and Theodore S. Rappaport, "Infra-red Location System for Navigation of Autonomous Vehicles", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp.1236-1238 (1988).
- [4] Toshihiro Tsumura and Nobuo Komatsu, "Proposed Position and Heading Measurement System of Ground Vehicle Using Laser Beams", Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots Syst. '89, pp.206-211 (Sep. 1989).
- [5] Tashiro Takeda, Atsuhiko Kato, Toru Suzuki, and Mitsuo Hosoi, "Automated Vehicle Guidance Using Spotmark", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp.1349-1353 (1986).
- [6] Mansur R. Kabuka and Alvaro E. Arenas, "Position Verification of a Mobile Robot Using Standard Pattern", IEEE J. Robotics Automat., Vol. RE-3, No. 6, pp.505-516 (Dec. 1987).
- [7] Winston L. Nelson and Ingemar J. Cox, "Local Path Control for an Autonomous Vehicle", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp.1504-1510 (1988).
- [8] Yutaka Kanayama and Norihisa Miyake, "Trajectory Generation for Mobile Robots", Robotics Research: The Third International Symposium, The MIT Press, pp.333-340 (1986).
- [9] Kiyoshi Komoriya and Kazuo Tanie, "Trajectory Design and Control of a Wheel-type Mobile Robot Using B-Spline Curve", Proc. IEEE Int. Workshop Intelligent Robots Syst. '89, pp.398-405 (Sep. 1989).
- [10] Winston Nelson, "Continuous-Curvature Paths for Autonomous Vehicles", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp.1260-1264 (1989).
- [11] Ormead Amidi and Charles Thorpe, "Integrated Mobile Robot Control", Mobile Robots V, Chun, Wolfe, Editors, Proc. SPIE 1388, pp.504-523 (1991).