

車載全方位カメラ映像を用いた街並変化検出の高精度化

佐藤准嗣[†] 高橋友和[†] 井手一郎[†] 村瀬洋[†]

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

E-mail: †{jsato,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし ITS 技術の一環として、迅速な地図の更新を実現するための技術が求められている。我々は、車載カメラから得られる実映像と地図上の位置情報とを高精度に対応付け、その結果を用いて、自動的に市街地の街並変化を検出する手法を提唱してきた。この手法は、様々な時期の市街地映像と地図を効率よく対応付ける段階と、対応付けられたデータから街並変化地点を検出する段階の2つから構成される。データの収集の際は、低コストなビデオカメラと普及型 GPS を搭載した多数の一般車両が撮影を意識することなく自由に走行し、あらゆる時期、経路の映像を得ることを想定する。第2段階における街並変化の検出では、従来手法では同一地点で撮影された画像間の画素値の差分を計算し街並変化地点の検出を行ったが、日照条件の変化等の影響で誤検出が多いという問題があった。そこで本稿では、街並が日時と共に変化することに着目し、同一地点の画像の変化と撮影日時との相関を街並変化の判定基準に用いる手法を新たに提案し、検出の高精度化を検討する。約1年間にわたり収集した44組のデータを用いて従来手法との比較実験を行い、提案手法の有効性を示した。

キーワード 全方位画像, 固有空間法, DP マッチング

Accurate change detection in streetscapes using car-mounted omni-directional images

Junji SATO[†], Tomokazu TAKAHASHI[†], Ichiro IDE[†], and Hiroshi MURASE[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University

Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

E-mail: †{jsato,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract As a part of ITS technology, techniques that realize quick update of street map are required. We have previously proposed a method for detecting changes in streetscapes from images captured by car-mounted omni-directional cameras. It comprises two stages; construction of a street image map that relates accurately a map position to a street image taken from the position at different times, and detection of changes in streetscapes from the street image map. To collect images at various times and routes, many cars equipped with a low-cost camera and a general GPS device run freely. In the second stage (detection of changes), a method that we have previously developed detects changes in streetscapes using differences of pixel values between images captured at the same position. This method, however, had many false detections, because of illumination changes. Focusing on the fact that streetscapes vary depending on the time of a day, we propose a new method that uses correlation between image change and time change. Experiments with 44 data items collected during one year, demonstrate the effectiveness of the new method.

Key words omni-directional image, eigenspace method, DP matching

1. はじめに

地図の迅速な更新は、ITS（高度道路交通システム）の分野、特にナビゲーションシステムの高度化の観点で重要である。ナビゲーション機能を有効に利用するためには、使用する地図を

頻繁に更新し、常に最新の状態にしておく必要がある。しかし地図を製作する現場では、人手で街中をくまなく歩くことにより更新のための情報を収集しているため、金銭的にも時間的にもコストを要している。そのため、新たな建物の建築等による街並の変化に迅速に対応することは難しいのが現状である。

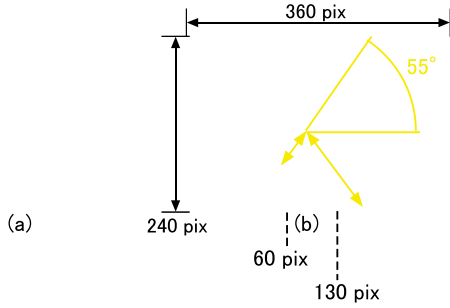


図 3 (a) 全方位画像, (b) 特徴ベクトル抽出に用いるマスク ($N = 25,538$), (c) マスクにより切り出された画像

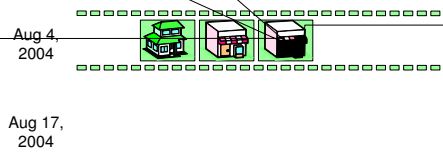


図 4 DP マッチングによる映像間対応付け

0, ノルム 1 となるように正規化する. ここで N はマスク領域の画素数である. 全方位画像の周辺部や上下部分には人や他の車両が映り込む場合があるため使用領域を限定する.

次元圧縮の準備処理として, 様々な経路を走行して撮影した映像から抽出された複数のフレームを集めて学習サンプルとし, 元の特徴ベクトルよりも次元の低い固有空間を作成する. 次元圧縮処理では, 入力映像の各フレームの特徴ベクトル $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p\}$ を, 作成した固有空間に投影し, 固有空間上の座標系列 $\{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_p\}$ を得る. ここで p は, 切り出された映像のフレーム数である.

3.3 DP マッチングによる映像間対応付け

次に, 異なる時期に同じ地点から撮影されたフレームどうしを対応付けるために, 次元圧縮した映像間でフレーム単位の対応付けを行う. 撮影時の車両速度の違いによる映像の時間的な伸縮を吸収し, 映像全体でフレーム順序の整合をとるため, DP マッチングを用いる (図 4). ここでは異なる日時の同一区間映像 2 つを対応付ける場合を考える. つまり 2 映像の固有空間上の座標系列 $\{\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_p\}$ と $\{\mathbf{y}'_1, \mathbf{y}'_2, \dots, \mathbf{y}'_q\}$ を用いる. 相違度の尺度として, 固有空間上のユークリッド 2 乗距離

$$d(i, j) = \|\mathbf{y}_i - \mathbf{y}'_j\|^2 \quad (1)$$

を用いる. そして $D(1, 1) = d(1, 1)$ とし, 漸化式

$$D(i, j) = \min \begin{cases} D(i-1, j) + \omega_1 \cdot d(i, j) \\ D(i-1, j-1) + \omega_2 \cdot d(i, j) \\ D(i, j-1) + \omega_3 \cdot d(i, j) \end{cases} \quad (2)$$

を再帰的に計算する. ここで $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ は相違度に対する重みであり, 実験により決定する. このとき $D(p, q)$ を計算する

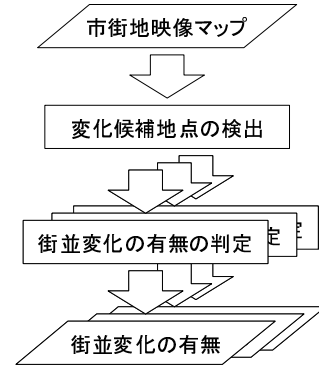


図 5 提案手法の処理手順

までに選んだフレーム番号対 (i, j) の系列が, 2 映像のフレーム間の対応を表し, $D(p, q)$ が映像間の相違度を表す. しかし $D(p, q)$ は映像のフレーム数に依存するため, 正規化された相違度 $\hat{D}(p, q) = D(p, q)/n$ とする. ここで n は, DP マッチングで選んだノード数である. もしも DP マッチングで正しい対応がとれなかった場合, $\hat{D}(p, q)$ は通常より外れて大きな値になると考えられる. そこでしきい値 d_D を設け, $\hat{D}(p, q)$ がこれを上回る結果を外れ値として破棄する.

DP マッチングは 1 対 1 の対応付けである. よって c 個の映像を使用する場合は, ある 1 つの映像を基準映像とし, それと残りの $c-1$ 個の映像との間で対応付けを行う. これにより, 映像中の任意地点に対して, 相互に類似した c 枚のフレームとそれに付随する GPS 座標を c 個得ることができる. 2 つの映像間に速度差がある場合は, 1 つのフレームに対して複数のフレームが対応付けられるが, この場合は, 中央のフレームを対応するフレームとして抽出する.

3.4 位置情報の高精度化

GPS による測定値は, 長時間の観測を行えば系統誤差 (真値からの誤差) を小さく抑えられるため [12], 長期間にわたって同一地点で測位された測定値の平均は, 真値に近づくと考えられる. そこで本研究では, 異なる日時に同一地点で測定された GPS 座標の平均値をその地点の高精度な座標と考える.

正しく対応付けられた c 枚のフレームに付随する c 個の座標は, 同一地点で異なる日時に観測された座標であるといえる. これらの平均座標を元の c 枚のフレームに付与することで, 各フレームの位置情報の高精度化をねらう.

4. 第 2 段階: 街並変化の検出

市街地映像マップから各地点におけるある期間の画像を取り出し, 街並変化 (建物の建築や改装) の有無を判断することで, 街並変化地点を検出する.

まず, 3.3 で用いた固有空間上の類似度により, 変化が起こった候補地点をおおまかに探索する. 次に, 候補地点に対応する画像群を取り出し, 街並変化の有無を判定する. これには, 従来手法では画素値の差分を, 提案手法では画像の変化と撮影日時との相関を用いる. 処理手順を図 5 に示し, 以下で詳しく説明する.

図 6 表 2 の区間 C における距離 D_i

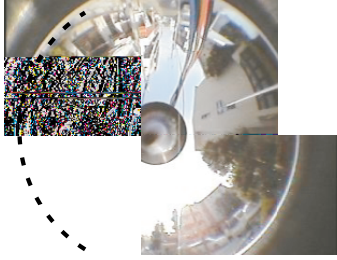


図 7 パノラマ画像を左右に切り分けた画像

4.1 変化候補地点の絞り込み

市街地映像マップ中のある経路から、街並変化のある候補の地点をおおまかに検出する。

この処理では、3.2 で作成した低次元の特徴ベクトルを用いる。ある地点 i に対応付いたある期間 T における画像群の固有空間上の座標系列を、時系列順に $\{\mathbf{y}_1^i, \mathbf{y}_2^i, \dots, \mathbf{y}_q^i\}$ とする。ここで q は画像の枚数である。そしてこの地点の最も古い画像とその他の画像との距離

$$D_i = \frac{\sum_{j=2}^q \|\mathbf{y}_j^i - \mathbf{y}_1^i\|^2}{q-1} \quad (3)$$

を計算する。

距離 D_i をある経路に関してプロットし、成分の雑音除去を目的としたメジアンフィルタ・ガウシアンフィルタをかける。こうして得られる距離 D_i のグラフを図 6 に示す。このグラフの中で、しきい値 d_r を超えた極大点を候補地点とする。極大点を用いるのは、最も変化している可能性が高い地点を候補とするためである。以後、全方位画像をパノラマ展開 [13], [14] し、車両の左右の画像に切り分け、左右を別々の地点として扱う (図 7)。

4.2 従来手法：画素値差分による変化判定

我々はこれまで、同一地点の画像間の画素値差分を用いた街並変化判定を行ってきた [5]。以下に手法の概要を簡単に述べる。

市街地映像マップから、候補地点に対応付いた、期間 T 中の複数の画像フレームを時系列順に抽出し、最も古いフレームから $P_0, P_1, \dots$ とする。そして P_0 とその他のフレームとで画

図 8 候補地点の画像群を低次元特徴空間に投影し、主成分分析を行う

素値の差分を計算し、この相違度が高い日時を街並変化ありと判断する。このとき異なる日時での走行車両の左右のずれを考慮し、画像を動かして近似的な位置合わせをしながら差分計算する。そして時系列順に並べた相違度を平滑化してノイズを除去し、相違度がしきい値 d_T を超える場合に、この地点を街並変化ありと判断する。

しかしこの手法では、日照条件の変化のために相違度が大きくなってしまい、誤検出が多いという問題があった。

4.3 提案手法：画像と撮影日時の相関による変化判定

街並変化がある地点では、画像の変化と撮影日時とに相関があると考えられる。そこで、以下の処理でこの相関を計算し、相関が高い地点を変化ありと判定する。

画像の特徴ベクトルは、図 7 (a) または (b) のような画像の各画素の R 値、 G 値、 B 値を要素として持つ $3M$ 次元ベクトルとし、平均 0、ノルム 1 となるように正規化する。ここで M は各画像の画素数である。事前処理として、様々な地点の画像を学習サンプルとして主成分分析を行い、 $3M$ よりも次元の低い低次元特徴空間を作成しておく。そして市街地映像マップから、候補地点に対応付いた複数の画像フレームを抽出し、その特徴ベクトルを作成した低次元特徴空間へ投影する。

次に、低次元特徴空間において画像特徴の変化を最もよく表す軸を求めるために、投影後の点についてさらに主成分分析を行う (図 8)。求めた第 1 主成分を $\mathbf{e}_1'$ とすると、画像 i の $\mathbf{e}_1'$ 上の値は

$$u_i = \mathbf{y}_i \cdot \mathbf{e}_1' \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

となる。よって画像の変化と撮影日時との相関係数は以下の式で表すことができる。

$$C = \frac{\sum_{i=1}^p (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (u_i - \bar{u})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^p (v_i - \bar{v})^2}} \quad (5)$$

ここで v_i は各画像の撮影日時を数値化したもので、 $\bar{u} = \sum_{i=1}^p u_i / p$ 、 $\bar{v} = \sum_{i=1}^p v_i / p$ である。そこで、相関係数 C がしきい値 d_C を超えた場合にこの地点を街並変化ありと判断する。

5. 実験および考察

5.1 実験概要

本手法を用いて市街地映像マップを構築し、街並変化の検出

表 1 実験に用いたデータ

映像撮影期間	2004 年 8 月～2005 年 8 月
走行回数	44 (平均約 8,000 フレーム)
カメラ取り付け位置	撮影車両中央, 鉛直上向き
映像のフレームレート	30 frame/sec
GPS 測位更新時間	1 sec.
画像サイズ	360 × 240 pixels
対応付け特徴ベクトルの次元	圧縮前 64,458 次元, 圧縮後 20 次元

表 2 実験として用いた区間

区間	全長	街並変化	道路形態
A	約 150m	あり	片側 1 車線道路
B	約 200m	なし	1 車線一方通行道路
C	約 190m	あり	1 車線道路
D	約 180m	あり	片側 1 車線道路
E	約 240m	あり	1 車線一方通行道路

表 3 各区間における, 街並変化検出の対象期間

区間	期間 T
A	2004 年 8 月 10 日～2005 年 8 月 4 日
C	2004 年 8 月 10 日～2004 年 10 月 11 日
D	2004 年 10 月 11 日～2005 年 8 月 4 日
E	2004 年 8 月 10 日～2005 年 8 月 4 日

表 4 街並変化検出実験における各種パラメータ

メジアンフィルタサイズ	3
ガウシアンフィルタの σ	3.0
d_r	全変化地点を含むように実験的に設定

表 5 映像間対応付け成功率の一部

区間	成功率
A	87.5%
B	95.4 %

実験を行い, 従来手法との比較を行った. 使用したデータを表 1 に示す. また 3.1 で述べたようにして切り出した区間を表 2 に示す. 3.2 の固有空間の作成には, 表 1 のデータとは異なる日に撮影した映像から, 無作為に 1,000 フレームを取り出し, 学習サンプルとして用いた. 街並変化の検出に関し, 4.1 で述べた期間 T は表 3 のようにし, 他のパラメータは表 4 のようにした.

使用したデータで作成した市街地映像マップの精度に関して, 表 5 に映像間対応付け成功率の一部を示す. 成功判定は目視で行い, 対応付いたフレームが最も類似したものの場合は成功, 対応付いたフレームより類似するものが前後に存在していた場合は失敗とし, 全対応付け中で成功した割合を成功率とした.

5.2 実験結果

まず街並変化の候補地点として 40 地点を検出した. この中で正解となる街並変化地点は 7 地点ある.

従来手法, 提案手法において, それぞれしきい値を変化させたときの再現率-適合率グラフを図 9 に示す.

図 10 に, 街並変化があると検出された地点を撮影した実画像を示す. 実験で用いるカメラは全方位カメラであるが, 見易

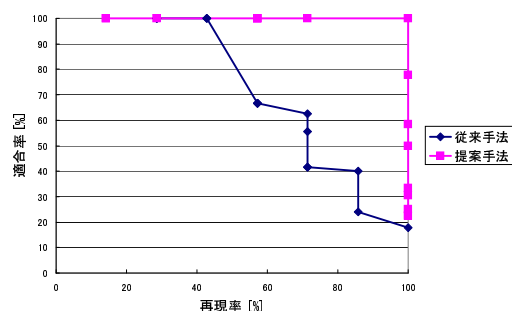


図 9 各手法での再現率-適合率グラフ

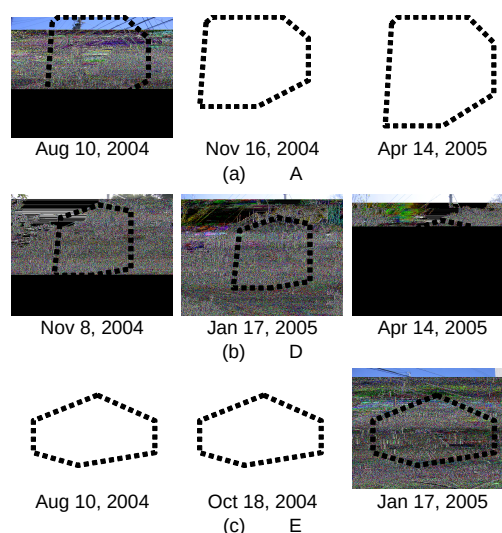
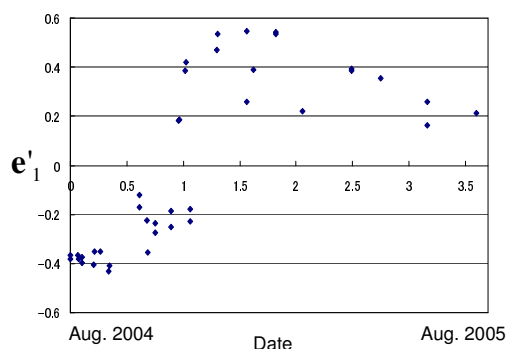


図 10 街並変化を検出した地点の実画像の一部: 点線部が変化した部分.

図 11 図 10 (区間 A) における画像特徴の変化 (式 4 における u_i) と撮影日時 (1 日を 0.01 として数値化): 相関係数 0.72

さのためにここでは同一日時, 同一地点をデジタルカメラで撮影した画像を掲載する. これを見ると, 検出された地点付近で街並が変化していることがわかる.

図 11 に, 図 10 (a) での, 画像特徴の変化と撮影日時との散布図を示す.

5.3 考察

従来手法では, もれなく街並変化を検出 (再現率 100%) した際, 適合率は 17.9% であった. これに対し提案手法では, しきい値を適切に設定することによって再現率 100% (7 件/7 件),

図 12 従来手法で誤検出した地点の実画像

図 13 図 12 の地点における画像特徴の変化 (式 4 における u_i) と撮影日時 (1 日を 0.01 として数値化) : 相関係数 0.32

適合率 100% (7 件/7 件) を達成し、街並の変化を正しく検出することができた。

図 12 に、従来手法で誤検出した地点の実画像を示す。この地点は、映る空領域が広いと、日照条件の影響を受けやすく、従来手法では基準画像との差分値が大きかったため誤検出した。図 13 に画像特徴の変化と撮影日時との散布図を示す。画像特徴の分散は大きい、撮影日時との相関が小さいため、提案手法において誤検出を抑制できたといえる。

図 14 に、区間 E において季節変化に伴い落葉等の樹木の変化が見られる地点での、画像特徴の変化と撮影日時との散布図を示す。本実験では期間 T を 1 年間としたことで、この地点での相関係数を低く抑えた。地図更新という目的ならば樹木の変化は検出しないことが望ましいといえる。しかし図中の矢印で示した期間では画像特徴の変化と撮影日時との相関が見られるため、期間 T を適切に設定すれば、このような樹木の変化も検出可能であると考えられる。

6. む す び

本稿は、異なる時期に撮影された市街地映像群から、高精度に街並変化を検出する手法を提案した。手法の第 1 段階では、長期間にわたり同時に取得した車載カメラ映像と GPS 座標を多数用い、異なる時期に同一区間を走行して得た複数の映像どうしを対応付けた。映像間対応付けは固有空間上の DP マッチングにより、高精度な対応付けを実現した。そして第 2 段階で、同一地点の画像変化と撮影日時との相関を計算することで、従来手法に比べて高精度に街並の変化を検出することを確認した。

今後の課題として、より大量のデータに対する適用や、街並変化の検出において手法の適用期間 T を変えた実験などが挙げられる。

図 14 季節により樹木が変化した地点における画像特徴の変化 (式 4 における u_i) と撮影日時 (1 日を 0.01 として数値化) : 相関係数 0.30

謝辞 日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に感謝する。本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金および 21 世紀 COE プログラム補助金による。

文 献

- [1] 桑原昌人, 根本仁, 浴町栄, 久永聡, 神田準史郎, “映像によるリアルな情報提供を実現する地図連動ソリューション” リアルマップシステム”, <http://www.mdis.co.jp/index.html>
- [2] 山野芳樹, “モバイルマッピングシステムによる道路空間データ収集手法の開発,” APA, no.77-1, (財) 日本測量調査技術協会, Nov. 2000
- [3] 神田準史郎, 脇本浩司, 田中聡, “街並み映像を利用した携帯電話向け道案内システム,” 2004 信学総大, A-17-21, Mar. 2004
- [4] 佐藤准嗣, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, “車載全方位カメラと GPS を用いた市街地映像マップの構築,” 2005 信学総大, D-12-43, Mar. 2005
- [5] J. Sato, T. Takahashi, I. Ide and H. Murase, “Change Detection in Streetscapes from GPS Coordinated Omni-Directional Image Sequences,” Proc. 18th Int. Conf. on Pattern Recognition, vol.4, pp.935-938, Aug. 2006
- [6] 川崎洋, 谷田部智之, 池内克史, 坂内正夫, “実世界映像の自動構造化によるインタラクティブ利用,” 信学論 (D-II), vol.J82-D-II, no.10, pp.1561-1571, Oct. 1999
- [7] 上原将文, 全炳東, “数値地図を利用した広域都市 3 次元モデル構築,” 信学論 (D-II), vol.J84-D-II, no.8, pp.1921-1924, Aug. 2001
- [8] 宮川勲, 石川裕治, 若林佳織, 荒川賢一, “車両運動投影モデルに基づく全方位画像系列からの市街地空間の 3 次元構造復元,” 情処学コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, vol.45, no.SIG13(CVIM10), pp.34-53, Dec. 2004
- [9] S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, J. Abeki, T. Yano, M. Nerio, K. Honda and K. Ikeuchi, “A photo-realistic driving simulation system for mixed-reality traffic experiment space,” Proc. 2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.747-752, Jun. 2005
- [10] ヴェイストーン株式会社, 全方位センサ VS-C14N, <http://www.vstone.co.jp/top/pdf/products/sensor/VS-C14N.pdf>
- [11] H. Murase and S. Nayar, “Visual learning and recognition of 3-D object from appearance,” Int. J. Comput. Vision, vol.14, pp.5-24, Jan. 1995
- [12] 坂井丈泰, “GPS 技術入門,” 東京電機大学出版局, 2003
- [13] 八木康文, 谷内田正彦, “実時間全方位視覚センサ,” 情処学コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, vol.42, no.SIG13(CVIM3), pp.19-32, Dec. 2001
- [14] 横矢直和, 山澤一誠, 竹村治雄, “全方位ビデオカメラを用いた視覚情報メディア,” 情処学コンピュータビジョンとイメージメディア研究会論文誌, vol.42, no.SIG13(CVIM3), pp.59-70, Dec. 2001