

| 学 位 論 文 要 旨<br>(Summary of the Doctoral Dissertation) |                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 学位論文題目<br>(Dissertation Title)                        | パイロット信号による攻撃推定を導入した幾何攻撃に堅牢な電子透かし法<br>(Robust Digital Watermarking Method against Geometric Attacks Using Pilot Signal-Based Attack Estimation) |
| 氏 名 (Name)                                            | 河野 綸華                                                                                                                                          |

SNS 等に投稿した画像が第三者に不正利用される問題が起きている。この様な不正利用の対策に幾何攻撃に堅牢な電子透かし法の開発が必要である。本研究では、パイロット信号及び、攻撃推定手法を導入した電子透かし法を開発した。電子透かし法とはデジタルコンテンツに対して秘密裏に情報を埋め込む技術であり、著作権保護のための技術の一つである。海賊版コンテンツはしばしば拡大縮小や回転、剪断、さらに、トリミングといった加工によって原画像を劣化させ、不正利用の発覚を免れようとする。また、加工画像の保存時に再度圧縮される。従って、これらの加工(攻撃)に対して堅牢な電子透かし法が求められる。攻撃には、圧縮やノイズ付加等の画素値が変化する非幾何攻撃と、拡大縮小や回転等の画素の位置が変化する幾何攻撃がある。従来の電子透かし法の多くは、誤り訂正符号やスペクトル拡散等を用いて透かし情報に冗長性を付加することによって非幾何攻撃に対して堅牢である。しかしながら、幾何攻撃に対する堅牢性は十分ではない。従来法のうち、特に抽出時に原画像を必要としないブラインド方式の電子透かし法では幾何攻撃によって透かし情報の埋め込み位置がずれてしまい、位置同期が必要となる。この問題を解決するために、総当たり探索や、幾何攻撃に対して堅牢な特徴量が用いられてきた。しかしながら、これらの手法は膨大な計算コストや、トリミングに対して脆弱であるといった問題があった。

もし攻撃パラメータが分かれば、劣化画像を逆変換することによって埋め込み位置の同期が可能となる。そこで、本研究では通信分野におけるチャネル推定に用いられるパイロット信号に着目した。一般的な電子透かし法では画像を YUV 色空間に分解し、輝度値である Y 成分に対して透かし情報を埋め込むことでステゴ画像を生成する。本研究では、透かし情報に加えて U 成分に対して格子状のパイロット信号を埋め込む。透かし情報の抽出時には先に U 成分からパイロット信号を抽出して攻撃を推定し、得られた攻撃パラメータを用いて透かし情報を抽出する。画像に対してパイロット信号を埋め込む場合、一度埋め込んだら変更することができない。従って、あらかじめ攻撃推定に適した形状や埋め込みドメイン、埋め込み方法を選択する必要がある。

2 章では、原画像が拡大縮小され、トリミングされる場合を扱う。本手法では、0,1 の二値の格子状のパイロット信号を埋め込んだ。攻撃を受けた後、推定時には画像の各列/各行毎にパイロット信号の総和を求めることで、格子線上で総和が極大もしくは極小となるピークが現れる。従って、自己相関とフーリエ変換を用いることによってピーク間隔、つまり格子間隔を求めることが可能である。得られた格子間隔を用いて拡大率を求めることができた。次に、SIFT 特徴点と離散フーリエ変換(DFT) を用いた電子透かし法に拡大率推定を導入した。この手法はトリミングと拡大縮小に対して堅牢である。実験の結果、パイロット信号によって拡大率を相対誤差ほぼ 0 で推定可能であることが分かった。また、推定拡大率を用いることによって透かし情報の誤りを減らすことができた。

画像加工には拡大縮小だけでなく、回転や剪断等の複数の攻撃がある。2 章で述べた手法では、回転したパイロット信号や剪断によって斜交したパイロット信号を検出することができない。このような攻撃によって埋め込み領域が歪んだ場合、パイロット信号を抽出できなくなってしまう。そこで、3 章ではラドン変換を用いて幾何変換行列を推定する手法を提案した。本手法では、パイロット信号を-1,0,1 の 3 値の信号として設計した。これにより、縦方向と横方向を区別することができる。幾何変換によって斜交した格子状の信号をラドン変換すると、格子の角度と同じ射影角度上の係数値に格子間隔と同じ周期で特徴的なピークが見られる。この性質を用いて格子の角度と間隔を検出し、得られたパラメータから変換行列を推定することが可能である。実験の結果、複数の単体攻撃及び複合攻撃について、概ね相対誤差が 0 で推定することに成功した。また、2 章で用いた電子透かし法に本手法を導入することで、透かし情報単体では抽出不可能な攻撃によって劣化した画像からも透かし情報が抽出可能になることが分かった。

本研究の貢献は、トリミングに対しても堅牢なパイロット信号の開発及び幾何変換行列の推定である。画像に対して格子状のパイロット信号を画像全体の画素値に埋め込むことによって、画像を任意の位置で切り抜いてもパイロット信号を抽出することが可能である。パイロット信号の検出にラドン変換を用いることによって、格子の傾き及び間隔を容易に検出することができた。また、得られたパラメータを基に幾何変換行列を推定することによって画像を逆変換し、透かし情報をほぼ誤りなく抽出することに成功した。

# 学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 河野 綸華                                                                                                                                          |
| 審 査 委 員                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 主 査： 川村 正樹 (教授) 印                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 副 査： 西井 淳 (教授) 印                                                                                                                               |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 副 査： 末竹 規哲 (教授) 印                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 副 査： 浦上 直人 (教授) 印                                                                                                                              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 副 査： 野崎 隆之 (准教授) 印                                                                                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 副 査： 印                                                                                                                                         |
| 論 文 題 目                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | パイロット信号による攻撃推定を導入した幾何攻撃に堅牢な電子透かし法<br>(Robust Digital Watermarking Method against Geometric Attacks Using Pilot Signal-Based Attack Estimation) |
| 【論文審査の結果及び最終試験の結果】                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                |
| <p>SNS 等の普及に伴い、デジタル画像が第三者によって不正利用される問題が深刻化している。これに対し、画像に特定の情報を不可視な状態で埋め込む電子透かし技術が有効な解決策として期待されている。しかし、悪意あるユーザーは、画像に意図的な加工を施すことで、埋め込まれた透かし情報の検知や抽出を妨害しようとする。従来の電子透かし法は、JPEG 圧縮やノイズ付加といった画素値の劣化を伴う非幾何攻撃には堅牢性がある。しかしながら、拡大縮小、回転、トリミングといった幾何攻撃を受けると、透かし情報の同期が困難になるという課題があった。本論文は、透かし情報とは別に、画像全体に格子状のパイロット信号を埋め込むという独創的な着想に基づき、これら幾何攻撃に対して堅牢な位置同期手法を提案し、その有効性を明らかにした。</p> <p>第 2 章では、幾何変換の中でも特に基礎的な拡大縮小攻撃に対する推定手法を提案している。格子状のパイロット信号を画像全体に埋め込み、画像が拡大・縮小された際の格子間隔の変化率を測定することで、拡大率の推定を可能とした。本手法の特徴は、トリミングされた画像からでも、残存するパイロット信号から拡大率を推定できる点にある。実験の結果、拡大率が 2 倍以下の範囲で高精度な推定が可能であることを示し、さらに推定された拡大率を用いて透かし情報を補正・抽出することで、攻撃パラメータ既知の場合と同等のビット誤り率を達成した。この成果は、論文誌 IEICE Transactions に採録されている。</p> <p>第 3 章では、より複雑な攻撃に対応するため、回転、せん断、およびそれらの複合攻撃を推定可能とする幾何変換行列の推定手法へと拡張した。新たにラドン変換を導入することで、埋め込んだパイロット信号の回転角度および格子間隔を高精度に検出する手法を確立した。また、従来の 2 値信号から 3 値のパイロット信号へと改良を加えることで、水平方向と垂直方向のパイロット信号の判別を可能とした。これにより、単一の変換のみならず、多様な幾何変換が組み合わさった複合攻撃に対しても、透かし情報の正確な抽出を可能にする位置同期と歪み補正の手法を構築できた。パイロット信号による高精度な幾何補正が可能となったことで、従来のように幾何攻撃耐性を高めるために透かし強度を過度に上げる必要がなくなった。結果としてパイロット信号を埋め込んだとしても、画質の劣化は最小限に抑えられた。このように提案手法はデジタルコンテンツの保護と、視覚的な品質維持という相反する要求を両立させるものである。</p> |                                                                                                                                                |

(様式 9 号)

以上のように、本論文は画像処理において困難な課題であるトリミングを含む幾何攻撃下の同期問題に対し、格子状パイロット信号という新たなアプローチを導入し、広範な実験を通じてその実用性を示した。その成果は、論文誌 APSIPA SIP に採録されており、当該分野の発展に寄与する十分な学術的価値を有すると判断できる。

本審査会および公聴会においては、予備審査での指摘を適切に反映し、背景説明や従来法との比較などの説明が改善されたことを確認した。公聴会では、一般聴衆に対しても専門用語を平易に解説しつつ、提案手法の新規性を論理的に説明した。質疑応答では、パイロット信号の選び方やラドン変換を使うことの新規性、および透かし情報の抽出方法など高度な専門的質問に対しても、自身の研究結果に基づき的確かつ誠実に回答を行っており、研究者として自立した能力を備えていることが認められた。

よって、論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 5 編)

(a) 査読のある雑誌等

1. Rinka Kawano, Masaki Kawamura, “Watermarking Method with Scaling Rate Estimation Using Pilot Signal,” IEICE Transactions on Information and Systems, Vol. E107-D, No. 9, pp. 1151-1160 (2024)
2. Rinka Kawano, Masaki Kawamura, “Estimation of Geometric Transformation Matrices Using Grid-shaped Pilot Signals,” APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, Vol. 14, No. 1, e24 (2025)

(b) 査読のある国際会議の会議録等

1. Rinka Kawano, Masaki Kawamura, “Detection of Periodic Pilot Signal in Image Watermarking,” 2021 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp. 1647-1652 (2021)
2. Rinka Kawano, Masaki Kawamura, “Rotation Angle Detection Using a Pilot Signal from Rotated Stego-Image,” 2023 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp. 1664-1669 (2023)
3. Rinka Kawano, Masaki Kawamura, “Estimation of rotation angle and anisotropic scaling rate using pilot signals for watermarking,” 2024 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC), pp. 1-6 (2024)