

照明変化に頑健で高精度な View-Based Navigation の 実現手法に関する研究

A study on realization methods for robust and accurate view-based navigation to illumination changes

05D5103 萩原 良信

指導教員 渡辺 一弘 教授

SYNOPSIS

This paper describes a reliable method developed for a view-based navigation which uses robust image features against illumination changes. The features are defined by edge information based on a brightness approximation plane method and a SURF method. The system developed in this work has shown not only the robustness of this method to ambient lighting conditions due to indoor illumination or daylight from windows, but also the high capability of its noise rejection for images taken in recording runs. This method has been found to be highly tolerated in larger ambient illumination change than the used conventional method where brightness-based pixel values are utilized. Based on this approach, the experiment has been successfully made in the navigation test even if large ambient lighting condition was given to the robot, by means of the change in the number of the luminescent lamps or in the night and the day.

Keywords: View-based navigation, Illumination change, Approximate plane of brightness, SURF

1 序論

近年、ロボットビジョンの分野において‘見え方’に基づいてロボットをナビゲーションする、View-based navigation が注目されている¹⁾。View-based navigation は、予め得られた経路上の教示画像と、現在の位置で得られた画像の照合によってロボットの自己位置を認識して目的地までナビゲーションする方法である。一般に View-based navigation では、教示走行において多くの画像を記憶するため、ロボットの視覚から得られた画像は、情報量を削減した‘View’として保持される。これまで、周辺画素で平滑化して View を生成する事で撮像ノイズに対する耐性を高めた手法²⁾や、全方位画像の固有値を用いて部分的な景色の変化に対する耐性を高めた手法³⁾などが提案されている。しかしながら、これらの方法は画素の濃度値そのものを処理して特徴量としているため、窓から射し込む太陽光や蛍光灯による実環境での照明変化に対応していない。Matumotoらは、ステレオカメラから得られた視差画像を用いて屋外の日照の変化に対応している²⁾。しかし、視差画像は計算コストが高いため、画像の水平ラインのみに情報を絞り込むなどの工夫が必要になり、視野の狭さから適用環境が制限される場合がある。

画像認識の分野では照明変化に頑健な画像特徴として正規化係数⁴⁾や濃度変化(エッジ)⁵⁾を用いる例がある。正規化係数は、画像全体の絶対値と各画素の濃度値の差によって定義される値で、環境の様な照明の変化に頑健な方法として知られている。一方、濃度変化は、注目画素とその近傍画素との濃度値の差によって定義されるため、様な照明の変化のみならず、部分的な変化にも影響されにくい。実環境では照明が不均一に変化する事が多いために部分的な照明の変化に頑健と考えられる濃度変化を用いる手法は適用範囲が広いと考えられる。しかし、濃度変化の情報は画像の微細な変化に過度に敏感であるため、Viewの照合が視点のずれや撮像ノイズに影響されやすいという問題がある。

そこで、本研究では、濃度変化の情報として輝度近似平面を利用して屋内環境の照明変化に頑健な View-based navigation を実現する。画像を分割したブロックから最小二乗法によって濃度変化を定義する輝度近似平面⁶⁾は、言わばエッジの平均値とも言えるため、上記の過度な感受性を緩和し、Viewの照合時に柔軟性を持たせる事ができる⁷⁾。

これによって、蛍光灯の点灯数や窓から差し込む太陽光などの実環境の照明変化に頑健な View-based navigation が期待できる。このようなブロックベースの方法は、画像の解像度を下げて処理するため、計算コストが低くリアルタイム性の高い処理が可能であるが、位置の分解能が低く、高精度なナビゲーションを実現する事は困難である。そこで、本研究ではブロックベースの手法と合わせて、特徴点ベースの手法を提案し、位置の分解能を向上させた View-based navigation も提案する。特徴点ベースの手法は、取得した画像の解像度で処理ができるため計測精度が高く、高精度なナビゲーションが期待できる。また、特徴点の検出には、照明変化に頑健な特徴点の検出法として知られる SIFT⁸⁾を高速化してオンライン処理に対応させた SURF⁹⁾を用いた。本論文では、まず、ブロックベースの輝度近似平面を用いた View-based navigation を提案し、従来の平滑化を用いた方法²⁾と比較して照明変化に対する頑健性を検証する。次に、特徴点ベースの SURF を用いた View-based navigation を提案し、輝度近似平面との比較実験からナビゲーションの位置精度の向上について検証する。これらの結果から照明変化に頑健で正確な View-based navigation の実現の可能性について述べる。

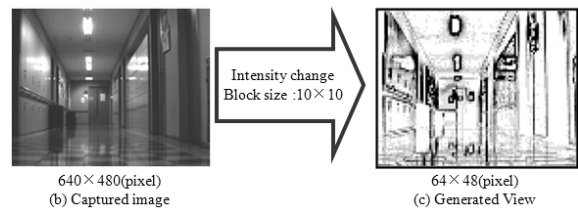
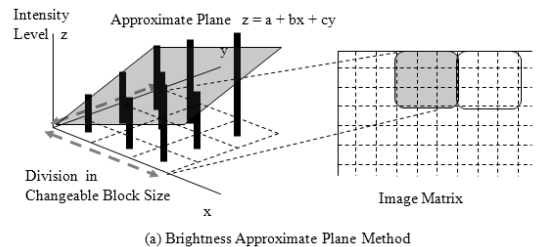


Fig.1 The generation of a robust view against illumination changes

2 輝度近似平面を用いた View-based navigation

2.1 輝度近似平面による View の生成

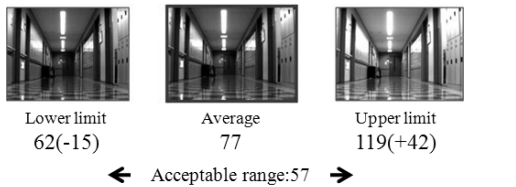
輝度近似平面は、二次元に拡張した最小二乗法によって近傍画素の濃度値を平面式に近似し、この平面の傾きから濃度変化を定義する方法である。輝度近似平面では、Fig. 1(a)のように画像を任意のサイズのブロックに分割する。このときのブロックサイズは、輝度近似平面における最小二乗法の近似区間であり、一つのパラメータによって簡単に調整することができる。分割されたブロックでは、各画素の濃度値を最小二乗法で近似した平面の式 $z = a + bx + cy$ を定義する。さらに、この平面における濃度変化の強度(Strength)が(1)式で定義できる。

$$\text{Strength} = \sqrt{b^2 + c^2} \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 1(b)の撮像画像に対してブロックサイズ 10×10(pixel)の輝度近似平面を適用して生成された画像(View)がFig. 1(c)である。同図の白は濃度変化の傾きが小さいブロック、黒は濃度変化の傾きが大きいブロックを表している。エッジにおいて強い濃度変化の傾きが得られている事がわかる。このとき、生成された画像(View)の解像度は元画像をブロックサイズで割った解像度になっており、ブロックサイズを調整する事で記憶画像の情報量や撮像ノイズ、視点ずれへの耐性が調整できる。256階調グレースケールのVGA画像を10×10(pixel)のブロックで処理した場合、生成画像の解像度は1/100、エッジ強度にfloat型を用いた場合は画素あたり4倍になるので、情報量は1/25になる。

2.2 許容範囲の評価実験

本手法の照明変化に対する頑健性を検証するため、実際の屋内環境においてロボットを用いた走行実験を行った。実験では、カメラの絞りを変えて擬似的に照明変化を与え、本手法の照明変化に対する許容範囲を検証する。また、濃度値を直接的に用いる文献²⁾の従来手法と本手法と比較する事で、照明変化に対する頑健性を評価する。従来手法は、画像をブロックに分割し、ブロック内の輝度の平均値を用いて画像を照合する方法で、ブロック照合処理¹⁰⁾を用いている点で本手法との比較に適している。教示走行では、画像を記憶した地点とロボットのエンコード値を走行データとして記憶し、自律走行では、認識した位置とエンコード値を記憶しておく。これらの実験データから、ナビゲーションの可否を検証する。走行経路は、本研究棟廊下を14m走行させ、照明が変化しても正しく自己位置を同定してナビゲーションできるかを検証した。



(a) An experimental result with the conventional method



(b) An experimental result with the proposed method

Fig.2 The acceptable range experimentally obtained to illumination changes

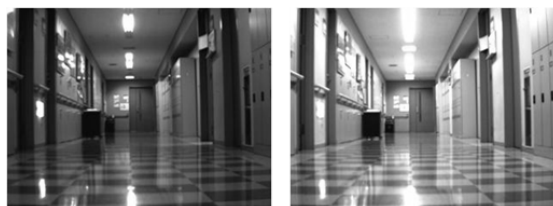
教示走行における画像の平均濃度値をFig. 2中央のように77階調とし、カメラの絞りを調整して画像の平均濃度値を徐々に変化させながら自律走行を行った。その結果から、記憶した全ての地点で正しく位置が認識できた明るさの上限と暗さの下限の幅を照明変化に対する許容範囲としてFig. 2に示す。このとき、ブロックサイズは文献[7]においてVGAの画像をブロックサイズ15×15(pixel)で処理したViewが妥当であるとされていた事から、実験の条件を従来手法と揃えるために本手法のブロックサイズも15×15(pixel)と設定した。

Fig. 2(a), (b)は、それぞれ従来手法と本手法の実験結果である。Fig. 2(a)の従来手法では、ナビゲーション可能な暗さの下限は濃度値62、平均濃度値との差は-15階調であり、明るさの上限は濃度値119、平均濃度値との差は+42階調であった。したがって、上限と下限との差から、照明変化に対する許容範囲は57階調であった。これに対して、Fig. 2(b)の本手法では、ナビゲーション可能な暗さの下限が濃度値41の-36階調、明るさの上限が濃度値158の+81階調で、照明変化に対する許容範囲は117階調であった。従来手法と本手法の照明変化に対する許容範囲を比較すると、本手法は従来手法に対して約2倍程度の許容範囲をもっている事がわかった。この結果から本手法は従来手法に比べて画像全体で明るさが均一に変化する場合は、広範囲な照明の変化に対応できる事が示唆された。

2.3 実環境での走行実験

実際の屋内環境での照明変化は、太陽光や屋内照明の変化によって起こるため、画像全体の明るさが均一に変化するとは限らない。本実験では、実環境での照明変化として廊下の蛍光灯の点灯数の変化について走行実験を行った。ブロックサイズは、同様に15×15(pixel)とした。Fig. 3(a), (b)は、それぞれ教示走行時と自律走行時の廊下の照明条件である。教示走行時には、廊下に設置されている蛍光灯の半分を点灯し、自律走行時には、廊下の全ての蛍光灯を点灯させた。ロボットは廊下の12mの経路を走行した。

Fig. 4(a), (b)は、Fig. 3に示した環境で得られた従来手法²⁾と本手法のそれぞれの走行実験の結果である。同図の横軸は走行距離、▽は教示走行において画像を記憶した位置であり、←○→は自己位置を同定した区間と位置番号を表している。ここで、教示走行における画像の記憶は、一定以上景色の異なる画像を記憶する事で類似する画像による位置の誤認識を防いだ。また、教示、自律走行における位置や区間の情報は、ロボットの走行速度とエンコード値から計算して取得している。ナビゲーションの可否は、走行経路上でViewを記憶したすべての地点において正しく自己位置が同定されているか否かで判断した。教示走行において画像を記憶した位置▽が、同じ番号の←○→の区間の内に位置している場合、自己位置は正しく同定されており、▽が異なる番号の←○→の区間に位置している場合、自己位置は誤って同定されている。例えば、Fig. 4(a)の従来手法では、教示走行においてViewが5枚記憶されたため、▽は1から5番までである。しかし自己位置同定においては、最初から自己位置を2番と誤認識して、教示走行において記憶された1番の画像は認識されていない。これは、照明の変化によって画像が正しく照合されなかった事が原因であると考えられる。後の3番、4番の位置においても、自己位置を2番、5番と誤認識しており、従来手法では蛍光灯の点灯数が変化した場合、正しく自己位置を同定する事は困難であった。同様の環境で10回の走行実験を行ったが、従来手法では1度も全ての地点で正しく自己位置を同定する事ができなかった。一方、Fig. 4(b)の本手法では、教示走行において6枚の画像が記憶され、記憶された全ての位置において、記憶画像の番号▽と自己位置同定の番号○が対応して推移している事がわかる。



(a) The illumination condition in a recording run (b) The illumination condition in an autonomous run

Fig.3 An environment used for the experiment of illumination changes

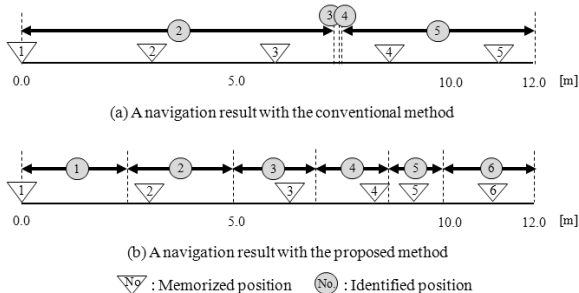


Fig.4 Experimental results obtained in the environment of Fig.3

この事から本手法は、蛍光灯の点灯数を変化させた環境において、正しく自己位置が同定できた事が確認できる。同様の環境で10回の走行実験を行ったが、10回中9回で全ての地点で正しく自己位置を同定する事ができた。

2.4 結果と考察

最小二乗法によって濃度変化を定義する輝度近似平面を用いて、画像中のノイズの影響を除去しながら環境の照明変化を許容した画像の比較方法を提案した。さらに、輝度近似平面の耐ノイズ性と照明変化に対する頑健性をView Based Navigationに適用してその効果を検証してきた。カメラの絞りによって再現した擬似的な照明変化の実験では、照明変化に対する許容範囲を検証し、本手法が従来の濃度値を直接的に用いた手法に比べて2倍程度の一様な画像の明るさの変化に対応できる事が示された。また、実際に屋内の太陽光や蛍光灯の照明条件が変化する環境で移動ロボットを用いた走行実験を行い、本手法は従来手法に比べて実環境で生じる照明変化に対しても頑健である事が示された。この結果から、輝度近似平面のView Based Navigationへの適用は、環境の一様な照明の変化に対して有効であり、実環境での照明の変化に対しても頑健である事が示された。

3 SURFを用いたView-based navigation

3.1 SURFによるViewの生成

Speeded Up Robust Features (SURF)は、特徴点抽出アルゴリズム Scale-Invariant Feature Transform (SIFT)の高速化版で、SIFTの照明変化、スケール変化、回転に対する頑健性を継承している。このため、View-based navigationに適用する事で照明変化に対する頑健性が期待できる。また、特徴点を画像照合に用いる事で、記憶する情報の低減が可能である。ブロックベースでは、記憶する画像の情報量と計算コストを低減するために画像の解像度を低下させていたが、特徴点では取得した画像の解像度で照合が可能であるため、ナビゲーションにおける位置分解能の向上が期待できる。Fig. 5(a)の画像からSURFによって特徴点を抽出した結果がFig. 5(b)である。Fig. 5(b)の円の中心が特徴点の位置、円の半径が特徴点のスケールを表している。この画像では、特徴点一つあたりの情報量は40Byteで、



(a) A captured image in a corridor (b) Extracted features with SURF

Fig.5 The extraction of key points with SURF

369個の特徴点が抽出されたので、Viewの情報量は約15Kbyteである。グレースケール(1Byte)のVGA(640×480)の画像の情報量は約300KByteなので、情報量は1/20に低減できている。Viewの照合においては、撮像画像と記憶画像の特徴点同士を照合して全ての特徴点と一致した特徴点の割合によって相関値を計算する。

3.2 位置分解能の比較実験

SURFによるView-based navigationの位置分解能の向上を検証するため、照明が変化する環境で移動ロボットを用いて位置の分解能を評価する実験を行った。実験では、2章で述べた輝度近似平面を用いたブロック照合による手法を比較手法として、SURFと位置の分解能を比較する事で位置精度の向上を検証する。まず、移動ロボットに廊下の11mの区間を教示と自律の二回走行させ、搭載したカメラの画像を100ms毎にPCに記憶した。次に、記憶した画像列を用いてPCのシミュレーションによって両手法のナビゲーションの位置の分解能を検証する。このとき、教示走行はFig. 6(a)の廊下の蛍光灯を全て点灯した状態で行い、自律走行はFig. 6(b)の廊下の蛍光灯を半分消灯した状態で行い、走行環境に照明の変化を与えた。従来手法は、パラメータによって位置の分解能が異なるため、ナビゲーション可能な位置の分解能について調査した。Table 1がブロック照合の位置の分解能とパラメータの関係である。行がブロックサイズ、列が相関値の閾値で、各セルの値がそのパラメータにおける位置の分解能を示している。また、×はナビゲーションに失敗した事を示している。ブロックサイズ5×5(pixel)では、撮像ノイズやロボットの走行中の振動の影響を受けて正常にナビゲーションする事ができなかった。ブロックサイズ20×20、25×25(pixel)では、最大で24cmの位置の分解能が得られる事がわかった。この結果から、実験に用いる輝度近似平面のパラメータは最大



(a) The illumination condition in a recording run (b) The illumination condition in an autonomous run

Fig.6 An environment used for the experiment of position resolutions

Table 1 The position resolution in each parameter

		Threshold of correlation value (%)			
		40	45	50	55
Block size (pixel)	5×5	×	×	×	×
	10×10	25cm	×	×	×
	15×15	55cm	26cm	×	×
	20×20	79cm	48cm	24cm	×
	25×25	157cm	73cm	39cm	24cm

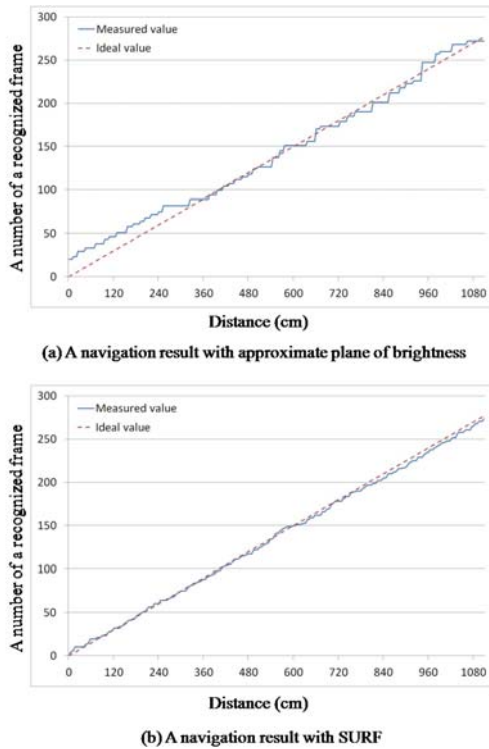


Fig.7 Experimental results of the position resolution

Table 2 The position resolution with approximate plane of brightness and SURF

	A number of recorded views	Position resolution (cm)	Average of position error (cm)
Approximate plane of brightness	44	25	31.0
SURF	274	4	2.7

の位置の分解能が得られるブロックサイズ 20×20 (pixel), 相関値の閾値 50 に設定した. Fig. 7(a), (b) がそれぞれ輝度近似平面と SURF の走行実験の結果である. グラフの横軸は, ロボットの走行距離, 縦軸は, 認識した View の番号, 実線は認識した位置の計測値, 点線は位置の理想値である. 両手法で認識した View の番号が位置に対応して推移している事から Fig. 6 の環境において正常なナビゲーションが確認できる. ここで, 両手法のナビゲーション結果における位置の分解能を Table 2 にまとめる. 同じ 11m の走行区間において, 輝度近似平面は 44 枚, SURF は 274 枚の View を記憶した. 走行距離を View の枚数で割ったものを位置の分解能とすると, 輝度近似平面は 25cm, SURF は 4cm になる. また, 位置精度の指標となる位置誤差の平均は, 輝度近似平面は 31.0cm, SURF は 2.7cm であった. この結果から, 特徴点ベースの SURF を用いた手法は, ブロック照合を用いた輝度近似平面に比べて 10 倍程度の位置の精度でロボットのナビゲーションが可能である事が示された.

3.3 結果と考察

特徴点抽出の手法である SURF を View-based navigation に応用し, 照明変化に対する頑健性を保持したまま位置の分解能を向上させる方法について述べてきた. 実験では, 照明が変化する環境において, SURF と輝度近似平面の位置の分解能を比較した. その結果, 特徴点ベースの画像照合によって, ブロック照合では困難であった cm オーダーで

の View-based navigation が可能である事が示された. さらに, 特徴点の抽出に SURF を用いる事で環境の照明変化に対する頑健性を保持したまま位置の分解能を向上させる事ができた. 今回使用した PC (CPU: Core2Duo2.5GHz, Memory: 3GByte, OS: WindowsXP SP3) では, SURF の特徴点抽出と特徴点の照合 (一回の位置同定) に要した処理時間は 200ms 程で実際のロボットのナビゲーションに適用可能である.

4 結論

本稿では, View-based navigation の課題の一つである環境の照明変化に対応するための二つのアプローチについて述べた. ブロックベースのアプローチとして, 最小二乗法によって画像の濃度変化を定義する輝度近似平面を応用し, 画像中のノイズの影響を除去しながら環境の照明変化を許容した画像の比較方法を提案した. さらに, 輝度近似平面の耐ノイズ性と照明変化に対する頑健性を View Based Navigation に適用してその効果を検証してきた. 実際に照明条件が変化する屋内環境で移動ロボットを用いた走行実験を行い, 実環境で生じる照明変化に対して輝度近似平面を用いた View-based navigation が有効である事が示した. さらに, 特徴点ベースのアプローチとして, 照明変化に頑健な特徴点抽出法として知られる SURF を View-based navigation に適用し, 情報量を低減しながらブロックベースのアプローチよりも位置の分解能を向上させる方法を提案した. 照明が変化する環境で輝度近似平面と SURF の比較実験を行い, SURF を用いる事でブロックベースでは困難であった cm オーダーの View-based navigation を実現した. これによって View-based navigation の課題の一つである環境の照明変化に対応する事ができた. しかし, 実環境では照明変化以外にも人や物の移動による物理的なシーンの変化がある. 今後は, このような物理的なシーンの変化に対応して実環境で運用できる View-based navigation を提案していきたい.

参考文献

- 1) I. Horswill : Polly : A Vision-Based Artificial Agent, Proc. of Int. Conf. on AAAI '93, pp.824-829 (1993)
- 2) 松本吉央, 稲葉雅幸, 井上博允 : ビューベーストアプローチに基づく移動ロボットナビゲーション, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, 5, pp.506-514 (2002)
- 3) 岩佐英彦, 粟飯原述宏, 横矢直和, 竹村治雄 : 全方位画像を用いた記憶に基づく位置推定, 信学論, Vol. 80-D2, 2, pp.310-320 (2001)
- 4) R.L.Lillestrand : Techniques for change detection, IEEE Trans. Computer, Vol. C-21, No. 7, pp.654-659 (1972)
- 5) 佐藤雄隆, 金子俊一, 丹羽義典, 山本和彦 : Radial Reach Filter (RRF) によるロボトな物体検出, 信学論, Vol. 86-D2, 5, pp.616-624 (2003)
- 6) 崔龍雲, 上野和晃, 神内恵, 伊与田健敏, 渡辺一弘, 久保田譲 : LCD パネルにおける画像の輝度近似平面を用いた色表示の不均一の検出, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, 1, pp.1-7 (2005)
- 7) Y.Hagiwara, Y.Choi, T.Iyota, Y.Kubota and K.Watanabe : Practical Application of the Brightness Approximation Plane Method with a Simple Parameter, Proc. of Int. Conf. on ICCAS '07, p.105 (2007)
- 8) D.G.Lowe, Object recognition from local scale invariant features, Proc. Of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), pp. 1150-1157 (1999)
- 9) Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool : SURF: Speeded Up Robust Features, ECCV2006
- 10) 斉藤文彦 : ブロック照合投票処理を用いた速へいに強い画像マッチング, 信学論, Vol. 84-D2, 10, pp.2270-2279 (2001)