UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE TELECOMUNICACIONES Y REDES

Desarrollo de un sistema electrónico portátil orientado a la detección de
billetes falsos de 50, 100 y 200 soles basado en algoritmos de procesamiento
digital de imágenes

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero de Telecomunicaciones y Redes

AUTOR(ES)

Huaytalla Usurin, Bryan Juan (0000-0002-4360-4133)

Humari Quispe Diego Oswaldo (0000-0003-3092-8486)

ASESOR

Kemper Vásquez Guillermo Leopoldo (0000-0002-7800-7769)

Lima, 19 de Julio del 2020

DEDICATORIA

A nuestros padres y familiares que siempre creyeron en nosotros y nos brindaron todo el apoyo en todos los sentidos. A nuestros amigos y colegas que nos apoyaron con su conocimiento y buena voluntad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Banco Central de Reserva del Perú y a su Gerente de Gestión del Circulante, Javier Gutiérrez por habernos brindado todo el apoyo en cuanto a material de validación y por sus valiosos consejos e interés en promover la innovación.

Agradecemos al Dr. Guillermo Kemper por sus asesorías, su pasión por la investigación académica y por exigirnos siempre más de lo que esperábamos.

Agradecemos a los miembros del jurado de la sustentación por sus observaciones y correcciones que nos permitieron mejorar la presente tesis.

Resumen

El presente proyecto de tesis propone el desarrollo de un sistema portátil de detección de billetes falsos de 50, 100 y 200 soles de diagnóstico automático basado en procesamiento digital de imágenes e implementado en un computador de placa reducida. En la actualidad, las técnicas de falsificación de billetes que se usan en el Perú son capaces de burlar a los sistemas de detección tradicionales. El sistema propuesto se basa en una detección más eficiente ya que enfoca la adquisición y segmentación de imagen en los patrones calcográficos de marcas de alto relieve. Para optimizar este proceso, se hace uso de una cámara, una lente y un recinto portable. Al resultado se le aplican filtros de repujado, de sobel, de erosión y de dilatación sucesivamente, para resaltar las características distintivas de los billetes legítimos. Finalmente, se usan Máquinas de Soporte Vectorial para clasificar los billetes falsos y los verdaderos, de acuerdo al proceso de entrenamiento realizado para cada denominación. El resultado entregado permitirá que el algoritmo pueda discernir la legitimidad del billete e indicarlo en un display para el entendimiento de cualquier usuario. Asimismo, el computador va conectado a una base de datos para transmitir las estadísticas de billetes falsos detectados. Para la validación de la solución, se han procesado muestras de 278 billetes entre verdaderos y falsos de 50, 100 y 200 soles provistos por el BCRP, o Banco Central de Reserva del Perú. En estas pruebas se obtuvo un porcentaje precisión mayor al 97% para identificar billetes falsos.

Palabras clave: Billetes; detección; falsificación; procesamiento digital de imágenes; SVM; calcografía; alto relieve.

“Development of a portable electronic system oriented to the detection of counterfeit bills of 50, 100 and 200 soles based on digital image processing algorithms”

Abstract

The present thesis project proposes to design a portable system to detect 50, 100 and 200 soles counterfeit bills with automatic diagnosis based on digital image processing and implemented on a reduced plate computer. Nowadays, the current counterfeiting techniques for bills being used in Peru are capable of eluding the traditional detection systems. The system being proposed is based on a more efficient detection because the acquisition and image segmentation is being focused on the chalcographic patterns of high relief. To optimize this process, a camera, a lens and a portable enclosure are being used. Then, the system applies the embossing filter, the sobel filter, the erosion filter and the expansion filter successively, to emphasize the distinctive characteristics of the legitimate bills. Finally, Support Vector Machines are used to classify real and counterfeit bills, based on the training process performed for each denomination. The result delivered will allow the program to discern the legitimacy of the bill and show it on a display to ease the understanding by any user. Likewise, the computer is connected to a database in order to transmit the statistics of counterfeit bills detected. To validate the solution, samples of 278 bills, counterfeit and legal, of 50, 100 and 200 soles were processed. These were provided by the BCRP, the official organism of Peru in charge of coins and bills. In this tests, the results show a precision of over 97% of counterfeited bills correctly identified.

Keywords: bill; detection; counterfeit; digital image processing; SVM; high-relief.

Índice

Introducción.....	11
Capítulo 1: ASPECTOS INTRODUCTORIOS.....	12
1.1. Situación problemática y definición del problema.....	12
1.1.1. Situación problemática	12
1.1.2. Definición del problema	17
1.2. Estado del arte	19
1.2.1. Productos y soluciones comerciales existentes.....	19
1.2.2. Propiedad intelectual registrada	22
1.2.3. Aportes de innovación.....	23
1.2.4. Publicaciones Científicas/Académicas/Ingenieril.....	23
1.2.5. Aportes de conocimiento nuevo, procedimientos, métodos y aplicaciones.....	26
1.3. Justificación	27
1.3.1. Justificación respecto a beneficios para el usuario	27
1.3.2. Justificación ingenieril	28
1.3.3. Justificación social	29
1.3.4. Justificación económica	30
1.4. Requerimientos técnicos, ingenieriles y operativos	30
1.5. Objetivo General.....	31
1.6. Objetivos Específicos de Desarrollo de la Solución Propuesta.....	31
1.7. Breve descripción de la solución propuesta	32
1.7.1. Diagrama de bloques	32
1.7.2. Ilustración del Producto Final Estimado (Terminado)	32
1.7.3. Funcionamiento del sistema	33
1.7.4. Alcances y limitaciones de la solución propuesta.....	34
1.7.5. Aplicaciones directas e indirectas de la solución propuesta	35
1.8. Viabilidad.....	36
1.8.1. Viabilidad técnica.....	36
1.8.2. Viabilidad económica	37
1.8.3. Viabilidad Social	39
1.8.4. Viabilidad operativa.....	39
1.8.5. Alternativas	40
Capítulo 2: MARCO TEÓRICO	41
2.1. Introducción	41
2.2. Características de billetes de soles.....	41
2.2.1. Marca de agua	41
2.2.2. Hilo con figuras de movimiento	43
2.2.3. Tinta que cambia de color.....	46
2.2.4. Registro perfecto	49
2.2.5. Microimpresiones	50
2.2.6. Impresión fluorescente.....	52
2.2.7. Marca Calcográfica.....	55
2.3. Base teórica de procesamiento de imágenes	58

2.3.1. Adquisición.....	58
2.3.2. Pre procesamiento.....	63
2.3.3. Segmentación.....	65
2.3.4. Descripción.....	72
2.3.5. Reconocimiento	75
2.4. Comentarios finales	80
Capítulo 3: DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE PROPUESTO	81
3.1. Introducción	81
3.2. Materiales y componentes.....	81
3.2.1. Recinto	81
3.2.2. Computador de placa reducida	82
3.2.3. Cámara	85
3.2.4. Lente de aumento.....	86
3.2.5. Iluminación LED	87
3.2.6. Batería	88
3.2.7. Sensor de presencia.....	89
3.3. Diseño e implementación	89
3.3.1. Diseño de recinto.....	90
3.3.2. Adquisición de imágenes.....	92
3.3.3. Circuito de sensor IR	94
3.3.4. Circuito de LED blanco.....	97
3.3.5. Circuito de pantalla LCD	98
3.4. Comentarios finales	100
Capítulo 4: DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PROPUESTO.....	102
4.1. Introducción	102
4.2. Diseño e implementación	102
4.2.1. Adquisición de imágenes.....	103
4.2.2. Clasificación por denominación.....	105
4.2.3. Procesamiento de marcas calcográficas	112
4.2.4. Clasificación	122
4.2.5. Almacenamiento en base de datos.....	126
4.3. Comentarios finales	129
Capítulo 5: PRUEBAS DE VALIDACIÓN Y RESULTADOS.....	130
5.1. Método de validación	130
5.2. Resultados de reconocimiento de denominación	131
5.3. Resultados de detección de veracidad	132
Conclusiones y comentarios finales.....	137
Recomendaciones para trabajos futuros.....	139
Referencias bibliográficas.....	140
Anexo: código del software.....	144

Índice de tablas

Tabla 1.1.1.1 Aumento anual del monto de dinero falsificado en soles.....	13
Tabla 1.2.1.1 Productos y soluciones comerciales existentes.....	18
Tabla 1.2.2.1 Propiedad intelectual registrada	21
Tabla 1.2.4.1 Publicaciones Científicas/Académicas/Ingenieriles	23
Tabla 1.3.1.1 Comparativa entre productos actuales y solución propuesta	27
Tabla 1.3.3.1 Métodos de detección que poseen los detectores en la actualidad.....	29
Tabla 1.8.2.1 Cuadro económico total.....	36
Tabla 1.8.2.2 Cuadro Económico Parcial.....	37
Tabla 2.3.1.1 Profundidad de color.....	60
Tabla 3.2.1.1 Especificaciones de Raspberry Pi	81
Tabla 3.2.1.2 Especificaciones de módulo cámara v1 Raspberry Pi	83
Tabla 4.2.2.1 Descriptores de 6 billetes para clasificación por denominación.....	107
Tabla 4.2.4.1 Descriptores de 6 billetes de 50 soles	121
Tabla 4.2.5.1 Ejemplo de datos enviados a la base de datos	126
Tabla 5.1.1.1 Cantidad de muestras de billetes	128
Tabla 5.2.1.1 Resultados de reconocimiento de denominación	129
Tabla 5.3.1.1 Resultados de detección para billetes de 50 soles.....	131
Tabla 5.3.1.2 Resultados de detección para billetes de 100 soles	132
Tabla 5.3.1.3 Resultados de detección para billetes de 200 soles	134

Índice de figuras

Figura 1.1.1.1 Banda de seguridad en el billete de 100 nuevos soles.....	15
Figura 1.1.1.2 Impresión fluorescente en billete de 200 nuevos soles	15
Figura 1.1.1.3 Offset convencional y Offset Waterless	16
Figura 1.1.1.4 Canje de billetes deteriorados.....	17
Figura 1.2.5.1 Comparación de marca calcográfica en billete de 100 soles	26
Figura 1.7.1.1 Diagrama de bloques	31
Figura 1.7.2.1 Ilustración de Producto Final Estimado	32
Figura 1.7.3.1 Diagrama de flujo de funcionamiento	34
Figura 2.2.1.1 Marca de agua en billete de 50 soles	41
Figura 2.2.1.2 Marca de agua en billete de 100 soles	41
Figura 2.2.1.3 Marca de agua en billete de 200 soles	44
Figura 2.2.2.1 Hilo de seguridad en billete de 50 soles	44
Figura 2.2.2.2 Hilo de seguridad de billete de 100 soles.....	45
Figura 2.2.2.3 Hilo de seguridad de billete de 200 soles	45
Figura 2.2.3.1 Tinta que cambia de color en billete de 50 soles.....	45
Figura 2.2.3.2 Tinta que cambia de color en billete de 100 soles	46
Figura 2.2.3.3 Tinta que cambia de color en billete de 200 soles	44
Figura 2.2.4.1 Registro perfecto en billete de 50 soles	49
Figura 2.2.4.2 Registro perfecto en billete de 100 soles	49
Figura 2.2.4.3 Registro perfecto en billete de 200 soles	49
Figura 2.2.5.1 Microimpresiones en billete de 50 soles	51
Figura 2.2.5.2 Microimpresiones en billete de 100 soles.....	51
Figura 2.2.5.3 Microimpresiones en billete de 200 soles.....	50
Figura 2.2.6.1 Impresión fluorescente del anverso y reverso de billete de 50 soles	51
Figura 2.2.6.2 Impresión fluorescente del anverso y reverso de billete de 100 soles....	52
Figura 2.2.6.3 Impresión fluorescente del anverso y reverso de billete de 200 soles....	52
Figura 2.2.7.1 Relieve microscópico o calcografía	55
Figura 2.2.7.2 Marca calcográfica en billete de 50 soles	56
Figura 2.2.7.3 Marca calcográfica en billete de 100 soles.....	56
Figura 2.2.7.4 Marca calcográfica en billete de 200 soles.....	56

Figura 2.3.1.1 Cavidades de luz en arreglo e individuales.....	57
Figura 2.3.1.2 Filtro de Bayer.....	57
Figura 2.3.1.3 Matriz de una imagen digital en escala de grises	58
Figura 2.3.1.4 Formación de imagen RGB.....	60
Figura 2.3.2.1 Resultado de filtro de repujado	66
Figura 2.3.3.1 Imagen binarizada.....	66
Figura 2.3.3.2 Imagen original, binaria y segmentada.....	67
Figura 2.3.3.3 Vecindades de un pixel.....	68
Figura 2.3.3.4 Tipos de conectividad entre píxeles.....	67
Figura 2.3.3.5 Resultados de filtro Sobel	68
Figura 2.3.3.6 Ejemplo de erosión de la imagen A con la máscara B.....	69
Figura 2.3.3.7 Ejemplo de dilatación de la imagen A con la máscara B.....	70
Figura 2.3.4.1 Imagen binaria y su representación en matriz binaria.....	71
Figura 2.3.4.2 Matriz binaria etiquetada	72
Figura 2.3.5.1 Hiperplano solución entre muestras de 2 clases.....	74
Figura 2.3.5.2 Distancia entre hiperplanos dados los vectores de soporte.....	75
Figura 2.3.5.3 Hiperplano solución con condición Soft Margin.....	76
Figura 2.3.5.4 Kernel convierte los datos en linealmente separables	77
Figura 2.3.5.5 Ejemplo de matriz de confusión	78
Figura 3.2.1.1 Recinto de material acrílico	80
Figura 3.2.2.1 Raspberry Pi B+ y 3 B+	82
Figura 3.2.3.1 Módulo Cámara v1 Raspberry Pi	84
Figura 3.2.4.1 Lente biconvexa redonda	85
Figura 3.2.5.1 LED estrella de luz blanca	86
Figura 3.2.6.1 Batería portable Xiaomi 10000 mAh	86
Figura 3.2.7.1 Sensor IR TCRT5000	87
Figura 3.3.1.1 Diagrama de bloques de implementación.....	88
Figura 3.3.1.2 Diseño de paredes del recinto	89
Figura 3.3.1.3 Detalles de zonas de recinto.....	90
Figura 3.3.2.1 Arreglo de soporte para cámara y lente	91
Figura 3.3.2.2 Billete de 100 soles dentro de zona de captura.....	92
Figura 3.3.3.1 Distribución de pines del Raspberry	93

Figura 3.3.3.2 Circuito de sensor IR.....	94
Figura 3.3.3.3 Sensor IR en funcionamiento.....	94
Figura 3.3.4.1 Circuito de LED blanco	95
Figura 3.3.5.1 Circuito de pantalla LCD	96
Figura 3.3.5.2 Diseño final de placa de circuito impreso	97
Figura 3.3.5.3 Diseño electrónico de conexiones.....	98
Figura 4.2.1.1 Diagrama de bloques de software propuesto	101
Figura 4.2.1.2 Secuencia de algoritmo de adquisición de imagen	101
Figura 4.2.1.3 Captura fotográfica de billete de 100 soles.....	102
Figura 4.2.2.1 Zonas de interés para clasificación.....	105
Figura 4.2.2.2 Diagrama de entradas y salidas SVM	108
Figura 4.2.2.3 Hiperplano de entrenamiento de clasificador SVM por denominación.....	109
Figura 4.2.3.1 Diagrama de bloques de procesamiento de imagen.....	110
Figura 4.2.3.2 Zona de interés en billetes de 50, 100 y 200 soles	113
Figura 4.2.3.3 Resultado de filtro de repujado	114
Figura 4.2.3.4 Resultado de filtro de Sobel.....	116
Figura 4.2.3.5 Resultado de binarización	117
Figura 4.2.3.6 Resultado de erosión	118
Figura 4.2.3.7 Resultado de dilatación	119
Figura 4.2.4.1 Diagrama de entradas y salidas SVM validación.....	121
Figura 4.2.4.2 Hiperplano de entrenamiento SVM de billetes de 50 soles.....	123
Figura 4.2.4.3 Hiperplano de entrenamiento SVM de billetes de 100 soles.....	123
Figura 4.2.4.4 Hiperplano de entrenamiento SVM de billetes de 200 soles	124
Figura 4.2.5.1 Diagrama de red de conexión a base de datos.....	125
Figura 4.2.5.2 Visualización de base de datos en servidor	126
Figura 5.3.1.1 Billete deteriorado de 50 soles	132
Figura 5.3.1.2 Billete de 100 soles insertado erróneamente.....	133

Lista de variables matemáticas

$f(x,y)$ es la representación de una matriz como función con dimensiones x e y , que conforma una imagen digital. Asimismo, X e Y son los límites de x e y en la función $f(x,y)$.

$f_i(x,y)$ es la representación de un conjunto de matrices bidimensionales, que conforma una imagen RGB, siendo el subíndice i el indicador de la matriz RGB referenciada.

H_n es la representación modular de una matriz como máscara para filtro de repujado.

$g(x,y)$ es el resultado de la binarización de la función $f(x,y)$.

S_n es la representación modular de una matriz como máscara para filtro de Sobel.

A es la representación modular de una imagen digital.

B es la representación modular de un filtro de erosión o dilatación.

μ_i es el valor del promedio de intensidad de la matriz z en la función $f(x,y)$.

x_i es el vector característica de entrada para el hiperplano solución en la SVM.

W^T es el vector ortogonal al hiperplano solución en la SVM.

b es el coeficiente de intersección del hiperplano solución en la SVM.

d^+ y d^- son las distancias entre los hiperplanos de vectores de soporte.

$I4_n$ es un segmento específico de la zona de interés de una imagen digital definida como matriz.

p es el arreglo de los descriptores contenidos en una columna.

u es la media aritmética de los descriptores contenidos en el arreglo p .

σ es la desviación estándar de los descriptores contenidos en el arreglo p .

n es el arreglo de los descriptores normalizados contenidos en una columna.

$H1_n(x,y)$ es la máscara de repujado en formato matricial con etiqueta para el tipo de billete n .

$I4'_n(x,y)$ es el resultado de la convolución con la matriz de repujado para el tipo de billete n .

$H2_n(x,y)$ es la máscara de Sobel en formato matricial con etiqueta para el tipo de billete n .

$I4''_n(x,y)$ es el resultado de la convolución con la matriz de Sobel para el tipo de billete n .

$bin a_n(x,y)$ es el resultado de la binarización de $I4''_n(x,y)$ para el tipo de billete n .

$H3_n$ es la máscara de erosión en formato matricial con etiqueta para el tipo de billete n .

$I4'''_n$ es el resultado de la operación de erosión para el tipo de billete n .

$H4_n$ es la máscara de dilatación en formato matricial con etiqueta para el tipo de billete n .

$I4''''_n$ es el resultado de la operación de dilatación para el tipo de billete n .