ビューシーケンスに基づく 照明変化に頑健な屋内外ナビゲーション

山城 容一朗* 怡土 順一* 竹村 憲太郎*
松本 吉央* 高松 淳* 小笠原 司*

Indoor and Outdoor Navigation based on View Sequence under Variable Illumination Condition

Yoichiro Yamagi*, Junichi Ido*, Kentaro Takemura*, Yoshio Matsumoto*,
Jun Takamatsu* and Tsukasa Ogasawara*

We propose a view-based indoor/outdoor navigation method as an extension of the view-sequence navigation. The original view-sequence navigation method uses block matching with normalized correlation for localization, which is sensitive to local illumination changes. Therefore it is only applied for indoor environment. In this paper, we adopt accumulated block matching for improving the robustness against locally changing illumination, in which a template is divided into a set of small patches, and each patch is utilized for matching. We also propose localization criteria which help a robot decide its motion. Our experimental results demonstrate the proposed methods can be applied for indoor/outdoor environments.

Key Words: View based Navigation, Indoor/Outdoor, View Sequence, Illumination Condition

1. はじめに

移動ロボットに関する研究の進展に伴い、警備巡回監視ロボット [1] や館内案内ロボット [2] など、実際の環境中を自律移動しながらサービスを提供することにより、我々の生活をサポートするロボットシステムが注目されている。警備・案内というある特定の目的に特化したロボットの場合、制限された活動範囲を行動できれば十分であるが、汎用的なロボットを用いてよりよいサービスを実現するためには、異なる建物間の移動等、屋内外を問わずシームレスに移動できるシステムが必要不可欠となる。

そこで本研究では、屋内外のシームレスなナビゲーションを同一アルゴリズムで実現する方法を提案する。同一アルゴリズムを用いることにより、屋内外で手法を区別する必要がなく、実現が簡単となる。本稿では、屋内での自律移動手法として提案されたビューシーケンスナビゲーション [3] を拡張し、屋外の照明条件（時間経過による光源の位置、明るさの変化およびそれに伴う陰影）の変化に対する頑健性を向上することで屋内外のシームレスな走行を実現する。

以下、本稿は次のような構成となっている。第2章では関連研究を紹介し、本研究のアプローチについて述べる。第3章では照明変化に対応したナビゲーション手法を提案する。第4章では、提案手法の有効性を示すために、従来手法との比較実験結果および屋内外の連続的な走行実験の結果について述べる。最後に第5章で、まとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

移動ロボットのナビゲーションは、環境中に特殊なデバイス・視覚マーク等（本稿では、これをランドマークと定義する）を利用するか否かにより、大きく二つに分けることができる。前者の例として、竹内ら [4] は QR コードを、Kulyukin ら [5] は RFID タグを走行環境に設置することでナビゲーションを実現している。しかし、インフラ整備の必要性やそれらのランドマークが利用可能な環境に適用が限定されるという問題がある。

これに対して、すでに設置されているランドマークを利用する手法として、GPS を用いる手法（例えば文献 [6]）がある。通常 GPS のみでは位置推定精度が低いため、オドメトリとの融合 [7] や、さらにレーザーレンジファインダとの融合 [8] により精度を向上する手法も提案されている。しかし GPS は屋内環境で利用することができない。吉田ら [9] は、ナビゲーションに利用可能なランドマークとして点字ブロックを利用する手法を提案している。点字ブロックが設置されている場所はまばら

原稿受付 2008 年 12 月 19 日

*奈良先端科学技術大学院大学

*Nara Institute of Science and Technology

■ 本論文は有用性で評価されました。

であり、適用可能な環境には制限がある。

後者のランドマークに依存しないナビゲーションとして、松本ら [3] は教示された走行経路画像を再現することにより移動ロボットのナビゲーションを行うビューシーケンスナビゲーションを提案している。教示画像と観測画像を正規化相関によるテンプレートマッチングにより比較しているため、照明変化や障害物により自己位置推定の精度が悪化してしまうという問題がある。結果として、その利用は屋内に限定されている。障害物による悪影響を軽減する方法として、天井画像を利用する方法 [10] [11] が提案されているが、こちらもその利用は屋内に限られる。

これに対し、桂ら [12] は、直接画像比較を行うのではなく、空・木・建物・人工物といった画像特徴を学習・比較することにより、照明変化に頑健なビューシーケンスナビゲーションを提案している。利用している画像特徴は屋外を想定したものに限られており、屋内に存在する画像特徴がナビゲーションに利用可能であるかどうかは示されていない。

本研究は適用の容易性を踏まえた上で、松本らが提案するランドマークに依存しないビューシーケンスナビゲーション [3] を拡張し、照明変化に対する頑健性を付与することにより、屋内外のシームレスなナビゲーションの実現を目指す。

3. 照明変化に頑健なビューシーケンスナビゲーション

ビューシーケンスナビゲーション [3] は目標走行経路の見え(ビュー)の連続(シーケンス)を教示し、その見えを再現するようにロボットを動かすことで自律走行を行う手法である。自律移動の際には、

- (1) 目標のビューと現在のビューとのずれの決定
- (2) ビューシーケンス中で目標となるビューの切り替え
- (3) ずれに対するロボットのリアクション

の三つが必要になる。

3.1 累積ブロックマッチング法

従来のビューシーケンスナビゲーションでは、正規化相関によるテンプレートマッチングを用いているため、局所的な照明変化に悪影響を受ける問題があった。そこで、照明変化に頑健にするために累積ブロックマッチング法 (ABM: Accumulated Block Matching) [13] を利用する。テンプレートを小領域に分割し、それらの相関値の平均が最大となる位置をマッチング位置とする[†]。本稿で取り扱う局所的な照明変化の問題は元々の手法が対象としている遮蔽の問題と類似しており、ABM を用いることで頑健にすることができる。

照明変化への頑健性を評価するため、屋外に固定カメラを設置し、10~16 時の間に 30 秒間隔で 820 枚の画像取得を行った。10 時の画像をテンプレートとして正規化相関と ABM でマッチングを行った際の変位 (x_{error} , y_{error}) の大きさ ($\sqrt{x_{error}^2 + y_{error}^2}$) を Fig. 1 に示す。カメラは固定されているため、同一位置にテンプレートがマッチングすることが好ましい。図より、ABM が正規化相関よりも安定してマッチングしていることが確認できる。また、正規化相関でのマッチングで誤差が大きくなっている時刻 (15 時ごろ) のマッチング結果は Fig. 2 となっており、これまで問題とされてきた照明変化

Fig. 1 Matching error using normalized correlation (upper) and using accumulated block matching (lower)

Fig. 2 The result of template matching with a normalized correlation (upper row) and of accumulated block matching (lower row)

Fig. 3 Normalized correlation in template matching (left) and average of correlations in accumulated block matching (right)

に対応したマッチングを実現できていることが分かる。

Fig. 3 は、実験で得られた正規化相関と ABM の相関値の平均を示したものである。これより、正規化相関よりも ABM の

[†]佐治らはテンプレートの分割数を可変にする手法を提案している [14]。より安定なマッチングを実現するには分割数の可変は重要であるが、計算コストが増大するため本稿では分割数は固定とした。

Fig. 4 Calculation of quasi-distance between recorded and current images using our defined motion vectors

方が平均が低くなっていることが分かる。これは、ABMを用いた場合、小領域に分割し相関値の信頼性が低下したために生じたと考えられ、このままではビューシーケンスの切り替えが困難である。よって相関値を利用せずに適切にビューシーケンスを切り替える手法を考える必要がある。

3.2 画像間移動量

適切にビューシーケンスを切り替えるため、2種類の画像間移動量を定義する。Fig. 4(a)に示すように、現在の入力画像 I とビュー V_n のマッチングをABMによって行い、テンプレートの移動ベクトル F を計算する。この水平成分 F_x を画像の水平移動量と呼ぶ。

次に、Fig. 4(b)のようにABMにおける m 個の小領域 $T_i (i = 1, 2, \dots, m)$ のマッチング位置をそれぞれの近傍 p [pixel] の探索範囲で再探索する。その近傍で各小領域の相関値が最大となる位置を求め、近傍探索前の位置からの移動ベクトル F_{zi} を算出し、これを画像の奥行き移動ベクトルと定義する。また、画像の奥行き移動量 F_z を相関値 c_i が0より大きい小領域 s 個の移動ベクトルの大きさの平均値として式(1)のように求める。

$$F_z = \frac{1}{s} \sum_{i \in K} |F_{zi}| \quad (K = \{i \mid c_i > 0\}) \quad (1)$$

奥行き移動量を安定に推定するため、ノイズの影響を考慮して、実際の処理では F_z にローパスフィルタ（単純移動平均法）をかけた値を用いる。

3.3 ABMと画像間移動量を用いたビューシーケンス

屋内外を自律移動するロボットの移動は、Fig. 5に示すように

- (a) 狭い通路でのその場回転
 - (b) 緩やかな曲線走行を含む直線走行
- の2種類の移動を考える必要がある。

その場回転の場合、ビューシーケンスの切り替えには水平移動量 F_x を用いる (Fig. 5(a))。定義より、水平移動量は教示の際のビューの向きと現在のビューの向きの差に対応する。現

Fig. 5 Robot control and localization

在の目標ビューを V_n 、その次のビューを V_{n+1} とし、現在の入力画像 I と2枚のビューとの水平移動量をそれぞれ $F_{x(n)}$ 、 $F_{x(n+1)}$ とすると、 $F_{x(n)} > F_{x(n+1)}$ となった時点でビューを切り替え ($n \leftarrow n+1$) ればよい。

直進走行の場合、ビューシーケンスの切り替えには奥行き移動量 F_z を用いる (Fig. 5(b))。具体的には、現在の入力画像 I と2枚のビューとの奥行き移動量 $F_{z(n)}$ 、 $F_{z(n+1)}$ が $F_{z(n)} > F_{z(n+1)}$ となった時点でビューを切り替える。ロボットが教示ビュー V_n が撮影された場所よりも手前に位置した場所から移動を開始する場合を考える。ロボットが移動するにつれて $F_{z(n)}$ と $F_{z(n+1)}$ は $F_{z(n)} < F_{z(n+1)}$ を満たしながら減少する。ロボットの位置が V_n の撮影場所に最も近くなったとき、 $F_{z(n)}$ は極小値を示す。その後、 $F_{z(n)}$ は増加し $F_{z(n+1)}$ はビュー V_{n+1} の撮影場所に近づくにつれて減少する。つまり、 $F_{z(n)} > F_{z(n+1)}$ となった時点でビューを切り替えればよい。ちなみに、教示の際のビューシーケンスの作成にも、その場回転では水平移動量 F_x を、直進走行では奥行き移動量 F_z を相関値の変わりに用いればよい。

その場回転はビューシーケンスが切り替わるまで回転運動を続けることで実現できるが、直進移動の場合は、さらに前進運動に加え、教示ビューとの向きのズレに応じて回転運動を行う必要があり、水平移動量 $F_{x(n)}$ の大きさをもとに左右のモータの回転速度を決定する。緩やかな曲線走行の場合は、直進走行のアルゴリズムで対応が可能である。

Fig. 6 Mobile Robot (EMC-230)

Fig. 7 Recorded image sequences on a path at 12:00 (upper) and at 13:30 (lower)

4. 実験

4.1 ハードウェア構成

実験に用いる移動ロボット (Fig. 6) として、電動車椅子 (今仙技術研究所: EMC-230) を用いる。ロボットの制御は USB I/O ボード (テクノウェーブ (株): USBM3069F) を用いて行う。また、IEEE1394 カメラ (SONY: DFW-VL-500) を用いることで、グレースケール画像を取得する。カメラ設定としては、シャッタースピードおよびゲインのオート機能を用いて画像に適切なコントラストが得られるように調整した。

4.2 従来手法との比較実験

提案手法の有用性を示すために、従来手法との比較実験を行う。自律移動を行うためには、走行中のビューに合わせて、適切にビューシーケンス中のビューを切り替えていく必要がある。実験環境は大学構内の約 100 [m] の直線経路とし、Fig. 7 はその経路画像の一部である。このように時間が変化することで、陰影が大きく異なり画像の見え方が変化する環境で行う。640 × 480 [pixel] から 80 × 60 [pixel] に縮小したグレースケール画像を入力画像とし、そのうちテンプレート領域は画像中心の 40 × 30 [pixel] とする。12 時に 2 回と 13 時半に 1 回、移動ロボットを手動で走行させ、走行中の画像をすべて記録した。12 時 (1 回目) の画像をビューシーケンスとして、従来手法と提案手法の比較を行うが、ビューの枚数がほぼ同数 (従来手法: 22 枚, 提案手法: 24 枚) になるように画像間の移動量の閾値の調整を行った。具体的には、従来手法では相関値の閾値を 0.9, 提案手法では 25 個の小領域に分割し、近傍探索距離 2 [pixel], 画像間移動量の閾値を 1.8 [pixel] と設定した。また、奥行き移動量は 20 フレームの時間平均とした。

12 時 (2 回目) と 13 時半の画像に対して走行シミュレーションを行ったところ、従来手法では Fig. 8, Fig. 9, 提案手法では Fig. 10, Fig. 11 に示す結果が得られた。それぞれの図に記された番号は Fig. 7 に記された番号に対応している。Fig. 8 (a) は、現在画像 I とビュー V_n , V_{n+1} との相関値を示しており、 $n+1$ 枚目のビューに近づくにつれてビュー V_n との相関値は減少、 V_{n+1} の相関値は増加し Fig. 8 (b) に示すようにビューが逐次切り替わり、適切に画像列中の位置推定が実現できている。提案手法では Fig. 10 (a) に示すように、 $n+1$ 枚目のビューに近づくにつれてビュー V_n との奥行き移動量は増加、 V_{n+1} との奥行き画像間距離は減少し、Fig. 10 (b) に示すように位置推

Fig. 8 Correlation between current image and recorded images (a) and the estimated view ID (b) at 12:00

Fig. 9 Correlation between current image and recorded images (a) and the estimated view ID (b) at 13:30

定が実現できている。

一方、13 時半の画像に対して従来手法では Fig. 9 のように、12 時の場合と異なりビュー V_n , V_{n+1} との相関値がともに減少してしまい、適切な位置推定ができていない。これに対して、提案手法では Fig. 11 のように、従来手法ではビューが適切に切り替わらなかった画像においても画像の移動量が適切に求まり、正しく位置推定を実現していることが分かる。また、16 時の経路画像においても従来手法のビューシーケンスでは、ビューが適切に切り替わらなかったが、提案手法では適切に動作するこ

Fig. 10 Quasi-distance between current image and recorded images (a) and the estimated view ID (b) at 12:00

Fig. 11 Quasi-distance between current image and recorded images (a) and the estimated view ID (b) at 13:30

Fig. 12 Indoor/outdoor environments map and robot navigation path

とを確認した。この結果から、従来手法よりも照明変化に対して頑健にナビゲーションが可能であることが分かる。

4.3 屋内外ナビゲーション実験

奈良先端科学技術大学院大学構内と情報科学研究科棟の1階でナビゲーション実験を行った (Fig. 12)。移動距離は約 300 [m] で天候は晴れであった。建物へ入る場所に自動扉があるが、実験時には自動扉は開放したままの状態とした。記録走行では、直進走行における奥行き移動量の閾値を 1.2 [pixel]、その場回転

Fig. 13 Snapshots of navigation (Left) and recorded View Sequence image (Right)

における水平移動量の閾値を 10 [pixel] とし、9 時にビューシーケンスを作成した。作成されたビューの総数は 95 枚となっている。Fig. 12 上で表された S はナビゲーション開始地点、G は終了地点を表す。Fig. 13 にナビゲーション時のビューの一部とそのときのロボットの様子を示す。この図上にある番号は Fig. 12 上の位置に対応している。ナビゲーションを 12 時に行ったところ、ビューが適切に切り替わり、屋内外環境のナビゲーションを行うことができた。移動ロボットの速度は 1 [km/h] であり、経路走行の所要時間は約 20 分であった。この実験によって、屋内外を同一アルゴリズムで走行可能であることを示し、またその場回転が必要である環境にも適用可能であることを確認した。

5. ま と め

本研究では、照明変化に適応可能なビューシーケンスナビゲーションを提案し、屋内外のシームレスなナビゲーションを実現した。ビューシーケンスナビゲーションでは、画像間移動量を推定することで自律移動を行う。しかしながら従来手法では、教示走行から時間が経過すると照明条件の変化が大きい屋外では、教示画像列との対応関係を頑健に推定することが難しく、走行が困難であった。この問題を解決するために、まず、累積ブロックマッチング法を用いることで照明変化が生じる環境下においても、頑健なマッチングを実現した。また、移動ベクトルを用

いて画像の水平移動量と奥行き移動量を推定し、直進および回転制御を行うビューシーケンスナビゲーションを確立した。これによって、屋外走行における弱点を大幅に克服し屋内外にわたるシームレスな自律移動を同一アルゴリズムで実現可能であることを示した。

提案手法は照明条件の変化に頑健な手法であると同時に、障害物が経路上に存在している場合にもナビゲーションが可能となっている。しかしながら、照明変化によって生じる陰影と障害物を区別することは難しく、障害物回避は困難である。より頑健なナビゲーションを実現するためには、障害物検出および回避が重要であるため画像処理技術や他のセンサの利用によって対処する必要がある。今後の課題として取り組む予定である。

参 考 文 献

- [1] 下笹: “警備ロボットの現状”, 映像情報メディア学会誌, vol.57, no.1, pp.79–82, 2003.
- [2] W. Burgard, A. Cermers, D. Hahnel, G. Lakemeyer, D. Schulz, W. Steiner and S. Thrun: “Experiences with an interactive museum tour-guide robot,” Artificial Intelligence no.114, pp.3–53, 1999.
- [3] 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.
- [4] 竹内, 太田, 池田, 相山, 新井: “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, pp.2239–2246, 2000.
- [5] V. Kulyukin, C. Gharpure, J. Nicholson and S. Pavithran: “RFID” in robot-assisted indoor navigation for the visually impaired,” Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1979–1984, 2004.
- [6] E. Abbott and D. Powell: “Land-vehicle navigation using GPS,” Proc. of the IEEE, pp.145–162, 1999.
- [7] K. Ohno, T. Tsubouchi, B. Shigematsu, S. Maeyama and S. Yuta: “Outdoor navigation of a mobile robot between buildings based on DGPS and odometry data fusion,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1978–1984, 2003.
- [8] S.-H. Kim, C.-W. Roh, S.-C. Kang and M.-Y. Park: “Outdoor navigation of a mobile robot using differential GPS and curb detection,” Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3414–3419, 2007.
- [9] 吉田, 大矢, 油田: “点字ブロックを利用した自律移動ロボットの屋外ナビゲーション”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.4, pp.469–477, 2004.
- [10] S. Thrun, M. Beetz, M. Bennewitz, W. Burgard, A. Cremers, F. Dellaert, D. Fox, D. Hähnel, C. Rosenberg, N. Roy, J. Schulte and D. Schulz: “Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva,” Int. Journal of Robotics Research, vol.19, no.1, pp.972–999, 2000.
- [11] 紙, 松本, 今井, 小笠原: “天井画像列を用いた屋内ナビゲーション”, 第18回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.331–332, 2000.
- [12] 桂, 三浦, ヒルド, 白井: “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”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.1, pp.75–83, 2005.
- [13] 斉藤: “ブロック照合投票処理を用いた速い画像マッチング”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J84-D-II, no.10, pp.2270–2279, 2001.
- [14] 佐治, 三谷: “可変サイズブロック分割を用いたテンプレートマッチング”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J88-D-II, no.2, pp.450–455, 2005.

山城容一郎 (Yoichiro Yamagi)

2007年関西大学工学部卒業。2009年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年、パナソニック株式会社入社。在学中は移動ロボットのナビゲーションの研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

竹村憲太郎 (Kentaro Takemura)

2006年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年奈良工業高等専門学校電気工学科助手。2007年同助教。2008年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。移動ロボットおよびヒューマンインターフェースに関する研究に従事。ACM, IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)

高松 淳 (Jun Takamatsu)

2004年東京大学大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了。博士(情報理工学)。東京大学生産技術研究所特任助教。同特任講師を経て、2008年から奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。知能ロボットの動作獲得、三次元形状モデリング・形状解析に関する研究に従事。

電子情報通信学会会員。(日本ロボット学会正会員)

怡土順一 (Junichi Ido)

2000年九州大学工学部機械エネルギー工学科卒業。2009年奈良先端科学技術大学院大学より論文博士(工学)取得。奈良先端科学技術大学院大学研究員を経て、2009年から産業技術総合研究所特別研究員。ヒューマンロボットインタラクション、ロボットビジョンに関する研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

松本吉央 (Yoshio Matsumoto)

1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。博士(工学)。1999年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助手。2002年同助教。2007年大阪大学大学院工学研究科特任教授。2009年より産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。情報処理学会、電子情報通信学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

小笠原司 (Tsukasa Ogasawara)

1983年東京大学大学院工学研究科情報工学専門課程博士課程修了。工学博士。同年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所入所。1993～1994年ドイツ、カールスルーエ大学客員研究員。1998年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授となり現在に至る。知能ロボットの研究に従事。計測自動制御学会、情報処理学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)