

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560039

研究課題名(和文) 光学的非整数次フーリエ変換を利用した高速高精度高秘匿な指紋認証機器の研究開発

研究課題名(英文) Research and development of fingerprint recognition system with high speed, high accuracy and high security by use of the optical fractional Fourier transform

研究代表者

吉村 博幸 (Yoshimura, Hiroyuki)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90261354

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：近年、各人の生体情報を利用した個人認証システムは、パソコンやスマートフォン等、我々の身の回りの情報機器や携帯端末等で多く使用されている。しかし、各人の生体情報は一度外に情報が漏れてしまうと取り換えることができないため、暗号化や加工などの手法でテンプレートを作成して保存し認証処理を行うことが望ましい。

本研究では、指紋情報の加工を安全に行うため、非整数次フーリエ変換を用いた指紋テンプレート作成方法を種々提案し、認証精度を最も高くするための変換次数などの条件を明らかにした。またこの処理を高速かつ高精度に行うため、レーザー光やレンズを用いた光情報処理による手法について提案した。

研究成果の概要(英文)：Individual recognition system using the biological information has been recently increasing everywhere, for example, in PC's, smartphones, and so on. In general, enrolled biological information should be stored as templates in the database or the IC card referred in the recognition process. The information of the templates should also be hidden to keep individual biological information secret.

In this study, I focused on fingerprints, and the two dimensional fractional Fourier transforms with different orders were performed for the divided areas of the fingerprint image in order to realize the highly secure fingerprint templates by use of the optical system. The condition to realize the templates with the highest recognition accuracy was also shown. Finally, the optical system to generate the fingerprint templates was proposed.

研究分野：光工学，電磁波工学，バイオメトリクス

キーワード：バイオメトリクス 光情報処理 指紋認証

1. 研究開始当初の背景

(1) 情報サービスには、電子投票、電子商取引、電子入札、電子決済、電子政府、遠隔会議、遠隔医療などがあるが、これらのサービスの信頼性および安全性確保のためには、情報セキュリティ技術が必要不可欠である。その中でも、個人認証技術は情報サービスの根幹技術として欠かせないものであり、人間の指紋、虹彩、顔、筆跡などの生体情報を利用して個人認証を行う、バイオメトリクス(生体認証)機器が近年急速に導入されている。通常、バイオメトリクス機器にはこれらの生体情報がテンプレートとしてサーバーなどに保存されており、認証対象となる生体情報との照合が行われ、本人であるのかどうかの判定が行われる。しかし、認証精度はまだまだ低く、また生体情報は個人個人に特有なものであるが故に取り換えのきくものではない。そのため、認証精度を高める研究、およびセキュアなテンプレート加工技術に関する研究が世界で広く行われているのが現状である。

(2) 研究代表者は、光学的非整数次フーリエ変換の特性、およびそれを部分的コヒーレント場に拡張した基礎的研究を長年行ってきた経緯がある。また、画像データの新たな暗号化手法として、非整数次フーリエ変換を利用した手法を提案し研究を継続している。本手法は、画像データの走査線ごとに次数の異なる離散非整数次フーリエ変換を適用することにより、原画像データの暗号化を行う手法である。コンピューターによる実現例を図1に示す。左が指紋画像であり、右が暗号化画像の一例である。近年、セキュアな指紋テンプレートが望まれており、本手法の適用が有効である。

さらに研究代表者は、図2に示す生体情報認証に関する新たな光学的手法を提案し、研究を継続している。本手法は従来の結合変換相関器の弱点を克服し、オール光による生体情報認証システム構築が可能であり、高速認証が可能となる。また、従来の指紋認証技術は概ね指紋の特徴点を抽出しその照合に基礎を置いているため認証精度が低いですが、本手法により高精度認証が期待できる。

以上、研究代表者がこれまで行ってきた研究を踏まえて、指紋テンプレートの暗号化技術及び指紋認証技術を有機的に組み合わせることにより、たとえ指紋テンプレートがサーバーより漏洩したとしても元の指紋画像に復元することが極めて困難であり、かつ指紋認証の高速化及び高精度化が可能なるオール光指紋認証システム構築の着想を得るに至った。

2. 研究の目的

社会の高度情報化に伴い、情報セキュリティへの要請は極めて高く、特に個人認証技術の重要性がますます高まってきている。こ

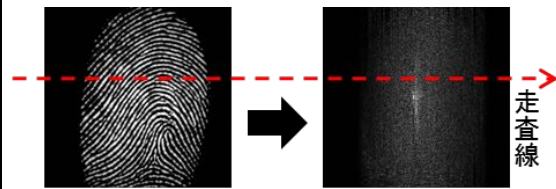


図1 指紋画像の暗号化画像例

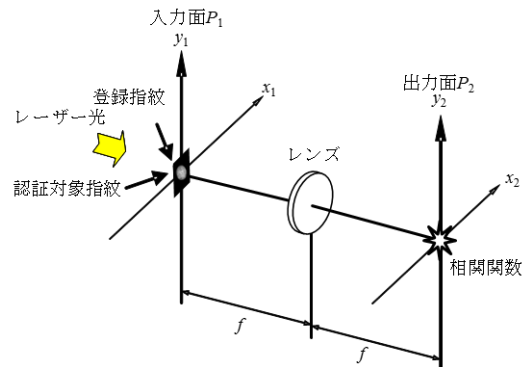


図2 光空間周波数相関システム

れを背景に、コンピューター、ネットワーク、銀行ATMなどにおいて、指紋や指の静脈パターンといった個人に特有な生体情報を個人認証に利用する、バイオメトリクス機器が近年急速に取り入れられている。

本研究では、バイオメトリクス機器の高速化・高精度化、かつ使用される生体情報の高秘匿化を目的とし、コンピューター演算処理に強く依存した現行の認証機器に取って代わる、オール光演算認証システムの実現を目指す。なお本研究では、様々な生体情報の中でも歴史的にも古くかつ最近最もよく使用されている指紋を対象とし、光学的非整数次フーリエ変換の概念を取り入れシステムの構築を図る。

3. 研究の方法

(1) 指紋認証の高精度化のためには、事前に生成された指紋テンプレートと認証時に生成された指紋加工画像間の位置ずれや回転ずれの補正、すなわちアライメント問題を解決しなければならない。本研究では、基礎的検討として、指紋画像として Fingerprint Verification Competition (FVC) 2002 で使用された指紋データを用いて、同じ指から採取された8枚の指紋画像間の位置ずれや回転ずれの補正を、コンピューターを用いて両者の相互相関関数を計算し、アライメント問題の解決を図る。次に、アライメント問題が解決された指紋画像の走査線ごとに次数の異なる離散非整数次フーリエ変換を適用して指紋テンプレートを生成し、認証精度を解析する。さらに、生成された指紋テンプレートの攻撃耐性を定量的に調べるため、指紋テンプレート作成時の変換次数と逆変換時の次数との間に差異をもたせ、ピーク信号対雑音比(PSNR)を用いて、指紋画像と逆変換画像

間の差異を解析し、変換回数に要求される特性を定量的に明らかにする。

(2) 指紋登録および指紋認証における高速化、および指紋認証機器の負荷低減化を目的として、指紋画像の最適サイズを、コンピュータを用いた数値解析を行い明らかにする。具体的には、指紋画像のコア中心から抽出する画像サイズをさまざま変化させ、抽出された指紋画像間の相互相関関数のピーク値を用いて、指紋認証精度の指標である等誤り率(EER: Equal Error Rate)を導出して決定する。次に、最適サイズに抽出された指紋画像に対して、指紋画像の走査線ごとに変換回数を変化させ、離散非整数次フーリエ変換、離散非整数次コサイン変換、および離散非整数次サイン変換を適用して、それぞれの振幅分布および位相分布を指紋テンプレートとして生成する。そして、生成された指紋テンプレート間の相互相関関数のピーク値を用いて等誤り率を算出し、認証精度が最も高くなる条件について明らかにする。また、生成された指紋テンプレートの頑強性を解析するため、指紋画像と生成された指紋テンプレートを同じ次数列で逆変換した画像間のピーク信号対雑音比を解析し明らかにする。

(3) バイオメトリクスの長所を最大限に活かすため、本提案手法において、IDカードを使用することなく指紋だけで本人認証が可能かどうかについて検討を行い、認証精度について(2)で得られた結果と比較を行う。具体的には、指紋画像に対して走査線ごとに適用する変換回数を異なる指紋画像に対しても変えずに適用して指紋テンプレートを生成する。すなわち、変換回数列を指紋認証機器で固定化することを意味する。次に、これら指紋テンプレートを用いて指紋認証を行い、認証精度を解析し、(2)で得られた結果と比較を行う。

(4) 指紋登録および指紋認証の高速化を図るため、コンピュータを用いた指紋認証ではなく、レーザ光やレンズを組み合わせた光情報処理を利用した手法を検討する。すなわち、(1)から(3)で検討してきた指紋画像の走査線ごとに変換回数を変化させる手法ではなく、指紋画像を16分割して、各々の分割画像に対して二次元の変換を行う手法を検討する。次に、本手法における認証精度を算出し、今後検討すべき事項を明確にする。

4. 研究成果

(1) 2012年度は研究代表者のサバティカル研修の年度であったため、2012年4月中旬から8月下旬までは米国ウエストバージニア大学コンピュータ科学・電気工学科のRoss准教授の下で、8月下旬から翌1月中旬まではノルウェーイェヴィーク大学コンピュータ科学・メディア技術学科のBours教授の下

で、研究代表者がこれまで提案してきた非整数次フーリエ変換を利用した指紋テンプレートによる指紋認証精度の高度化に関する研究を行った。具体的には、指紋認証時において考慮すべきアライメント問題を解決し、FVC2002で使用された指紋データから離散非整数次フーリエ変換を適用して生成した指紋テンプレートを用いて数値解析を行い、認証精度を解析した。その結果、指紋認証精度が従来の指紋認証手法に比べて十分高くなることを明らかにした。

一方、本テンプレートの攻撃耐性に関する研究については、離散非整数次フーリエ変換により得られた暗号化画像に対して、回数に差異を与えて離散非整数次逆フーリエ変換を行い復号化画像を得て、指紋原画像と復号化画像間のピーク信号対雑音比を数値解析により求めた。その結果、回数の差異が0.004以上あれば暗号化画像から指紋原画像に復元することが非常に困難になることがわかった。さらに、離散非整数次フーリエ変換に関する検討だけでなく、離散非整数次コサイン変換、離散非整数次サイン変換についても、それぞれ振幅分布ならびに位相分布を利用して得られた指紋テンプレートについて再度詳細に検討を行う必要があることがわかった。

(2) FVC2002で使用された指紋データ(画像サイズ:横388ピクセル,縦374ピクセル)を用いて、指紋認証時における最適な画像サイズを解析した結果、指紋のコアを中心として抽出された指紋画像のサイズが横96ピクセル,縦96ピクセルの場合に指紋認証精度が最も高く、等誤り率の値は2.45%と最小値となり、最適な画像サイズであることがわかった。

次に、最適サイズに抽出された指紋画像に対して離散非整数次コサイン変換および離散非整数次サイン変換を適用し、これらの位相分布を用いて指紋テンプレートを作成した。そして、生成された各々のテンプレートより等誤り率を算出した。その結果を表1に示す。この表より、離散非整数次コサイン変換(DFCT)および離散非整数次サイン変換(DFST)の位相分布を用いて指紋テンプレートを作成した場合、かつ、変換回数範囲を0.0から0.3もしくは0.0から0.5とした場合(ただし、い

表1 等誤り率の回数範囲依存性(各人で変換回数列を変化させた場合)

	DFCT	DFST
$0.0 < p_i \leq 1.0$	4.59×10^{-4}	4.96×10^{-4}
$0.1 \leq p_i \leq 1.0$	1.01×10^{-3}	9.94×10^{-4}
$0.3 \leq p_i \leq 1.0$	8.51×10^{-3}	9.23×10^{-3}
$0.5 \leq p_i \leq 1.0$	9.37×10^{-2}	9.45×10^{-2}
$0.7 \leq p_i \leq 1.0$	1.88	1.92
$0.0 < p_i \leq 0.1$	1.73×10^{-6}	1.81×10^{-6}
$0.0 < p_i \leq 0.3$	5.17×10^{-7}	5.63×10^{-7}
$0.0 < p_i \leq 0.5$	6.78×10^{-7}	4.58×10^{-7}
$0.0 < p_i \leq 0.7$	4.32×10^{-6}	4.17×10^{-6}

れも0.0を含まず),等誤り率の値は 10^{-7} のオーダーとなり,指紋画像そのものを用いて行う指紋認証に比べて認証精度が高精度になることがわかった。

さらに,生成された指紋テンプレートの頑強性について,ピーク信号対雑音比を用いて評価した結果,値は数dBとなり,頑強性が十分高いことが示された。

(3) 本提案手法において,指紋だけで本人認証が可能かどうかについて検討を行い,認証精度について(2)で得られた結果と比較を行った。その結果,指紋テンプレート生成方法については(2)で得られた結果と同様,指紋画像の走査線ごとに離散非整数次コサイン変換および離散非整数次サイン変換の位相分布を用いればよいことを明らかにした。また,表2に示すように,指紋テンプレート生成条件も(2)と同様,0.0から0.3もしくは0.0から0.5(いずれも0.0を含まず)にすべきことを明らかにした。ただし,認証精度は(2)の結果である 10^{-7} のオーダーと比較するとかなり低く,EERは数%程度であった。しかし,指紋認証機器においてすべての人に対して変換次数列を固定してしまうのではなく,各人各指の指紋の特徴点情報を利用して変換次数列を個人個人でそれぞれ決めることにより,認証精度の高精度化が可能であることを明らかにした。

表2 等誤り率の次数範囲依存性(各人で変換次数列を同一にした場合)

	DFCT	DFST
$0.0 < p_i \leq 1.0$	4.57	4.57
$0.1 \leq p_i \leq 1.0$	4.78	4.69
$0.3 \leq p_i \leq 1.0$	5.18	5.11
$0.5 \leq p_i \leq 1.0$	5.87	5.94
$0.7 \leq p_i \leq 1.0$	7.25	7.16
$0.0 < p_i \leq 0.1$	3.94	3.95
$0.0 < p_i \leq 0.3$	3.81	3.90
$0.0 < p_i \leq 0.5$	3.85	3.83
$0.0 < p_i \leq 0.7$	3.83	3.88

(4) コンピューターの数値計算に基づいた指紋登録および指紋認証ではなく,処理速度の高速化を図るため,光情報処理システムによる指紋テンプレート生成方法および認証方法について検討を行った。具体的には,図3に示すように,縦96ピクセル,横96ピクセルの指紋画像を16等分割し,分割された各々の画像に対して次数の異なる二次元非整数次フーリエ変換を行う方法を提案し検討を行った。その結果,表3に示すように,離散非整数次フーリエ変換によって得られた結果の強度分布(ID)ではなく位相分布(PD)を指紋テンプレートとすることにより,また離散非整数次フーリエ変換の次数範囲を0.1から0.5,0.1から0.6,もしくは0.1から0.7とした場合,認証誤差は 10^{-3} のオーダーとなった。この結果は(2)で示されたコンピューターによる数値計算に基づいた方法より認証精度は劣るものの,現

状の指紋認証機器と同程度の認証精度が得られることを明らかにした。今後の課題として,実際に光情報処理システムを構築し,本手法を実現することがあげられる。

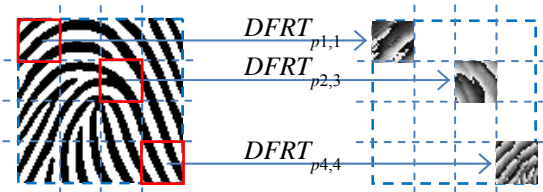


図3 二次元非整数次フーリエ変換を利用した指紋テンプレート生成方法の概念図

表3 等誤り率の次数範囲依存性(二次元非整数次フーリエ変換の場合)

	DFRT	
	ID	PD
$0.1 \leq p_i \leq 0.5$	0.803	9.99×10^{-3}
$0.1 \leq p_i \leq 0.6$	0.715	5.86×10^{-3}
$0.1 \leq p_i \leq 0.7$	0.360	5.92×10^{-3}
$0.1 \leq p_i \leq 0.8$	0.318	1.86×10^{-2}
$0.1 \leq p_i \leq 0.9$	0.176	3.55×10^{-2}

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Hiroyuki Yoshimura: "EER, robustness and generation condition of fingerprint templates based on the fractional cosine and sine transforms," International Journal of Multimedia and Image Processing, Vol.4, Issues3/4, pp.245-250 (2014). 査読有. DOI: 10.20533/ijmip.2042.4647.2014.0030

Hiroyuki Yoshimura: "Recognition accuracy and robustness of fingerprint templates generated by discrete fractional sine transform," International Journal for Information Security Research, Vol.3, Issue 2, pp.266-273 (2013). 査読有. DOI: 10.20533/ijisr.2042.4639.2013.0032

[学会発表](計5件)

Hiroyuki Yoshimura: "Fingerprint templates generated by fractional Fourier transform and the optical system," Technical Digest of the 10th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'16), Mar. 2nd, 2016, Weingarten (Germany).

吉村博幸:「1次元離散非整数次コサイン変換とサイン変換を利用した指紋テンプレートの特性」第5回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム(SBRA2015), 2015.11.13, 東京大学本郷(浅野)キャンパス 武田先端知ビル武田ホール(東京都文京区).

齊藤良介, 吉村博幸:「特徴点情報と離散非整数次フーリエ変換を利用した指紋認

証における最適画像サイズの決定」第5回
バイオメトリクスと認識・認証シンポジウ
ム(SBRA2015), 2015.11.13, 東京大学本郷
(浅野)キャンパス武田先端知ビル武田ホー
ル(東京都文京区).

Hiroyuki Yoshimura: “Fingerprint templates
generated by the fractional Fourier, cosine and
sine transforms and their generation
conditions,” World Congress on Internet
Security 2014 (WorldCIS-2014), Dec. 8th.
2014, London (UK).

Hiroyuki Yoshimura: “Fingerprint templates
generated by the fractional Fourier, cosine and
sine transforms and comparison of recognition
accuracy and robustness,” The International
Conference on Experimental Mechanics 2013
& the 12th Asian Conference on Experimental
Mechanics (ICEM2013 & ACEM-12th), Nov.
25th, 2013, Bangkok (Thailand).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

吉村 博幸 (YOSHIMURA Hiroyuki)
千葉大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：9 0 2 6 1 3 5 4