

季節や天候の変化にロバストな視覚認識に基づく 移動ロボットの屋外ナビゲーション

○桂 浩章† Michael Hild‡ 三浦 純† 白井良明 †
† 大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻
‡ 大阪電気通信大学総合情報学部情報工学科

View-Based Outdoor Navigation Using Object Recognition Robust to Changes of Seasons and Weather

○ Hiroaki Katsura†, Michael Hild‡, Jun Miura† and Yoshiaki Shirai†

† Dept. of Computer-Controlled Mechanical Systems, Osaka University

‡ Dept. of Engineering Informatics, Osaka Electro-Communication University

Abstract: This paper describes a view-based outdoor navigation method. In the method, a user first guides the robot along a route. During this guided movement, the robot learns a sequence of images and a rough geometry of the route. The robot then moves autonomously with localizing itself based on the comparison between the learned images and input images. Since the appearances of objects may change much due to changes of seasons and weather in outdoor scenes, a simple image comparison does not work. We, therefore, propose the following comparison method; the robot first recognizes objects in the images using object models which represent such appearance changes, and then compare the recognition results of two images for localization. The robot also uses GPS, odometry, and a laser range finder to recognize turning positions and obstacles for safe and efficient navigation. Experimental results of about 350m autonomous navigation in our campus show the feasibility of the method.

Keywords: mobile robot, outdoor navigation, view-based navigation, robust object recognition

1 はじめに

視覚を用いて屋外を移動するロボットは盛んに研究されている分野の一つである。その多くは道路境界線や歩道などの局所的な特徴を認識し、ロボットが経路を正しく追従走行できるようにするものである [1][2]。そのような特徴が必ずしも得られない場所でロボットを誘導するためには、ロボットの位置決めが必要となる。

屋外環境は屋内に比べ、ロボットの移動範囲が広く複雑なため、あらかじめ環境の地図を与えることが難しい。そこで、ユーザが一度ロボットを誘導して経路を学習させたあと、ロボットが学習結果を利用して自律的に移動する、という2段階の手法が有効である。これまでにそのような2段階の手法がいくつか提案されている。城殿ら [3] はステレオ視によって周囲の障害物の位置を記述した地図を生成し、利用する方法を提案した。Maeyama [4] らは、ユーザによる誘導時にオドメトリデータと経路の周囲で検出したランドマークの位置を地図に記録し、利用する方法を提案した。これらの方法では、駐車車両の移動などにより周囲の物体の配置が変化すると、誘導時に作成した地図が利用できない可能性がある。また、最近では、屋外でのロボットの位置決めでGPSが多く用いられるようになってきたが [5][6]、建物付近ではマルチパスの影響で誤差が大きい、あるいは衛星が捕捉できず位置情報が得られない、といった問題が生じる。そこで、ユーザの誘導時に周囲の大まかな風景を視覚により認識し、その結果を基に位置決めを行って自律移動する手法を開発する。

松本ら [7] は誘導時に観測した画像列を学習し、自律移動時には入力画像と学習画像との比較により位置決めを行っている。Li [8] は経路に沿って作成したパノラマ画像を用いて同様の手法を提案している。Takeuchi ら [9] は、画像を色の分布を表す行列で表現し、2枚の画像から得られる画像の違いを、その行列間の距離で表現する手法を提案し、経路に沿った位置の決定に用いている。これらの手法では、天候や季節の変化による画像中の物体の色の变化を考慮して

いないため、ロバストな位置決めが行えない。

物体の見かけの色は天候や季節によって変化しても、建物や木などの比較的大きな物体の位置関係はほとんど変化しない。そこで、そのような物体を認識し、学習時の画像と自律移動時の画像について、認識結果を比較することにより、大域的な位置決めを行うことを提案する。そこでは、天候や季節にかかわらずロバストに物体認識を行うことが重要になる。

屋外シーンの認識において、シーン中の物体に関する知識を用いる手法が提案されている [10][11]。本研究でも同様に知識に基づく認識を行うが、天候や季節による変動を考慮した物体モデルを作成している点が新しい。また、認識の際に、ある物体である可能性はあるが決定はできない、という領域が存在する。そのような領域については、物体の種類を一意に決めずに、複数の領域の可能性を保持しておき、2つの画像間で整合をとりながら領域の種類を決める、という柔軟な照合を行うことにより、認識率を高める。

自律移動では基本的に画像の照合によって位置決めを行うが、GPSとオドメトリを使ってある程度の位置情報を得て、必要な画像照合を減らすことにより、移動の効率化を図る。また、レーザ距離センサを用いて周囲の障害物の検知と回避を行い、安全な移動を実現する。

以下、2節で物体モデルとそれを用いた画像照合について述べる。3節では、自律移動の方法について述べる。4節では、我々のキャンパスで行った実験の結果について述べる。

2 画像を用いた大域的な自己位置推定

2枚の画像の撮影した位置、方向が大体同じであるならば、それらの画像には、同じ物体が同じ位置関係で写っている。したがって、撮影位置、方向のわかる学習画像と、現在入力画像の2枚の画像を照合することにより、現在位置が推定できる。しかし、屋外では、天候の影響で色の見え方が変化し、また木の葉は季節の変化で色そのものの変化するので、画素値の直接比較という照合手法ではうまく



図 1: 原画像の例



図 2: 一様領域と空領域の認識結果

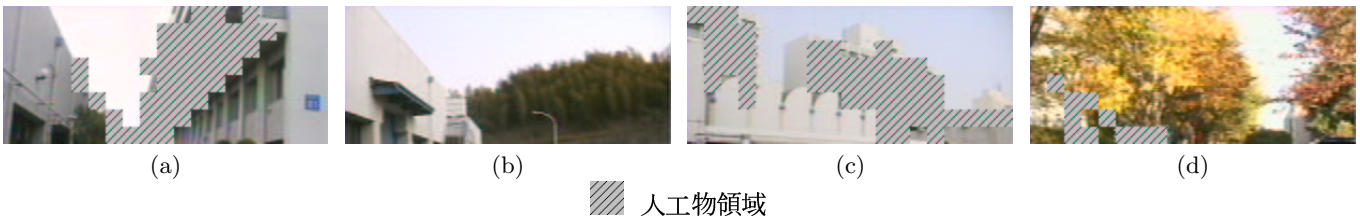


図 3: 人工物領域の認識結果

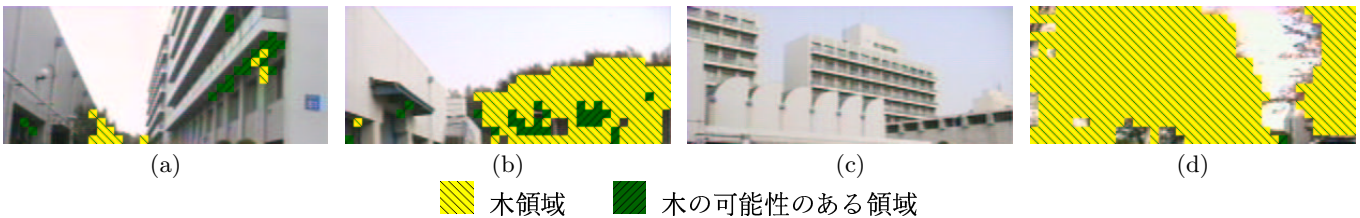


図 4: 木領域の認識結果

いかな。そこで、建物や木といった物体の存在の有無や、それらの画像内での位置関係は、季節、天候が変化してもあまり変わらないことを利用し、画像から物体に関する色の変化を考慮した知識を用いて物体を認識し、その認識結果を用いて照合を行う。

2.1 物体の認識

対象としている大学構内には、建物、木、自動車、自転車等の物体が存在する。このうち自動車、自転車等は日時によって移動するために認識対象として適さない。そこで画像の水平面より上部(画像上半分)に存在する建物、空、木を認識の対象とする。本研究では以下の4種の領域を認識する。

1. 建物の側壁のように色が一様で大きな領域(一様領域と呼ぶ)
2. 空領域
3. 窓枠や建物の端等ある程度の長さのある直線が存在する部分(人工物領域と呼ぶ)
4. 木領域

以下各々の領域の認識手法について述べる。

2.1.1 一様領域と空領域の認識

建物の側壁や空は一様な色をしていて大きな領域である。そこで、そのような領域を抜き出した後、空の領域を見つけることによって、一様領域と空領域を認識する。

まず、画像を 8×8 のウィンドウに分割し、ウィンドウ内のエッジの数がしきい値より少なく、R,G,Bの分散がすべてしきい値より小さいものを一様な色をしたウィンドウとして抽出する。得られたウィンドウのうち平均色の差がしきい値より小さい隣接ウィンドウを連結し、ある程度以上の面積を持つ画像領域を抽出する。

空領域は、以上により抽出された領域のうち、上の方にあり明るい領域である。そこで空領域として画像上端に接している明るくて面積が大きい領域を抽出する。しかしこれだけでは、建物の上部が画像上端に接している場合、この領域を空領域と認識してしまう。そこで、以上の条件を満たす領域の内、領域の上部に建物の境界に相当する明確な直線があるかどうかを調べ直線があればその領域は一様領域とする。また直線が存在しなくても、領域の横幅が上より下の方が広い領域は、空領域か一様領域かの判断が難しいので、一様領域の可能性のある領域とする。

さらに以上による認識では、空の色がなだらかに変化した場合や雲と青空がある空の場合は、連結の結果、空領域

がいくつかの領域に分かれてしまうので、上端に接していない空の部分を空領域と認識できない。空領域に隣接する領域が空の場合、この領域の輝度は明るく、隣接している長さが十分に長い。また、空領域に隣接する領域が建物の場合、隣接部分にエッジが存在することが予想される。したがって、空と判断された領域のある隣接領域が十分明るくて、隣接している部分にエッジの数がしきい値よりも少ない、かつ領域の面積に対する隣接部分の長さの割合がしきい値よりも大きい場合に、この隣接領域を空領域とする。以上を処理した結果、残った領域を一様領域とする。

図2に図1から一様領域と空領域を認識した結果を示す。図2-(b)では、建物と空の境界のコントラストが弱く直線が発見できなかったため、一様領域の可能性のある領域という認識になった。また図2-(c)では、連結領域を抽出するとき、空の部分と連結されたため、建物の壁面の部分が空領域として認識されている。他の部分はおおむね正しく認識されている。

2.1.2 人工物領域の認識

建物や窓の境界には、直線部分が長く存在し、この部分に強いエッジが検出される。そこで画像を安定して直線を抽出するため、 16×16 のウインドウに分割し、エッジの数が多いウインドウに対して、ハフ変換を用いて直線を抽出する。さらに、直線が抽出できるウインドウがある程度連続して抽出されることが期待できる。そこで、直線の存在するウインドウを連結し、連結された領域の面積が大きいものを人工物領域として認識する。図3に、図1から人工物領域を認識した結果を示す。

2.1.3 木領域の認識

木領域には、葉や枝によって多くのエッジが検出される。そこで画像を 8×8 のウインドウに分割し、エッジの割合が大きく、あらかじめ作成した葉の色のモデルに該当する画素数が多いウインドウを木領域と認識する。

エッジを検出する際、単一のしきい値で検出すると、日照条件により影に入っている木領域内にエッジを多く検出できず、認識の対象とならない。そこで影の部分の木の領域を認識するために、ウインドウの平均明度を計算し、平均明度に応じたしきい値でエッジを検出して、エッジの割

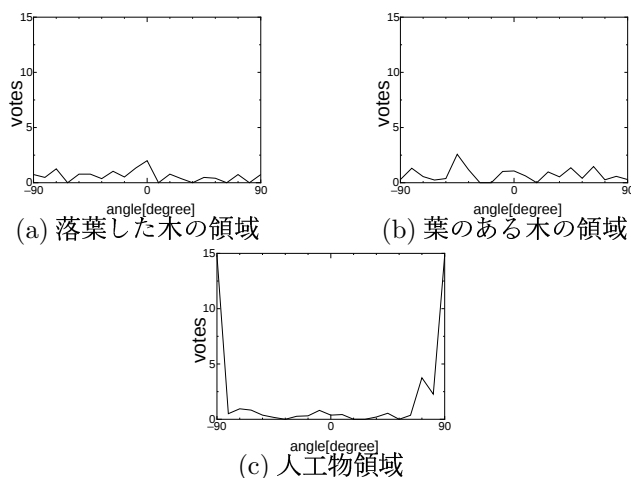


図6: エッジの勾配方向のヒストグラム

合を計算する。

葉の色は、季節や日照条件の変化によって変化する。様々な状況にある木領域を手動で切り出して明度 T と色相 θ の関係を調べた。図5に、夏の晴れた日に撮影した木領域と、秋の晴れた日に撮影した画像内の赤と黄色に色づいた木領域について調べた例を示す。図5を見ると、ひなたの木領域では、明度 T が変化しても色相 θ は、あまり変化しない。また影になっている木の領域では、明度 T が小さい部分では、空の青色成分の影響を受けるために色相 θ が緑から青の方に広く分布していることがわかる。秋の色づいたひなたの木領域では、色相 θ が少し赤の方に移動している。天候が晴れから曇になるとひなたの晴れの色の分布に比べ、 T は小さくなるが、 θ はあまり変化しないということがわかった。したがって緑の木の領域(ひなた、影)、色づいた木の領域(ひなた、影)の4個の分布から大部分を覆う領域(図5の多角形領域)を葉のモデルとすることで十分木領域が認識できると考えた。本研究ではひなたの木領域で作成したモデルに該当する画素の割合が8割以上のウインドウを木領域と認識する。影の木領域で作成したモデルに該当する画素の割合が8割以上のウインドウは、木ではない暗い部分の可能性もあるので木の可能性のある領域とする。

落葉した木の領域の場合には、枝の間に背後のものが写ってしまい葉の色のモデルとはあわないことがある。一般に葉や枝によって得られるエッジの勾配方向はばらついていて、強度が小さい。例として図6に、落葉した木の領域、葉のある木の領域、他の領域(例として人工物領域)について、エッジの勾配方向のヒストグラムを示す。図6より木の領域では他の領域と比べヒストグラムの最大値が小さいことがわかる。葉のモデルに合わないウインドウを対象に図6のヒストグラムを作成し、その最大値が小さいウインドウを木の可能性のある領域とする。

以上の処理を行って、図4に、図1から木領域を認識した結果を示す。

2.2 画像照合

2枚の画像が照合しているかどうかは基本的には一方の画像に他方の画像を重ねたとき、画像が重なりあった部分で両方の認識結果がどの程度一致しているかで評価する。照合を行う2枚の画像の撮影位置、方向が完全に一致してなくても大体同じであれば良い評価値を与えたいので、画像をずらしながら重ね合わせ、最も良い評価値を照合の評

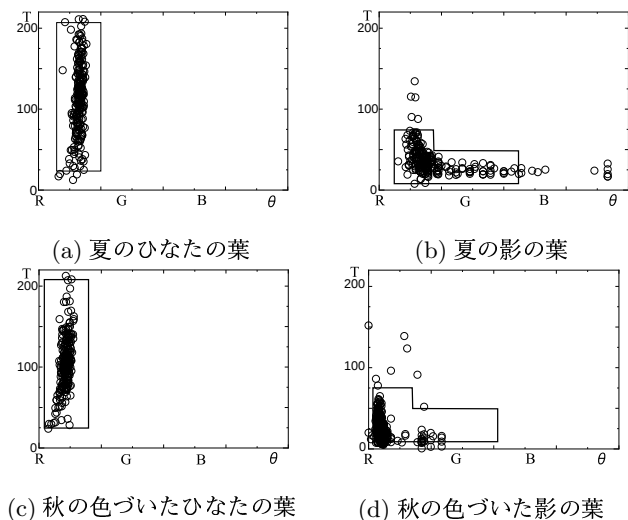


図5: 木の領域の T - θ の関係



図 7: 学習画像



(a) 一様領域と空領域



(b) 人工物領域



(c) 木領域

図 8: 学習画像に対する認識結果

価値 (照合度) とする。

撮影位置、方向が大体同じである 2 枚の画像には、同じ物体が写っていて、それらの相対的な位置関係がほぼ等しい。したがって 4 種 (一様領域、空領域、人工物領域、木領域) の認識結果それぞれについて重なり (重複度) を計算し、すべての重複度が一定値以上でなければならないとする。ただし、ある物体の面積が 2 枚の画像ともに小さいときにはその物体の認識結果の信頼性が低いので、その認識結果は照合には用いない。それぞれの認識結果に対する重複度は、2 枚の画像が重なっている部分で共に物体が抽出された部分の面積をどちらかに特徴が抽出された部分の面積で割ることによって計算する。2 枚の画像の照合度は、用いる認識結果の重複度の平均とし、照合度がしきい値以上であれば照合成功とする。

物体認識の際に”可能性のある領域”というラベルをつけた部分に関しては、重複度の計算の際に特徴ごとに使い方が異なる。まず、一様領域の可能性のある領域は、一様領域か空領域である。そこで基本的には、一様領域として扱い、もう一方の画像における重なった部分での認識が空領域の場合、空領域とする。次に、木の可能性のある領域は、暗い部分で間違っ検出されることが多い。そこで、もう一方の画像における重なった部分での認識が木領域の場合、木領域とし、それ以外は、間違っ検出されたものとして無視する。

ここで、図 1-(d) の入力画像と図 7(認識結果を図 8 に示す) の学習画像との照合の結果を例として示す。自律移動中、水平方向に ± 6 度程度、鉛直方向に ± 3 度程度ずれることを考えて、2 つの画像をずらしながら照合する際の水平方向の移動量 dx を ($-40 \leq dx \leq 40$)、鉛直方向の移動量 dy を ($-24 \leq dy \leq 24$) の範囲を許容し、8 画素ずつ移動させながら照合を行う。また、入力画像と学習画像の重なっている部分に、どちらか一方の割合が、一様領域、空領域、木領域の場合は 6% 以上、人工物領域の場合は 18% 以上存在する認識結果を用いて照合を行い、それぞれの重複度が一様領域、人工物領域の場合 0.2 以上、空領域の場合 0.6 以上、木領域の場合 0.3 以上でなければならないとしている。これは、安定して認識のできる物体は、割合が少なくとも信頼でき、重複度に対するしきい値が大きくても十分照合がとれるからである。さらに、照合成功を判断するためのしきい値を 0.4 とした。

図 2,3,4-(d) と図 8 の認識結果を用いて画像照合を行った時の照合度 ($=s_{max}$) とその時の移動量 (dx, dy)、それぞれの認識結果における重複度 s_U (一様領域)、 s_S (空領域)、 s_A (人工物領域)、 s_T (木領域) を表 1 に示す。

この例の照合では、2 枚の画像ともに人工物領域と判断された部分の面積が小さいため、照合には人工物領域の認識結果を用いていない。また学習画像における一様領域の

表 1: 入力画像と学習画像の照合結果

s_{max}	dx	dy	s_U	s_S	s_A	s_T
0.590	-32	16	—	0.625	—	0.556

可能性のある領域は、空領域として照合に用いられ、その結果一様領域の認識結果は用いられていない。この入力画像 (図 1-(d)) は秋に撮影したもので紅葉しているが、紅葉した際の木の葉の色のモデルも作成しているため、木領域として認識されている (図 4-(d) 参照)。このように、季節の変化による物体の色の変化に対してロバストな照合ができています。

3 自律移動

3.1 自律移動の概要と学習するデータ

自律移動の際には、経路をロボットが直進する部分と、それらをつなぐための曲がる部分に分け、それぞれ異なる誘導方式を用いる。直進部分では、ロボットは入力画像と学習画像の照合結果に基づいて進むべき方向を定め、前後 2 台のカメラを用いたテンプレートマッチングによる視覚フィードバック [12] によって直進する。また、ある程度進むごとに画像照合によって進行方向を修正する。曲がる部分については、まず直進走行中に GPS とオドメトリを用いて曲がる場所に近づいたかどうかを判断する。近づいたら画像照合およびレーザ距離センサにより曲がる場所を決定し、次の直線部分の進行方向へロボットを回転させる。以上を繰り返してロボットを目的地まで誘導する。

以上の誘導方式を用いるため、ユーザがガイドした走行の際には以下の情報を学習しておく。まず直進部分については、進みながらある間隔で撮像した画像列と各画像を撮像した位置 (オドメトリの計測値) を記録しておく。曲がる部分については、曲がったあとの画像、曲がり始める位置の GPS データ、およびオドメトリで計測した曲がる角度を記録する。GPS データが測定できないときには、そのことも覚えておく。

なお、経路脇の障害物や停車中の自動車との衝突を回避するため、レーザ距離センサを用いてロボット周囲の物体位置を常に検出し、必要であれば回避する。

3.2 曲がる場所の認識

曲がる場所の認識は以下のように行う。まず学習時に得た、曲がる場所の GPS とオドメトリそれぞれによる位置データと現在の位置データを比較し、両方のセンサによるデータの差がともに誤差範囲内に入った場合に、曲がる場所に近づいたと判断する。GPS データが利用できない場所ではオドメトリデータのみを使用する。曲がる場所では、曲

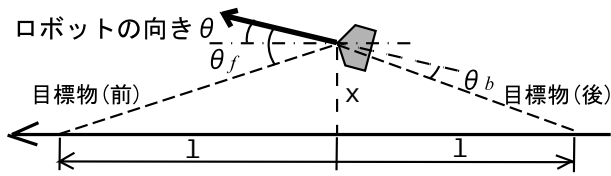


図 9: 観測とロボットの姿勢の関係

がった方向に大きく開けた領域が存在するので、レーザ距離センサによってその方向が開いているかどうかを調べながら直進する。開けている位置に来たら、カメラを曲がる方向へ向けて画像を取得し、曲がる場所での学習画像との照合によって曲がる位置かどうかを判定する。

3.3 直進走行

ロボットの進む方向に目標を設定し、その目標が正面になるように画像フィードバックをすることによって直進する。学習画像と入力画像の照合の場合とは異なり、走行中はあまり色の変動がないので、目標をテンプレートとして登録し、テンプレートマッチングで追跡する。

3.3.1 テンプレートの決定

目標とする方向は、学習画像の水平方向(x 方向)の中心とする。入力画像と学習画像との照合によって得られる x 方向のずれ(dx)から現在の目標方向がわかる。目標方向に選択したテンプレートを用いて次フレーム以降安定した追跡を行うために、唯一テンプレートを選んだ場所ではか照合しないものがよい。そこで、テンプレートを選んだ場所とは異なる入力画像のすべての場所と対応が見つからないものを目標方向の鉛直に探索する。

3.3.2 ロボットの制御

テンプレートが決定されると、テンプレートが入力画像の水平方向の中心にマッチングするようにロボットの回転半径を制御する。

回転半径 r はロボットの目標とする直進経路に対する位置、姿勢によって以下のように決定する。今ロボットの位置、姿勢が図9のようであったとする。各カメラにおける目標方向のずれ θ_f と θ_b はテンプレート位置の中心からのずれ量から計算できる。目標物までの距離 l はわからないがロボットが進む距離に比べて十分に大きいものとする、 θ_f と θ_b からロボットの位置、姿勢 (θ, x) を次式で計算する。

$$\theta = (\theta_f - \theta_b)/2, \quad x = l \tan \frac{\theta_f + \theta_b}{2}$$

ただし、 l はわからないので x に関しては、 $(\theta_f + \theta_b)/2$ の部分の正負のみを評価する。 (θ, x) から回転半径 r を以下の表にしたがって計算する。

表 2: θ, x と r の関係

	$\theta > 0$	$\theta = 0$	$\theta < 0$
$x > 0$	$0.8/\theta$	10.0	$1.2/\theta$
$x = 0$	$1.0/\theta$	∞	$1.0/\theta$
$x < 0$	$1.2/\theta$	-10.0	$0.8/\theta$

このようにしてロボットを制御するが、ある程度進むと画像中の物体の大きさが変化しテンプレートマッチングの結果が信頼できなくなる。そこである定められた距離進む

ごとに次に述べるようにテンプレートの更新を行い、目標とする方向を修正する。

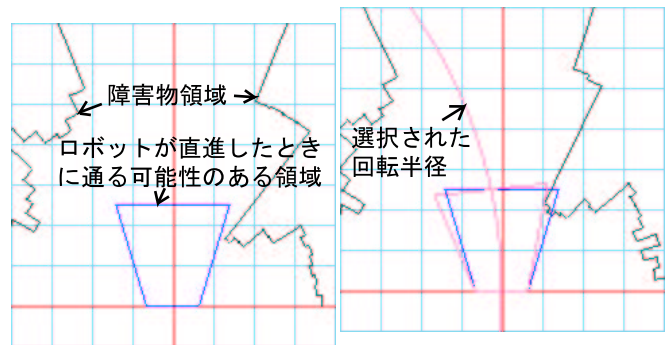
3.3.3 テンプレートの更新

スタート時または曲がった後には、ロボットは、これから進む直進部分における1番目の学習画像の撮影位置の近くにいる可能性が高いと考える。あまり周囲の風景が変化しないような場所では照合がとれる場所の範囲が広い可能性がある、1~3番目の学習画像と入力画像とを照合し、その結果一番照合度が高い場所にロボットがいるとして、その画像照合の結果を用いてテンプレートを決定する。次からの更新時には、一回前での更新時にロボットがいると考えた学習画像とその次の2つの学習画像を用い照合を行う。

3.4 衝突の回避

先に述べた直進制御では遠くの目標しか観測していないので、近くの経路脇の障害物や駐車車両などに衝突するおそれがある。そこで、レーザ距離センサを用いた衝突回避を行う。本研究では、前方視野角180度のSICK社のレーザ距離センサをロボットの前部の地面より50cmの高さに設置して、衝突回避に利用する。

移動による誤差を考慮して、ある回転半径で移動するとき一定時間内にロボットが通る可能性のある領域を台形で近似し、その台形と障害物領域が接触するかどうかで、その回転半径が安全かどうかを判定する。安全な回転半径のうち、テンプレートマッチングから得られる目標回転半径に最も近いものを選ぶ。図10に障害物回避の例を示す。



直進して安全な場合

直進では衝突の可能性があるので回避する場合

図 10: 衝突の可能性判定の例

4 実験

大学構内で2002年4月19日、天候晴れと2002年9月21日、天候晴れに得た学習データから2002年10月19日、天候曇に走行実験を行った。図11に走行経路を示す。図中、(g)と(h)の間の経路は、学習時にGPSによって位置測定ができない部分であったため、オドメトリのみで(h)への接近を検出した。走行時、ロボットは(a)-(h)の曲がる場所を確実に認識し、全経路を安定して走行した。走行距離は約350mである。

(c)(e)の曲がる場所における学習画像を図13に、自律走行時図13の各の学習画像との照合の結果、曲がる場所と判断された際の入力画像を図14に、学習画像と入力画像の照合結果を表3に、自律移動の様子を図12に示す。

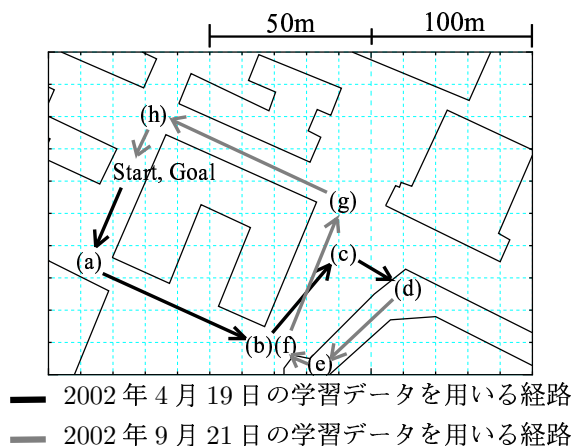


図 11: 走行経路と学習条件



図 12: 自律移動の様子

5 まとめと今後の課題

本論文では、移動ロボットの屋外ナビゲーションにおいて、ユーザによって誘導の際に得た学習画像列と入力画像を照合してロボットの位置を推定しながら誘導する手法を述べた。屋外では物体の見かけの色が天候や季節により変化するので、単純な画像同士の比較では認識がロバストではない。そこで、画像中の物体(空、建物、木)を見かけの色の変化を考慮したモデルを用いて認識し、その認識結果同士を照合することにより、天候や季節の変化にロバストな照合を行う手法を提案した。この照合手法に加えてGPS、オドメトリ、レーザ距離センサのデータを用いて効率的かつ安全にナビゲーションするロボットシステムを構築した。学習時とは季節および天候が異なる日時の走行実験により、提案手法の有効性を確かめた。今後は、落葉した場合などさらに多くの条件下での実験を行う予定である。

現在の手法では、曲がる場所の認識ができないとナビゲーションに失敗するので、失敗を画像、GPS、オドメトリなどから検知し、正しい経路に復帰するための、エラーリカバリ手法の開発が必要である。また、ユーザによる誘導時にロボットが必ずしも望ましい進行方向を向いているとは限らないので、誘導時に撮影された画像列から、どの画像を学習画像として用いるかをユーザが決定している。この自動化も今後の課題である。

参考文献

- [1] J.D. Crisman and C.E. Thorpe, "SCARF: A Color Vision System that Tracks Roads and Intersections", IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 9, No. 1, pp. 49-58, 1993.
- [2] 西川, 森, "簡潔な経路情報を基にした移動ロボットの誘導法", 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 8, pp. 1183-1191, 1994.



(c) (e)

図 13: 学習画像



(c) (e)

図 14: 入力画像

表 3: 入力画像と学習画像の照合結果

(c)	(e)
0.466	0.815

- [3] 城殿, 三浦, 白井, "誘導による移動経験に基づく視覚移動ロボットの自律走行", 日本ロボット学会誌 Vol. 19, No. 8 pp. 1003-1009, 2001.
- [4] S. Maeyama, A. Ohya, S. Yuta, "Autonomous Mobile Robot System for Long Distance Outdoor Navigation in University Campus", J. of Robotics and Mechatronics, Vol. 9, No. 5, pp. 348-353, 1997.
- [5] R. Thrapp, C. Westbrook, D. Subramanian, "Robust localization algorithms for an autonomous campus tour guide", Proc. ICRA, 2001.
- [6] 大野ら, "DGPSとオドメトリを用いた地図に基づく屋外ナビゲーションの試行", 日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002.
- [7] 松本, 稲葉, 井上, "視野画像列を利用した経路表現に基づくナビゲーション", 日本ロボット学会誌 Vol. 15, No. 2, pp. 236-242, 1997.
- [8] S. Li, "Localization along routes, based upon iconic and Global Positioning System information in large-scale outdoor environments", Advanced Robotics, Vol. 15, No. 7, pp. 749-762, 2001.
- [9] Y. Takeuchi and M. Hebert, "Finding Images of Landmarks in Video Sequences", Proc. CVPR, 1998.
- [10] 平田, 白井, 浅田, "単一カラー画像から得られる3次元情報を利用したシーンの解釈", 電子情報通信学会論文誌, Vol. J75-D-2, No. 11 pp. 1839-1847, 1992.
- [11] T.M. Strat and M.A. Fischler, "Context-Based Vision: Recognizing Objects Using Information from Both 2-D and 3-D Imagery", IEEE Trans, PAMI, Vol. 13, No. 10, pp. 1050-1065, 1991.
- [12] 宮下, 石黒, 辻, "T-Net: 実環境における正確な移動ロボットの誘導と環境構造の獲得", 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 986-993, 1996.