

衛星画像解析を用いた2007年ペルー地震後のピスコにおける建物再建過程

星知世¹⁾、村尾修²⁾、吉野邦彦³⁾、山崎文雄⁴⁾、ミゲル・エストラーダ⁵⁾

- 1) 清水建設株式会社、修士 (工学)
e-mail : yomotoshiho@gmail.com
- 2) 東北大学災害科学国際研究所、教授 博士 (工学)
e-mail : mura@irides.tohoku.ac.jp
- 3) 筑波大学システム情報系、教授、農博
- 4) 千葉大学大学院工学研究科、教授、工博
- 4) ペルー国立工科大学 日本-ペルー地震防災研究センター(CISMID)、所長、Ph.D.

要 約

本研究では、2007年ペルー地震により被災したペルー・ピスコ市を対象に、2007年から2011年までの過去5年間の建物再建の推移を、従来行われてきた航空写真での目視判読と衛星画像解析を同一地区に対して適用することで定量化し、再建プロセスの時間的・空間的対応を比較した。画像解析では、解析精度が作業者の技術力によらないピクセルベースでの解析を軸に検討を行い、最尤法に基づく分類から敷地変化を4つに分類した。目視判読作業が困難な建物密集地区において目視判読結果の約71.2%の精度で検出に成功した。また、解析結果から各年代別のピスコ市における建物再建は被災から1~2年後にピークを迎えていることが明らかになった。文献調査等で、同時期に策定された住宅開発計画の存在や、住宅再建のために必要となる居住地証明書の発行件数の増加が確認でき、関係する事象との対応を確認することが出来た。本研究で検討した解析手法は、対象地の再建プロセスの概観を把握する目的において従来目視調査や現地調査が困難だった途上国の被災地における復興調査のためのツールとしての有用性が期待できるという示唆が得られた。

キーワード： 建物再建過程、衛星画像、市街地開発、エラーマトリクス分析

1. はじめに

1.1 研究の背景

都市計画分野において、災害後の復興過程を明らかにすることは、次の災害に向けた防災計画や復興計画策定において重要な知見となる。適切な復興計画を議論する際の共通の評価基準として村尾ら¹⁾が構築した復興曲線のように、復興計画と現実の空間における復興プロセスの対応関係を理解するために、都市の復興を定量的に捉えることは、復興が行われていく中で適切な復興政策を計画・実行・更新する上で非常に重要な観点である。都市の復興過程を定量的に捉える指標として、地域内総生産や電力消費量、人口分布といった経済活動を指標とした経済的復興度を軸とした研究がある。そのような指標には、被災後に避難所が開設される、瓦礫が撤去される、道路が整備される、建物が再建されるといった実空間の物理的な変化の情報との関連性が背景にある。中でも、人々の生活再建との関連が深い建物の再建過程は、都市活動の復興を捉える重要な指標である。広域災害のような被災範囲の広い地域においては、詳細な調査を行うために地域全体の復興がどのような方向性を持っているのかという全体像を把握する必要があるが、従来のモニタリング手法では同時的・継続的な把握が求められる復興調査において、作業負担の増加、時間的ギャップといった課題が指摘され、復興の定期的モニタリングという観点からは、

起点となる災害時の被害把握においてもマンパワー作業の非効率性が課題である²⁾。

1.2 既往研究

衛星画像を利用して災害時の被害量を推定する研究はこれまでもいくつかのグループで報告されている。小荒井ら³⁾は、災害時における衛星画像解析の有用性という観点から、QuickBird 衛星画像を用いた自動判読による建物被害の把握方法を研究し、上空から判読できる変化について約 80%の精度で被害建物の抽出に成功している。また、山崎ら⁴⁾は画像解析手法の精度検証として、複数の判読者を用いて衛星画像の目視における被害建物の抽出精度を検証し、被害レベルの大きい箇所での高い判読精度を実証している。一方、衛星画像解析から都市の復興状況を把握する研究は非常に少ない。中岡ら⁵⁾は阪神淡路大震災で被災した神戸市を対象に、衛星画像のもつ色相情報から被害地域である裸地をよく表しているバンドを用いて、色相判読による復興状況の把握を試みている。また、建物抽出を目的とした解析研究では、三浦ら⁶⁾は横浜市を対象に、建物のエッジから対象である建物の抽出を試みており、個々の建物について中～大規模建物の検出に成功している。リュウら⁷⁾は、東日本大震災で被災した宮城県沿岸部を対象に、高解像度 SAR 画像の後方散乱係数を利用して、地震前後の画像の平均差分から津波浸水区域を抽出し、建物輪郭データを用いて浸水域内における建物抽出を試みている。衛星画像を用いた都市のモニタリング手法は、撮影場所や目的とする対象によって異なる手法が提案され、解析上の課題も多様であることから、被災地の持つ市街地特性を考慮した衛星画像を利用した建物再建プロセスの把握については、その技術的観点において画像解析手法の利用可能性について十分に検討する余地がある。

1.3 研究の目的

2007年に発生したペルー地震で被災したピスコを対象に、衛星画像を用いた判読を建物の再建過程プロセスの把握手法として利用し、同一地域かつ同一間隔での時系列的な空間変化・変化量を概観的に捉えるための手法を提案しその汎用性について知見を得る。

1.4 研究方法

これまでに筆者らはピスコ市の建物被害調査に関する情報収集を行ったのち、航空写真の目視判読と現地調査から政策的な視点での建物再建に関わる計画及び実空間におけるピスコの建物再建プロセスを整理し2012年時点における建物再建プロセスの定量化を行った。今回、ピスコの一部地区をケーススタディとして衛星画像を用いて2007年～2011年までの各年代の敷地変化を分類する手法を検討し、解析を行い、本研究で用いた画像解析手法の利用可能性について考察する。

2. 建物被害概要と2012年の再建状況

2.1 2007年ペルー地震の被害概要

2007年8月15日、震源地は首都リマの南南東145Km、震源の深さは41Km、地震の規模を示すマグニチュードは8.0であった。津波遡上高さはピスコ市で2.3～3.3mを観測した。ペルー全体では人的被害は死者519人、負傷者1,366人にも及んだが、人的被害の約68.5%はピスコ市に集中している。また倒壊家屋58,581軒、損壊家屋13,585軒に上った他、多くの病院、教育機関等の施設も被害を受けた。

2.2 2012年時点の建物再建状況

2012年7月にピスコ地区での現地調査と2010年に撮影されたGeoEyeの衛星画像にCISMIDが調査した被災当時の建物被害状況を重ね合わせて建物再建量を調査した⁸⁾。結果として、被害が甚大な建物の93.2%が再建され、政府によりいくつもの新しい住宅が建設されていることが明らかになった(図1)。



図1 2010年航空写真+2012年地上調査結果⁸⁾

3. 衛星画像解析による建物再建プロセス把握手法の検討

3.1 使用画像

今回、パナソニック画像とマルチスペクトル画像を2007年～2012年の5時点分入手し、パンシャープン画像を作成し解析に使用した(表1)。一般的に、目視の場合は解像度に対して約10倍程度の対象物であれば対象物を正確に認識することが出来ることが知られており、今回解析に使用した解像度0.6mのパンシャープン画像からは目視による建物判読が可能であることを確認している。

表1 衛星画像仕様(幾何補正後)

センサ	撮影日時	座標系	投影法	座標	画像サイズ	解像度	オフナディア角
QB	2007/12/13	Geographic Lat/Lon	WGS-84	76-13'18.95"W 13-41'54.74"S	7344×4815	0.6m	1.28°
	2008/11/9						11.56°
	2009/7/1						19.99°
WV-2	2010/8/28					0.5m	7.78°
	2011/7/15						17.74°

3.2 解析対象範囲とトレーニングエリアの設定

解析対象範囲はピスコ地区全体とし、トレーニングエリアとして①中心地区②沿岸地区③新規開発地区の3地区を選定した(図2)。表2にそのデータ概要を示す。

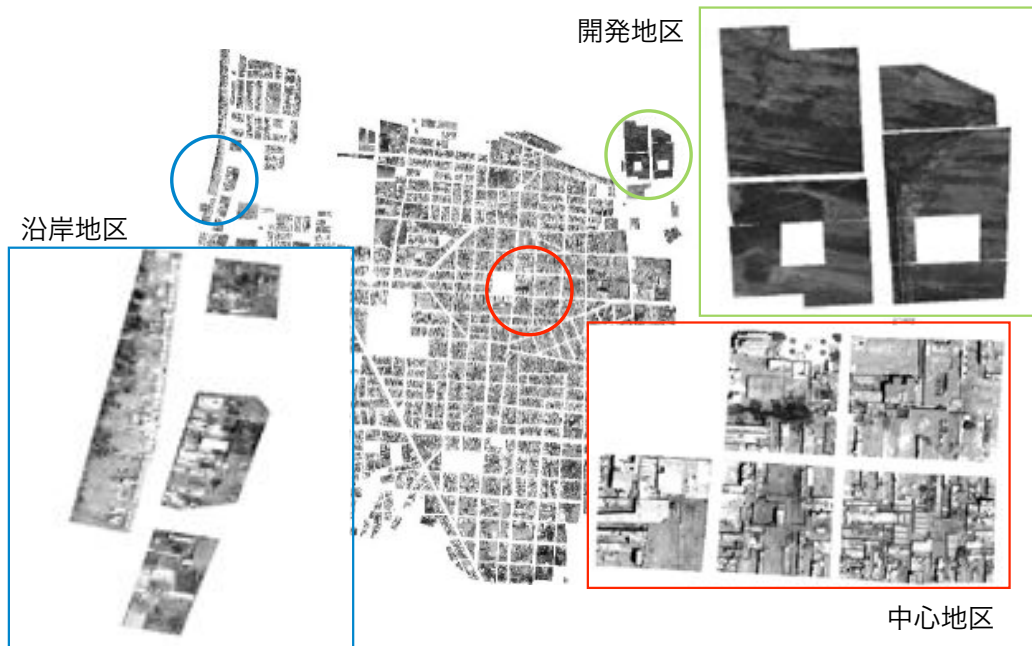


図2 トレーニングエリアの選定

表2 対象範囲のデータ概要

対象街区数	ピクセル数	敷地面積
629 街区	9,897,371Pixel	3,563,053.56 m ²

3.3 解析手順

図3に解析のフローを示す。3.2で挙げた4つの変化パターンをトレーニングデータとしてサンプル抽出を行い、抽出したトレーニングデータに対して、分類可能な統計的優位性を調査するためにピクセルベースでの解析とテクスチャ解析として基本統計量を算出し、分離度やt値検定といった分類性能の確認を行った。その後、トレーニングデータを教師として最尤法に基づく教師付き分類を行い、変化パターンの分類を行った。画像の組み合わせの際に生じる影領域について、目視から属性を認識できないため、教師に基づく分類ができない。そのため、スペクトル情報に基づくISO-DATA分類処理を施し、影として分類不能な領域を除き抽出対象の変化パターンに振り分けた。トレーニングデータ量・分類性能は以下の通り。分類したい建物と更地(裸地)の重なりが確認できたため分類性能は低いことが推測できる。

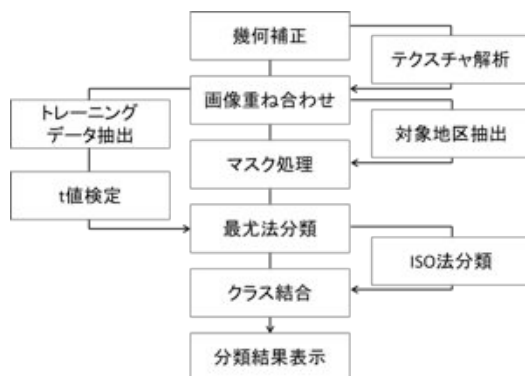


図3 解析フロー

表3 敷地変化抽出ピクセル数

更地⇒建物	建物⇒建物	建物⇒更地	更地⇒更地	合計(Pixel)
13,303	10,359	3,036	11,745	38,443

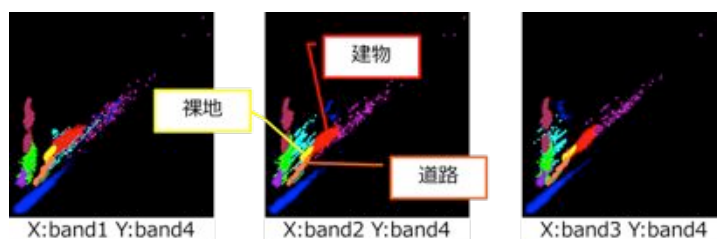


図4 スペクトル分離度

3.4 テクスチャ解析

ピクセルベースのみの分類では、目視で確認できる色情報が含まれてはいるものの有効な統計値が検出されなかったため、誤分類が頻発する可能性がある。そこで、誤分類を軽減させることを目的として、画像のテクスチャ情報であるエントロピー量を調査し、統計量を算出した。ウィンドウサイズの設定条件としては建物の領域をひとまわりカバーしている程度の大きさが適切であると考えられる。今回は対象地の建物輪郭データがないため、画像上から無作為に100個程度建物を抽出し、間口と奥行きを測定し建物サイズの平均値を算出した。建物の長辺方向は形状によって差が大きいものの、短辺方向については平均7m程度であることから、ウィンドウサイズを13×13に設定し約7.8m四方の領域ごとにテクスチャ解析を行った。得られた基本統計量に対しt検定を行い、分類性能を調査した結果、テクスチャ情報の最大値・最小値では有意水準(両側) $p<0.05$ において統計的に有意な差が見られ、 $p<0.10$ では歪度を含め統計的に分類性能の信頼性が裏付けされたことから、テクスチャ情報を分類項目に含めることで誤分類の軽減が期待できるとし、解析に使用した。

4. 解析結果・精度検証

4.1 解析結果

解析の結果は更地部分を灰色、建物を黒く表示している(図5)。2時点の画像を重ねているため、前年の敷地の状態も考慮して解析上では4つに分類しているが、翌年の敷地に対する建物の面積の割合を再建量とするため建物・更地の2つに統合している。2009年/2010年、2010年/2011年の画像については、影領域を濃い灰色で表示している。1画像の全体図からは、局所的に建物が密集している、ごま粒状に建物が建っている等街区の敷地特徴が視覚的にわかりやすく認識できる。時系列で見ると、黒く塗りつぶされた面積の増減、色の濃淡によって直感的に敷地変化を捉えることが容易にできる。このような即時的に空間変化を把握できる点は、従来行ってきた画像の目視判読や実測調査と比較して画像解析の大きな特徴といえる。

4.2 精度検証

画像解析の精度検証にはエラーマトリクスを用いる(表4)。表中の行列の縦方向(C_{11}/C_{31} や C_{22}/C_{32})は目視判読結果から見て建物、更地の何%が正しく判読されたかを示しており、プロデューサー精度と呼ばれる。横方向(C_{11}/C_{13} や C_{22}/C_{23})はユーザー精度と呼ばれ、画像解析で得られた判読結果の何%が正しい判読であったかを示す。対角方向の成分の合計を総数で除したものは総合精度と呼ばれる。プロデューサー精度の低さは誤判読による抽出漏れを表している。またユーザー精度の低さは、画像解析結果的中率の低さを表している。



図5 敷地の変化

表4 エラーマトリクス分析

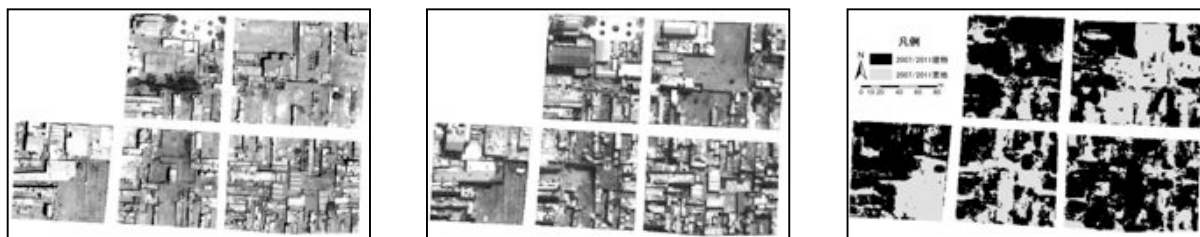
		目視判読			ユーザー精度
		建物 (Pixel)	更地 (Pixel)	計	
画像解析	建物 (Pixel)	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{11}/C_{13}
	更地 (Pixel)	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{22}/C_{23}
	計	C_{31}	C_{32}	C_{33}	
プロデューサー精度		C_{11}/C_{31}	C_{22}/C_{32}		総合精度 $(C_{11}+C_{22})/C_{33}$

中心地区、沿岸地区、開発地区における分析結果を図6および表5から表7に示す。

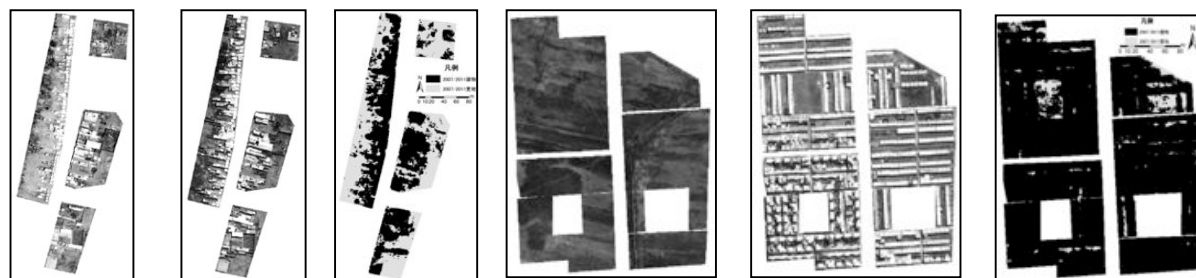
中心地区における総合精度は70%を超え、他の2地区の精度と比較して良好な結果となった。沿岸地区、開発地区はやや精度が劣るものの目視判読に対しそれぞれ65%、60%程度の的中率だった。

どのくらいの解析精度があれば対象物を適切に抽出しているかという点については、対象物の特性や解析の目的に応じて求められる精度が異なり、解析事例が十分でないことから一概には決定できないが、萱場ら⁹⁾が行った画像解析を用いた被害判読を例にとると、同一地区に対してピクセルベース解析では約67%、オブジェクトベース解析では約71%の精度を得られたという研究報告がされている。また、本研究対象地と同一地区に対して衛星画像の目視判読を行った松崎ら²⁾は、中心地区において約70%の解析精度を得られていること。本研究では、目視判読を画像解析によって判読した場合、中心地区において同程度の精度を得ることが出来た。

ユーザー精度については、どのトレーニングエリアでも建物に比べ更地の的中率が高くなることが明らかになった。これは、建物に比べ更地のスペクトル情報が安定していることが要因と考えられる。建物はその材質によって異なる反射特性を持つため、スペクトルの分散がどうしても大きくなってしまいうため誤抽出が大きくなると考えられる。



①中心地区



②沿岸地区

③開発地区

図6 敷地の変化 (2007年状況/2011年状況/解析結果)

表5 エラーマトリクス分析結果 (①中心地区)

		目視判読			ユーザー精度
		建物 (Pixel)	更地 (Pixel)	計	
画像解析	建物 (Pixel)	66,701	38,454	105,155	63.4%
	更地 (Pixel)	10,277	53,850	64,127	84.0%
	計	76,978	92,304	169,282	
プロデューサー精度		86.6%	58.3%		総合精度 71.2%

表6 エラーマトリクス分析結果 (②沿岸地区)

		目視判読			ユーザー精度
		建物 (Pixel)	更地 (Pixel)	計	
画像解析	建物 (Pixel)	21,720	36,202	57,922	37.5%
	更地 (Pixel)	2,189	49,938	52,127	95.8%
	計	23,909	86,140	110,049	
プロデューサー精度		90.8%	58.0%		総合精度 65.1%

表7 エラーマトリクス分析結果 (③開発地区)

		目視判読			ユーザー精度
		建物 (Pixel)	更地 (Pixel)	計	
画像解析	建物 (Pixel)	89,057	65,715	154,772	57.5%
	更地 (Pixel)	550	7,815	8,365	93.4%
	計	89,607	73,530	163,137	
プロデューサー精度		99.4%	10.6%		総合精度 59.4%

5. 考察

5.1 本手法の汎用性

本解析手法の汎用性について、対象地の特性、画像の種類、パラメータ設定に必要な情報、作業効率の観点から考察を述べる。まず対象地の特性としては色あい、スペクトルによる建物と更地の区別が付きにくい(明度による区別は可能)、低層建物が密集している、建物の屋根部分の色あいが均質という特徴がある。加えて、建物輪郭データ等の建物基盤情報がなく、またそれらを得ることが時間的、経済的、社会情勢的に容易ではない途上国の被災地に対して、本手法でもちいた解析手法は既往研究と同程度の判読精度が得られ、今後は解析の精度向上といった技術的な課題解決は不可欠だが、このような対象地において本手法の利用価値はあることが示された。

解析に使用する画像は、必要なパラメータを画像上から抽出する必要があるため目視判読可能な分解能を持っていることが条件である。航空写真やレーダー(Xバンド)を用いた空中写真は、衛星画像より分解能に優れている点や多様な情報を含むという点で様々な解析手法に応用できる利点があるが、コストが高い、技術的な解析手法の複雑さが課題になる。また、定時性、定点観測、解析の簡便さが求められる復興調査への利用という側面を考慮すると、今回解析に使用した高分解能衛星画像が適当であると考えられる。

本解析手法のパラメータは、テクスチャ解析時における建物サイズに対応したウインドウサイズのみで、今回は画像上から目視で抽出した。作業効率の観点からも、対象全域を見る必要がある目視判読と比較して負担が軽減できると考えられる。

5.2 解析上の課題

本手法では、色相情報、スペクトル情報、テクスチャ情報を用いて更地から建物への変化、建物から更地への変化、更地・建物変化なしの4パターンの敷地変化における相違を目視による判読作業から抽出・分類したため、目視で判読困難な対象については今回の解析では分類できないといった問題が指摘できる。特に影による誤分類が頻発したことが結果から見て取れ、解析に使用する画像の条件として観測角度の小さいものを使用することが望ましい。

精度検証時に、教師となるグランドトゥルースデータがない場合、目視による教師データの作成が必要であり、その際にはなるべく解像度の高い画像で判読を行う事が誤分類を軽減するのに有効であるといえる。

また、今回はテクスチャ解析の中で、対象地区全体の建物サイズの平均値に基づいたウインドウサイズをパラメータとして設定したが、中心地区、沿岸地区、開発地区と細分化し、地区ごとにウインドウサイズを設定し解析処理を行う事で精度の向上が期待できる。

6. まとめ

適切な復興が行われるためには、計画と、現実の都市空間の復興との対応やそれらの関連性を時系列的に整理・蓄積された情報の構築が不可欠であり、詳細な調査を行うために被災地全体の復興過程を概観的・同時的に把握する必要がある。建物の再建は、計画のアウトプットとして実空間に現れる復興過程の重要な指標であり、この再建プロセスの把握は、災害の規模が大きくなるほど従来行われてきた現地での実測調査や航空写真の目視判読といった手法では作業効率や継続性の観点から限界がある。

本研究は、2007年ペルー地震により被災したペルー・ピスコ市を対象に、2007年から2011年までの過去5年間の建物再建の推移を把握し、復興調査時における衛星画像解析の利用可能性についての知見を得ることを目的として、実施した。ここで行った画像解析では、解析精度が作業者の技術力によらないピクセルベースでの解析を軸に検討を行った。対象地特性から、色相情報やスペクトル情報に加えテクスチャ解析を行い、処理範囲を決めるウインドウサイズを対象地の建物サイズから決定し、エントロピー量の変化から敷地変化パターンを分類できる統計的優位性を得た後、最尤法に基づく分類から敷地変化を4つに分類した。目視判読作業が困難な建物密集地区において目視判読結果の約71.2%の精度で検出に成功した。

以上から本研究で検討した解析手法は、対象地の再建プロセスの概観を把握する目的においてその利用価値があると言え、従来目視調査や現地調査が困難だった途上国の被災地における復興調査のためのツールとしての有用性が期待できるという示唆が得られた。

謝 辞

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力（SATREPS）事業「ペルーにおける地震・津波減災技術の向上に関する研究」、東北大学災害科学国際研究所 特定プロジェクト研究「2007年ペルー地震によるピスコの復興過程モニタリング」、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究No.25630245「およびデジタルアースを用いた都市リスク変遷の視覚化と災害対応建築空間アーカイブズの構築（H25-27）」の中で実施した。調査に協力いただいたピスコの住民、ペルー政府およびピスコ市内の関連機関、ならびにペルー国立工科大学日本－ペルー地震防災研究センターの関係者に対して、謝意を示したい。

参考文献

- 1) 村尾修, 杉和也, 仲里 英晃: タイにおける2004年インド洋津波被災後の復興過程に関する考察と建物復興曲線の構築, 日本都市計画学会都市計画論文集No.43-3, pp.745-750, 2008.10
- 2) 松崎志津子, 山崎文雄, ミゲル・エストラーダ, カルロス・サバラ: QuickBird衛星画像を用いた2007年ペルー・ピスコ地震の建物被害把握, 地域安全学会論文集No.13, pp.407-413, 2010.11
- 3) 小荒井衛, 佐藤浩, 宇根寛, 天野一男: 各種光学高分解能衛星画像による地質災害の判読 判読特性の視点から見た各種画像の比較検証, 地質学雑誌第114巻第12号, pp.632-647, 2008.12
- 4) 山崎文雄, 松岡昌志, 小檜山雅之, 村岡七重: QuickBird衛星画像を用いた2003年アルジェリア地震におけるZommouri市の被害判読, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.915-916, 2004.8
- 5) 中岡洋一, 中尾幸一: 衛星画像解析による阪神淡路大震災の被害状況および復興状況調査, 高等専門学校教育と研究第4巻第2号, 1999
- 6) 三浦弘之, 翠川三郎: 建物GISデータの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物の自動検出手法, 地域安全学会論文集No.5, pp.37-44, 2003.11
- 7) リュウ・ウェン, 山崎文雄, 郷右近英臣, 越村俊一: 高解像度SAR画像を用いた東北地方太平洋沖地震における津波甚水域と建物被害の抽出, 日本地震工学会論文集第12巻第6号(特集号), pp.73-85, 2012.6
- 8) Osamu.M Tomoyo.H Miguel.E Kazuya.S Masashi.M Fumio.Y: Urban Recovery Process in Pisco after the 2007 Peru Earthquake, Journal of Disaster Research Vol.8 No.2, 2013
- 9) 萱場真太郎, 越村俊一: オブジェクトベースの衛星画像解析による津波被災地の被害把握, 土木学会東北支部技術研究発表会 II-66, 2009

Building Reconstruction Processes in Pisco after the 2007 Peru Earthquake Using Satellite Image Analysis

HOSHI Tomoyo¹⁾, MURAO Osamu²⁾, YOSHINO Kunihiro³⁾, YAMAZAKI
Fumio⁴⁾ and ESTRADA Miguel⁵⁾

1) Shimizu Corporation, MA. Eng.

2) Professor, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Dr. Eng.

3) Professor, Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba, Dr. Agr.

4) Professor, Chiba University, Dr. Eng.

5) Director, CISMID, National University of Engineering, Peru, Ph.D.

ABSTRACT

Pisco was the most devastated area due to the 2007 Peru Earthquake. The purpose of this research is to develop the possibilities of satellite image usage to monitor post-disaster urban recovery process, focusing on the urban change of Pisco City between 2007 and 2011. To this end, the authors carried out field surveys in the city in 2012 and 2013 as well as literature surveys at first. Then it was clarified that building reconstruction had a peak between 2008 and 2009. Following understanding the five-year recovery process, the authors compared its reconstruction conditions by watching deciphering with those by image analysis using satellite image. Finally it obtained an accuracy of 71.2 % of the watching deciphering results in congested urban areas and that of about 60% in developed districts. The result shows that using satellite image can be useful tool for monitoring and understanding of post-disaster urban recovery process in the areas that are difficult to be conducted long-term field surveys.

Keywords: Building Reconstruction Processes, Satellite Image, Urban Development, Error Matrix Analysis