

エピポーラ拘束を利用した撮影位置の異なる 航空写真からの建造物の変化抽出方法

渡辺 真太郎

宮島 耕治

株式会社 NTT データ

情報科学研究所

あらまし

GISのベースとなる地図の情報更新には、時間をおいて撮影した2枚の航空写真を比較し、そこから判読された建造物に関する変化の情報を利用する。航空写真は一般に撮影範囲が広く、オペレータの目視による判読では時間を要するため、コンピュータを用いた判読の支援が必要とされている。このとき、コンピュータで航空写真を比較する際に生じる問題を容易にするためには、撮影位置や撮影時期・時刻等の撮影条件が同じ航空写真を用いるのが理想である。しかし、航空機は指定した位置に飛行するのが難しいことから、撮影位置を同一にすることは困難である。また、航空写真の撮影は晴天時に行う必要があり、気象の影響を受けることから、撮影時期・時刻を同一にすることは困難である。従って、撮影位置および撮影時期・時刻の異なる2枚の航空写真から建造物に関する変化の情報を抽出しなければならない。それら撮影条件の異なる航空写真間では、大きく分けて次の3つの変化が存在する。(i) 物理的な建造物の変化。(ii) 撮影位置の違いによる航空写真中のシーンの見え方の変化。(iii) 撮影時期・時刻の違いによる影の形状の変化。オペレータの目視による判読を支援するためには、これらの変化を識別し、物理的な建造物の変化のみを抽出する必要がある。そこで本論文では、撮影位置の違いと撮影時期・時刻の違いにロバストな建造物の変化抽出方法を提案する。そして、実画像へ提案方法を適用し、その結果について述べる。

A Method for change detection of buildings using epipolar constraint from aerial images taken at different positions

Shintaro Watanabe

Koji Miyajima

Laboratory for Information Technology

NTT DATA CORPORATION

Abstract

To renew maps of GIS, information about building changes is required. The information about building changes can be detected from aerial images taken at different times. Usually, operators detect building changes by hand through comparing aerial images. Generally, complex and wide urban area is projected on aerial images, so the operators spend much time to detect building changes from aerial images. Thus, to detect building changes quickly, it is required that computers support the operators. To make the problem be easy, it is to be desired that aerial images are taken in same conditions, such as, same position, same time, etc. However, it is hard to take them in same conditions. The reasons for this are following: An airplane which attaches camera is difficult to fly at specified positions, in addition aerial images must be taken under fine weather regardless of times. Therefore, building changes must be detected from aerial images taken at different positions and different times. In these images, there are three kinds of changes: (i) physical changes of buildings, (ii) appearance changes of buildings and (iii) changes of shadows. To help operators' detecting changes of buildings, it is necessary to distinguish the building changes from these three kinds of changes. In this paper, we propose a method to detect building changes only from aerial images taken at different positions and times. Then experiments have shown that the proposed method can detect building changes from real aerial images.

1 はじめに

GIS (Geographic Information Systems) のアプリケーションが増えるにつれ、GIS のベースとなる地図を最新の状態に保つことが大きな課題となっている。その課題の解決法の一つに、定期的に過去と最新の航空写真を比較して、物理的に変化した建造物、例えば、新築、取壊し、改築等の起こった領域を抽出し、そこから得られる位置の情報を基に地図のデータを更新する方法がある。従来、オペレータが目視により航空写真を判読し、建造物の変化を抽出していたが、航空写真は一般に広域を高分解能で撮影されるため、その作業は非常に時間を要していた。そこで、コンピュータを利用した航空写真の判読の支援が必要とされている。コンピュータにより建造物の変化の候補を自動的に抽出できれば、オペレータはその抽出結果を参照することによって、航空写真の判読を迅速に行うことができる。地図更新のために用いる航空写真は、コンピュータで変化を抽出することを考えると、撮影位置や撮影時期・時刻等の撮影条件ができる限り同じものであることが望ましい。この理由は、撮影条件が異なると以下の問題が生じるためである。

- 撮影位置が異なると、航空写真中では建造物の側面等、シーンの見え方が異なる。このため、建造物の変化とシーンの見え方の変化が混在し、コンピュータではこれらの識別が困難となる。
- 撮影時期・時刻が異なると、主に晴天時に撮影される航空写真では影の形状の違いが顕著となる。このため、建造物の変化と影の形状の変化が混在し、コンピュータではこれらの識別が困難となる。

しかしながら、現状は撮影位置については、航空機搭載の GPS (Global Positioning System) を利用して決定する。このため、元来誤差をもつ GPS が撮影位置のずれに影響を与えるので、航空写真を同じ位置で撮影することは難しい。このとき、撮影位置のずれが微小であっても、航空写真を撮影するカメラの画角は大きい。そのため、航空写真の周辺部では高さの大きい建造物は、その見え方の違いが確認できる。また、撮影時期・時刻については、判読を容易にするために航空写真を明瞭に撮影する必要性があることから、晴天日の日中に撮影を行う。影の形状の変化がない状況にするためには、過去と最新の航空写真の撮影間隔を例えば一年後のほぼ同じ時期・時刻とすれば良いが、撮影すべき時に晴天となるとは限らない。このように、航空写真の撮影は気象の状況に左右されるため、時期や時刻を優先して撮影することは難しい。

従って、コンピュータで変化を抽出する上での課題は、撮影位置や撮影時期・時刻が異なる航空写真から建造物の変化、シーンの見え方の変化、影の形状の変化をそれぞれ識別することである。そこで本論文では、その課題を解決する方法を提案する。本論文の構成は次の通りである。まず、2章で空撮画像における変化抽出について従来の研究とその課題について述べる。次に、3章で本論文で提案する建造物の変化抽出方法について述べる。そして、4章では本提案方法により実際の航空写真から建造物の変化を抽出し、その実験結果を示すとともに考察を行う。最後に、5章では本提案方法についてまとめと今後の課題を述べる。

2 空撮画像の変化抽出に関する従来の研究

1章で述べたように本論文で扱う航空写真は撮影位置や撮影時期・時刻が異なる2枚の航空写真である。これらの航空写真間には、建造物の変化、シーンの見え方の変化、影の形状の変化が混在し、そこから建造物の変化のみを抽出することは簡単な問題ではない。航空写真からの建造物の変化抽出について従来行われてきた研究では、筆者ら [5] は建造物の変化と影の形状の変化が混在する中で、建造物の変化のみを抽出する方法を提案した。この方法では用いる航空写真は撮影位置が同一であることを仮定している。従って、この方法によって撮影位置が異なる航空写真から建造物の変化を抽出することはできない。また、Huertas ら [1][2] や Leclerc ら [3][4] は同一時期・時刻に撮影された複数枚の航空写真からステレオ視によって被写体 (建造物) を3次元モデル化し、その3次元モデルに基づいて建造物の変化を抽出する方法を提案した。Huertas らは過去の航空写真から得た3次元モデルを現在の航空写真に投影し、その投影したモデルの輪郭と現在の航空写真のエッジ成分が一致するか否かを調べることによって建造物の変化を抽出した。一方、Leclerc らは過去と現在の航空写真からそれぞれ得た3次元モデルについて、高さが一致するか否かを調べることによって建造物の変化を抽出した。これらの方法では、3次元モデルを利用するため建造物の変化とシーンの見え方の変化が混在する問題は解消できる。しかしながら、全ての建造物を3次元モデル化することは困難であるという問題が残る。さらに建造物の変化抽出の精度は、3次元モデルの精度に依存する。3次元モデルの精度を向上させるためには非常に多くの同一時期・時刻に撮影された航空写真が必要となる。そして、それら複数枚の航空写真にレジストレーションを施さなければならない。この作

業は大変手間がかかるため、3次元モデルを利用する変化抽出の方法は現実的ではなくなる。

本提案方法では、シーンの見え方の変化と建造物の変化の識別には、撮影位置や撮影時期・時刻が異なる2枚の航空写真をステレオペアと見なし(以降、これを「疑似的ステレオペア」と呼ぶ)、これらの航空写真にステレオマッチングを適用する。このとき、建造物の変化が存在すると、その領域に対応する領域が存在しないので、疑似的ステレオペアで対応が取れない領域を建造物の変化の候補とする。そして、影の形状の変化と建造物の変化の識別には、筆者らが従来提案した方法[5]を利用する。

従来、被写体の3次元形状を推定することを目的として、空撮画像におけるステレオマッチングの研究が行われている。Butler[6]は衛星画像のステレオペアに対し、エッジ情報によるステレオマッチングを行っている。この方法は、エッジから輪郭をある程度の長さで近似できる線分を抽出し、画像空間における視差の連続性の仮定とエピポーラ拘束を利用して、線分の類似性を尺度としてステレオペアの対応を取るものである。一般にシーンが複雑となる空撮画像を建造物や道路等の輪郭を線分のみで近似して表現することは、画像が単純となるので解析を容易に行うことができる。しかしながら、画像が単純になれば、局所的に見ると多くの線分が類似していると思われ易くなるので、ステレオペアの対応を取った結果に誤りが多くなる。Mohanら[7]は、エッジでステレオペアの対応を取るときに生じる誤りを識別するために、視差の分布を利用した。ステレオペアを局所的に見れば、視差は大きく変化しないことに着目して、視差に変化が生じないようにエッジの対応を取った。ここで、疑似的ステレオペアにこれらの方法を適用することを考えると、建造物の変化が存在する領域では、対応する領域が存在しないためエッジの対応が必ず誤って取られる。しかし、エッジの対応が誤りであることは識別できても、それが建造物の変化によって生じたのか、影の形状の変化によって生じたのかは識別することができない。また、O'Neillら[8]は、空撮画像のステレオペアにオクルージョン、影、被写体の不連続形状があり、対応を取ることが困難である問題に対し、Ohtaら[9]の方法を利用し、ステレオペアにおける輝度値のプロファイルの類似性に基づいて適切な対応が取れることを示した。しかしながら、この方法によっても、対応が取れない要因までは識別できないため、疑似的ステレオペアに適用すると、建造物の変化によって対応が取れないのか、影の形状の変化によって対応が取れないのかは識別できない。

3 建造物の変化抽出方法

3.1 提案方法の概要

本提案方法で用いる航空写真は、撮影位置や撮影時期・時刻が異なる2枚1組の疑似的ステレオペアの画像である。それらを撮影したカメラのキャリブレーションは行われていてカメラパラメータは既知であるとする。また、被写体は平坦な地表面に垂直に立つ建造物であるとする。本提案方法では、まず、疑似的ステレオペアとした航空写真において、対応する部分領域を探索する。その際、従来のステレオマッチングと同様に対応を探索する問題を容易にするため、エピポーラ拘束を利用する。そのために3.2節に述べるレクティフィケーションを施して、疑似的ステレオペアの航空写真を同じ座標系に射影する。このレクティフィケーションによって、疑似的ステレオペアの航空写真中の全てのエピポーラ線は平行になるため、一回の探索毎にエピポーラ線を求める手間が省ける。さらに、コンピュータでエピポーラ線への対応する部分領域の探索を行う際、全てのエピポーラ線が水平となるようにしておけば、計算効率が高まる。次に、疑似的ステレオペアで地表面のGCP (Ground Control Point[†]) が一致するようにそれぞれ画像の座標系を平行移動させておき、エピポーラ線上で対応する部分領域を探索する。その結果、対応が取れない部分領域を建造物の変化の候補とする。次に、建造物の変化の候補から3.3節に述べる方法で、シーンの見え方の変化、影の形状の変化を除外して建造物の変化を得る。

以上の処理によって、疑似的ステレオペアの航空写真から建造物の変化を抽出する。

3.2 航空写真のレクティフィケーション

航空写真に対してレクティフィケーション、すなわち、カメラの光軸が鉛直下方を向いた状態で地表面を撮影したようにするための処理について述べる。航空写真を I_a とし、 I_a を撮影するカメラを C とすると、それらの関係は図1のように表すことができる。ここで、 (X_C, Y_C, Z_C) は世界座標系における C の位置であり、 ω, ϕ, κ はそれぞれ C の座標系における x 軸、 y 軸、 z 軸周りの C 自身の回転である。このとき C の焦点距離を f とすると、 I_a 内の点 (u, v) とレクティフィケーションを施した後の I_a 内の点 (u', v') の関係は次で表せる

[†] 地表面上の目印となる点。簡易的には建造物と地表面の際の角、あるいは、横断歩道や車線等道路のペイントの角が利用できる。

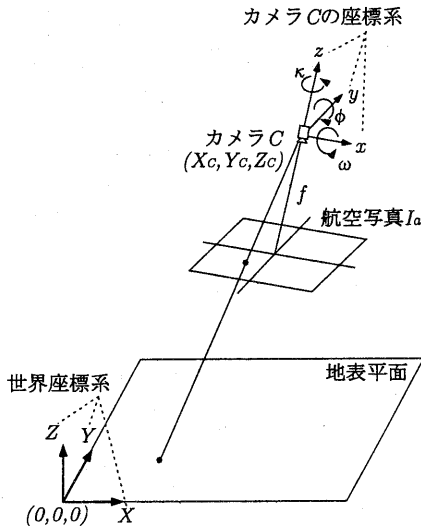


図 1: 航空写真とカメラの関係

[10][11].

$$\begin{cases} u_{t1} = u \cos(-\kappa) - v \sin(-\kappa) \\ v_{t1} = u \sin(-\kappa) + v \cos(-\kappa) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{t2} = f \frac{-f \sin(-\phi) + u_{t1} \cos(-\phi)}{f \cos(-\phi) + u_{t1} \sin(-\phi)} \\ v_{t2} = f \frac{v_{t1}}{f \cos(-\phi) + u_{t1} \sin(-\phi)} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} u' = f \frac{u_{t2}}{f \cos(-\omega) - u_{t2} \sin(-\omega)} \\ v' = f \frac{f \sin(-\omega) + u_{t2} \cos(-\omega)}{f \cos(-\omega) - u_{t2} \sin(-\omega)} \end{cases} \quad (3)$$

このレクティフィケーションを施した後、さらに、疑似的ステレオペアの航空写真では焦点距離は同じであるとして、エビポーラ線上で対応する部分領域の探索をコンピュータで容易に行うため、それらの航空写真が同一の世界座標系のXY平面に乗るように (u', v') の座標系の縮尺を f/Z_c で正規化する。

3.3 建造物の変化抽出

疑似的ステレオペアの航空写真には、撮影位置が異なることによりシーンの見え方に違いがあることや撮影時期・時刻が異なることにより

影の形状に違いがあることは1章で述べたとおりである。さて、ここでの課題は建造物の変化、シーンの見え方の変化、影の形状の変化が混在する中で建造物の変化のみを抽出することである。以下では、疑似的ステレオペアの航空写真の一方を参照画像、もう一方を対象画像と呼ぶこととし、建造物の変化を抽出する処理について述べる。

まず、対象画像中のある一つの部分領域について参照画像中で対応が取れるか否かをエビポーラ線上で探索しながら輝度値の相関値の大小に基づいて調べる。このとき、参照画像と対象画像は地表面のGCPが一致するように座標系を平行移動してあるので、探索の開始点は、対象画像中で部分領域が存在する位置と同じ参照画像中の位置である。そして、一回の探索における相関値の最大値が経験値に基づくある閾値以下で対応が取れないとき、その部分領域は「変化あり」と見なして建造物の変化の候補とする。また、輝度値の相関値の最大値が経験値に基づくある閾値以上で対応が取れるとき、その部分領域は「変化なし」と見なす。次に、シーンの見え方の変化を調べる。シーンの見え方の変化は、先の探索において部分領域の対応が取れたとき、その部分領域が参照画像中で探索の開始点から対応が取れた点までエビポーラ線を移動した軌跡に該当する。次に、影の形状の変化を調べる。これは、筆者らが提案した方法[5]を参照画像と対象画像に適用することによって影の形状の変化を識別できる。ここで、この方法の適用にあたっては、被写体を真上から見た航空写真を用いなければならないという条件があるため、先に調べたシーンの見え方の変化の領域は、適用対象の領域から除外しておく。最後に、建造物の変化の候補となった部分領域からシーンの見え方の変化と影の形状の変化に該当する領域を除外して、建造物の変化を得る。以上の処理を図2にフローチャートとして示す。

4 実験及び考察

本提案方法を実際の航空写真に適用し、建造物の変化を抽出する実験を行った。入力画像として用いた航空写真は、参照画像が1997年2月、対象画像が1997年12月に川崎市中部の約2.5km四方を高度1580mの上空より撮影したものである。分解能はともに50cm/pixelであり、撮影位置は約300mのずれがある。これらの航空写真に対して、既知のカメラパラメータにより3.2節で述べたレクティフィケーションを行い、参照画像と対象画像において地表面のGCPが参照画像の座標系で一致するように対象画像を平行移動させた。これらの画像を図3に



参照画像 1997 年 2 月撮影



対象画像 1997 年 12 月撮影

図 3: 入力画像 (川崎市中心部)

示す。図 3 において左が参照画像で右が対象画像である。建造物の変化の抽出には、図 3 中の $S1_{ref}$, $S1_{tar}$ の組と $S2_{ref}$, $S2_{tar}$ の組を用いた。 $S1_{ref}$, $S1_{tar}$, $S2_{ref}$, $S2_{tar}$ の大きさは全て $500 \times 500\text{pixel}$ である。そして、変化を抽出する単位は、およそその一戸建て住宅の大きさを抽出することを考え、 $15 \times 15\text{pixel}$ とした。その変化を抽出する単位となる部分領域を格子状に対象画像上に配置して、各部分領域毎に変化を抽出した。その結果をそれぞれ図 4 と図 5 に示す。これら変化抽出の結果の図において、白い部分は建造物に変化した領域、格子部分はシーンの見え方が変化した領域、斜線部分は影の形状が変化した領域、黒い部分は変化のない領域である。

図 4 と図 5 の変化抽出の結果を評価するため、 $S1_{ref}$, $S1_{tar}$ の組と $S2_{ref}$, $S2_{tar}$ の組のそれぞれに対し、目視により変化を抽出した結果を図 6 と図 7 に示す。これら変化抽出の結果の図において、円で記してある部分は目視によって抽出した建造物に変化した領域である。これによると、目視により抽出した建造物の変化は、提案方法によっても抽出されていることが分かる。しかし、図 4 においては、建造物の変化として抽出した領域が誤りであるものも多い。この原因としては次のことが考えられる。ほぼ同時に撮影されたステレオペアの画像を用いる通常のステレオマッチングとは異なり、本提案方法では疑似的ステレオペアの画像を用いてステレオマッチングを行う。このとき、撮影時期・時刻が異なるので画像の明度が異なる。対応す

る部分領域の探索において利用する類似度の尺度は、輝度値の分布に基づくので、ほぼ同時に撮影されたステレオペアでは対応が取れる部分領域でも疑似的ステレオペアでは画像の明度が異なるので対応が取れない部分領域も存在する。そのため、疑似的ステレオペアでは、対応が取れるか否かを精度良く調べるのが困難となる。さらに画像中の影の領域では明度のダイナミックレンジが小さいので、部分領域の対応が取れるか否かを調べるのが非常に困難となる。従って、影の領域内にある部分領域は変化として抽出されやすくなる。このことは、図 4 において多数の影の領域が存在し、その影の領域内の部分領域は建造物の変化として抽出された領域であっても、誤りであるものが多いことから分かる。

5 まとめと今後の課題

撮影位置および撮影時期・時刻が異なる航空写真から建造物の変化を抽出する方法を提案した。これらの航空写真間には、物理的な建造物の変化、シーンの見え方の変化、影の形状の変化が混在し、従来、建造物の変化のみを適切に抽出することが困難であった。そこで、シーンの見え方の変化については、エッジボラ拘束に基づくステレオマッチングを利用して識別し、さらに、影の形状の変化については、従来筆者らが提案した方法で識別することによって、建造物の変化のみを抽出した。本提案方法の利点は、撮影位置および撮影時期・時刻が異なると

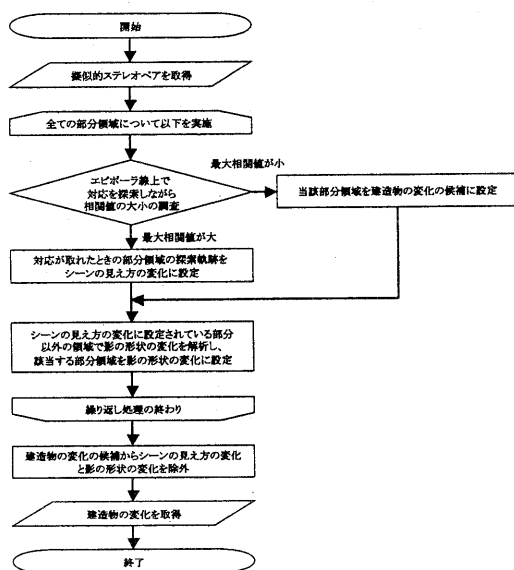


図 2: 建造物の変化抽出処理のフローチャート

変化の判読が困難となる航空写真において、2枚の航空写真のみから建造物の変化を抽出できることである。実際の航空写真に本提案方法を適用した結果、目視により抽出した建造物の変化は本提案方法によっても抽出されており、建造物の変化を適切に抽出できることを確認した。これにより、目視判読を行うオペレータは、本提案方法による結果を参照することで、建造物の変化をより迅速に抽出でき、目視判読の負担が軽減されることが期待できる。

しかしながら、本提案方法により抽出した建造物の変化には、4章で考察したように誤りであるものも存在する。この誤りを減らすことは、オペレータの目視判読の負担をより軽減することにつながる。従って、ステレオマッチングにおいて対応が取れず、変化として抽出された部分領域について、対応が取れない原因を分析して、建造物の変化、シーンの見え方の変化、影の形状の変化、さらにそれ以外の要因の変化に分類する必要がある。そして、建造物の変化抽出結果の誤りを減らすことが今後の課題である。また、本提案方法による建造物の変化抽出結果を参照した場合とそうではない場合とで、オペレータの目視判読の負担がどの程度軽減されるのか比較して、本提案方法の有効性を定量的に評価することも今後の課題である。

参考文献

- [1] A.Huertas and R.Nevatia: "Detecting changes in aerial view of man-made structures", ARPA Image Understanding Workshop, pp.381-388, 1996.
- [2] A.Huertas and R.Nevatia: "Detecting changes in aerial views of man-made structures", Proc. ICCV'98, pp.73-80, 1998.
- [3] Y.G.Leclerc: "Continuous terrain modeling from images sequences with application to change detection", ARPA Image Understanding Workshop, pp.431-436, 1997.
- [4] Y.G.Leclerc, Q.-T.Luong, P.V.Fua and K.Miyajima: "Detecting Changes in 3-D Shape using Self-Consistency", to appear in Proc. CVPR2000, June, 2000.
- [5] S.Watanabe, K.Miyajima and N.Mukawa: "Detecting changes of buildings from aerial images using shadow and shading model", Proc. ICPR'98, pp.1408-1412, 1998.
- [6] N.Butler: "Matching Stereo Satellite Images", Proc. ICPR'92, pp.716-719, 1992.
- [7] R.Mohan, G.Medioni and R.Nevatia: "Stereo error detection, correction, and evaluation", IEEE Trans. on PAMI, vol.11, no.2, pp.113-120, 1989.
- [8] M.A.O'Neill and M.I.Denos: "Practical approach to the stereo matching of urban imagery", Image and Vision Computing, vol.10, no.2, pp.89-98, 1992.
- [9] Y.Ohta and T.Kanade: "Stereo by intra- and inter-scanline search using dynamic programming", IEEE Trans. on PAMI, vol7, no.2, pp.139-154, 1985.
- [10] 解析写真測量委員会: 『解析写真測量』, 日本写真測量学会, 1983.
- [11] 保谷 忠男: 『写真測量』, 日本測量協会, 1987.
- [12] 松山 隆司, 久野 義徳, 井宮 淳 編: 『コンピュータビジョン』, 新技術コミュニケーションズ, 1998.



$S1_{ref}$



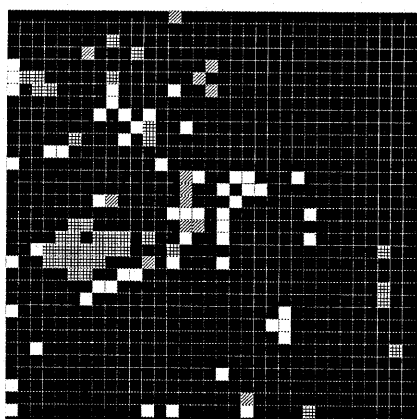
$S2_{ref}$



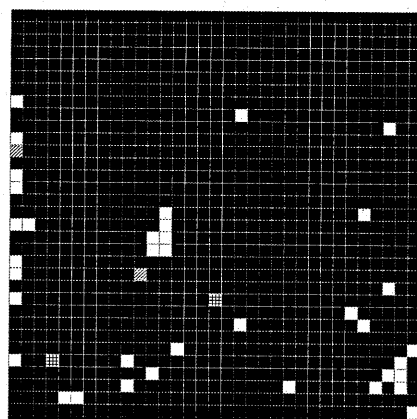
$S1_{tar}$



$S2_{tar}$



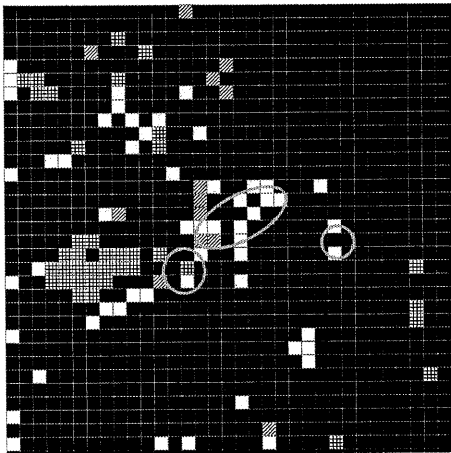
- $S1_{ref}$ と $S1_{tar}$ の変化抽出結果
- 建造物が変化した領域
 - ▤ シーンの見え方が変化した領域
 - ▨ 影の形状が変化した領域
 - 変化のない領域



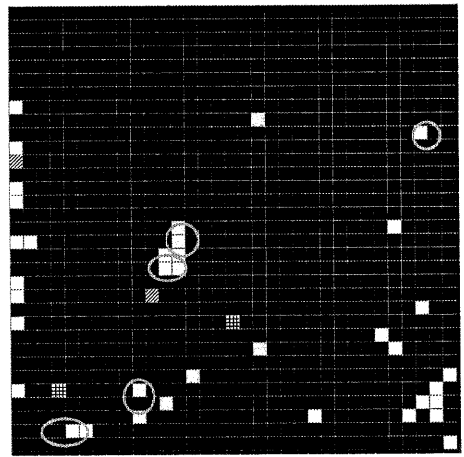
- $S2_{ref}$ と $S2_{tar}$ の変化抽出結果
- 建造物が変化した領域
 - ▤ シーンの見え方が変化した領域
 - ▨ 影の形状が変化した領域
 - 変化のない領域

図 4: 提案方法による変化抽出の結果 ($S1$)

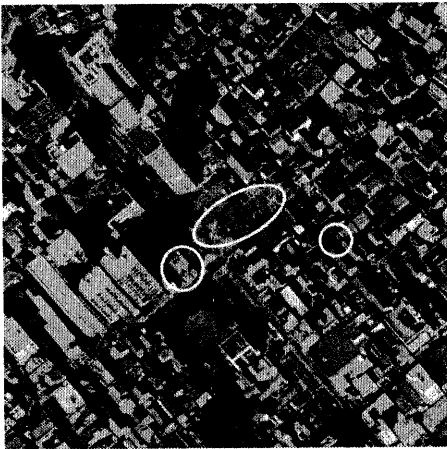
図 5: 提案方法による変化抽出の結果 ($S2$)



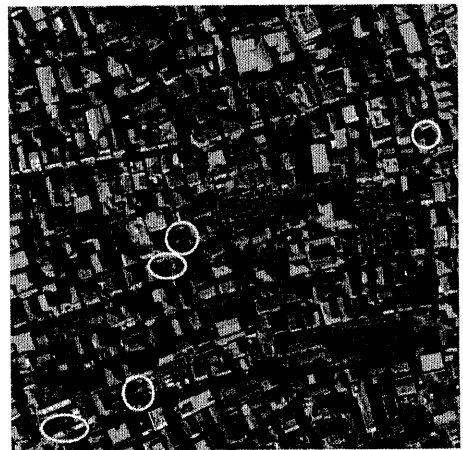
目視と提案方法による変化抽出結果 ($S1$)



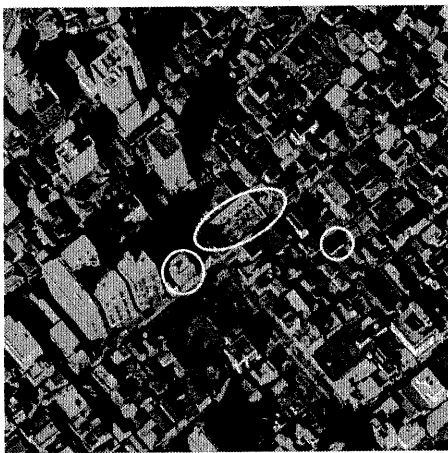
目視と提案方法による変化抽出結果 ($S2$)



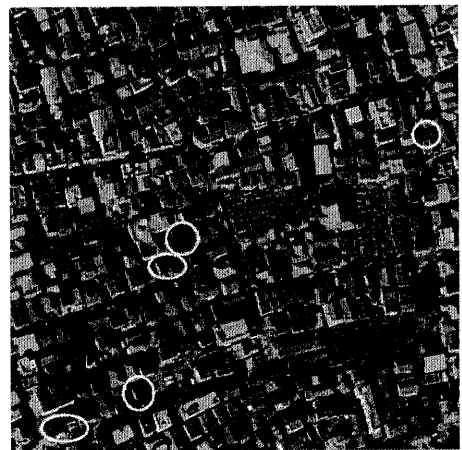
$S1_{ref}$



$S2_{ref}$



$S1_{tar}$



$S2_{tar}$

図 6: 目視による変化抽出の結果 ($S1$)

図 7: 目視による変化抽出の結果 ($S2$)