

DETECCIÓN DE ÁREAS DE PAVIMENTO EN IMÁGENES AÉREAS OBTENIDAS A TRAVÉS DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV) UTILIZANDO FILTRO DE GABOR

Detection of pavement areas in aerial images obtained from
unmanned aerial vehicles (UAV) using Gabor filter

Silvia Patricia Salas Aguilar, Omar Chávez Alegría,
Donato Andrés Flores Espinoza

Universidad Autónoma de Querétaro

Autor de correspondencia
silvia_06_05@hotmail.com

RESUMEN

Este artículo presenta la detección de áreas de pavimento en imágenes aéreas capturadas por medio de un vehículo aéreo no tripulado comercial y utilizando para la segmentación el filtro de Gabor del *software* MATLAB, el cual realiza la segmentación de acuerdo con la textura. Primeramente se llevaron a cabo los vuelos para la captura de las imágenes, después el ortomosaico para mostrar el total de estudio así como la altura de vuelo que fue de 45.6 metros, después se seleccionaron algunas imágenes que tenían pavimento y otros objetos para hacer una comparación de la segmentación con un método manual y así calcular el área del pavimento con el procesamiento de imagen por medio del filtro de Gabor, teniendo como resultado el análisis de cinco imágenes diferentes con un error promedio de 3.16% entre ambos métodos.

Palabras clave: procesamiento de imágenes, filtro de Gabor, segmentación, MATLAB, UAV.

ABSTRACT

This paper presents the detection of pavement areas in aerial images captured by commercial unmanned aerial vehicle, using the Gabor filter of the MATLAB *software* for segmentation. The Gabor filter performs the segmentation according to the texture. First, flights were made to capture the images and the orthomosaic map was formed to show the total area of study; the flight height was 45.6 meters. Some images that contained pavement and other objects were selected afterwards to make a comparison of the segmentation between a manual method to calculate the pavement area and the image processing through the Gabor filter, resulting in the analysis of five different images with an average error of 3.16% between both methods.

Keywords: image processing, Gabor filter, segmentation, MATLAB, UAV.

INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados son un desarrollo tecnológico que facilita la adquisición de imágenes. La mayoría de estos presentan generalmente los mismos componentes de diseño, pero con diferentes características de operación que han sido cambiadas a lo largo del tiempo. A través de la literatura se encuentra información reciente y detallada de la utilización de estos sistemas y de los análisis históricos de estos equipos y cámaras [12]. Estos sistemas se conocen con diferentes nombres y acrónimos, por ejemplo, UAV (Unmanned Aerial Vehicle), RPAS (Remotely Piloted Aerial System), UAS (Unmanned Aerial System) o simplemente como drone [1].

Inicialmente, los sistemas UAV fueron usados para operaciones militares de reconocimiento de vuelos aéreos enemigos en los años cincuenta, con el objetivo de no poner en riesgo a los pilotos humanos [7]. Hoy en día, los sistemas UAV son utilizados para diversas aplicaciones, por ejemplo, para la vigilancia del tráfico urbano, el monitoreo de zonas agrícolas y forestales, el servicio de emergencias y desastres naturales, entre otros [14]. Por otra parte, algunos autores los emplean para monitorear deslizamientos horizontales y verticales de tierra en algunas zonas [6], [8], [15], [16], por lo que también pueden utilizarse para el monitoreo topográfico de áreas costeras [4]. En otros casos de estudio reciente, se inspeccionan algunos edificios y se identifican las grietas a través de las imágenes obtenidas con los sistemas UAV [3] [11]. De la misma manera, estas tecnologías han permitido tener acceso a ciertos tipos de información satelital a la cual se le puede asignar una posición geográfica, por ejemplo, la obtención de imágenes satelitales, bases de datos, navegadores GPS, entre otros, facilitando procedimientos para obtener y analizar la información a través de las imágenes de la superficie terrestre [9]. En [13] se realiza una investigación donde se hace un análisis histórico de la tecnología de los vehículos aéreos



no tripulados, así como la evolución y avance tecnológico de los equipos y las cámaras. Es así que se puede decir que actualmente los UAV han sido una herramienta que facilita la solución de diversas áreas de ingeniería con la ventaja de obtener datos desde un punto de vista aéreo de altitud baja, con alta precisión, en menos tiempo y a bajo costo [12].

Ahora bien, una imagen es definida como una función bidimensional $f(x,y)$ donde x y y son coordenadas espaciales, y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas es llamado como la intensidad de la imagen en cualquier punto. El término de nivel de grises se refiere a la intensidad de las imágenes monocromas, mientras que las imágenes de color son la combinación de tres imágenes monocromas individuales (RGB) [5]. Las imágenes son consideradas como herramientas visuales que representan los objetos de la superficie terrestre; cada elemento llamado píxel, que contiene una imagen, tiene un valor asociado a una variable dada. El procesamiento de imágenes aéreas es el procedimiento que se le da a las imágenes mediante un ordenador. Estos procedimientos pueden ir de un nivel bajo como la corrección en la cual se disminuye el ruido o distorsiones, a un nivel medio como la segmentación o a un nivel alto de procesamiento como el reconocimiento de los objetos del terreno.

La segmentación subdivide una imagen en regiones dependiendo del problema que se esté resolviendo, con el objetivo de simplificar la representación de una imagen a otra más

significativa que facilite el proceso de análisis [5]. Los algoritmos de segmentación se basan en propiedades como la discontinuidad y la similitud. La primera tiene el objetivo de dividir la imagen de acuerdo con los cambios en su intensidad, por ejemplo en los bordes, mientras que la segunda propiedad se enfoca en que la división se base en las similitudes de cada uno de los píxeles de una región con el resto de la región en cuanto a alguna característica. Existen diferentes métodos para realizar la segmentación de las imágenes: detección de bordes, umbralización y basado en regiones [11] [10]. Estos métodos han sido estudiados y utilizados en la mayoría de los procedimientos de procesamiento digital.

Las funciones de Gabor fueron propuestas por primera vez por D. Gabor en acústica como método de análisis de señales en 1946. Estas funciones son paquetes de onda con una envolvente gaussiana, cuyas anchuras en ambos dominios minimizan el producto de incertidumbre. Los filtros de Gabor se han empleado en el procesamiento digital de imágenes, bajo el principio de análisis de textura que se conoce como enfoque de filtrado multicanal, en el cual se usan estadísticas simples de valores de grises como característica de textura. De la misma manera, el filtro de Gabor es un filtro paso banda que otorga información de las frecuencias espaciales de las imágenes para señales unidimensionales, así como su orientación. La forma general del filtro de Gabor se define por la siguiente ecuación.

$$h(x, y, \theta_k, \sigma_x, \sigma_y) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2})} * e^{i(2\pi f + X_{\theta_k})} \quad \text{con } k=1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Donde

$$X_{\theta_k} = x * \cos(\theta_k) + y * \text{sen}(\theta_k)$$

$$Y_{\theta_k} = x * \text{sen}(\theta_k) + y * \cos(\theta_k)$$

f = la frecuencia sinusoidal plana

m = la cantidad de orientaciones

θ_k = la k -ésima orientación del filtro de Gabor

σ_x y σ_y = las desviaciones estándar de la envolvente Gaussiana en los ejes x y y .

Para utilizar el filtro de Gabor son necesarios dos parámetros: la longitud de onda y la orientación del filtro, en el que el primero son unidades en píxeles y el segundo en grados; los valores de orientación para la eficiencia computacional son 0, 45, 90 y 135°. Y para la longitud de onda de una matriz de imagen con un ancho de "N" número de píxeles, donde N es una potencia de 2 los valores de frecuencia son $(Nc/4) \sqrt{2}$, lo que garantiza que la banda de paso del filtro tenga la frecuencia radial más alta y caiga dentro de la matriz de la imagen.

Diversos estudios han utilizado el filtro de Gabor para el análisis de imágenes. En cuanto a ello, se puede utilizar el filtro de Gabor en conjunto con los códigos BSIF para el reconocimiento de las características de la palma de la mano, usando orientaciones de 0° y 90°, y longitudes de onda de 5 y 10 píxeles [17]. En otros estudios se realiza la segmentación automática de las arterias coronarias usando el filtro de Gabor y la umbralización basada en la optimización multiobjetivo, usando ángulos de orientación de 0° y 45°, y longitudes de onda de 5, 10 y 20 píxeles [2]. En [15] se realizó la identificación de matrículas de vehículos a través del filtro de Gabor, primeramente, teniendo detectada la placa del vehículo y después la extracción del número de placa, probado con 718 imágenes y teniendo una detección de 97.9% correcta y 2.1% de error.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para este artículo se muestra en la Figura 1.

El primer paso consiste en determinar la ruta del vuelo en la zona de estudio (Figura 2), indicando la altura con la cual se realizará la operación y teniendo en cuenta los objetos que puedan interrumpir el vuelo como las antenas de comunicación, los árboles y los espectaculares de la zona. Para la captura de imágenes con drones se deben considerar algunos aspectos previos: el equipo que se va a utilizar, la altu-

ra de la captura de las imágenes, la zona de despegue y de aterrizaje, condiciones climáticas, etcétera. Para este estudio se empleará el equipo Phantom 3 Pro que tiene una cámara de 12.4 megapíxeles.

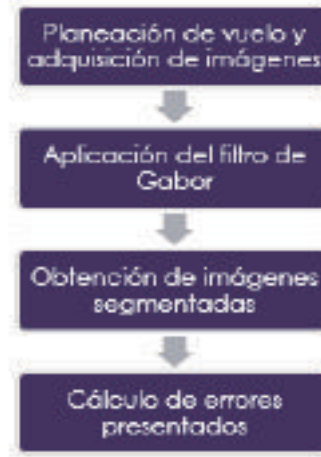


Figura 1. Metodología



Figura 2. Área de vuelo dentro del municipio de Querétaro

Figura 2. Área de vuelo dentro del municipio de Querétaro

El siguiente paso es la aplicación del filtro de Gabor que se encuentra dentro de los códigos del *software* MATLAB y puede ser aplicado a las imágenes, modificando algunas variables debido a que la precisión depende del valor de la longitud de onda y de la orientación de la imagen. En el método de segmentación con el filtro Gabor, se identifican regiones con base en en la similitud de las texturas. A continuación, se describen los pasos para la segmentación:



1. Convertir la imagen a escala de grises
2. Asignar una variable independiente para el tamaño de columnas y filas de la imagen
3. Calcular la longitud de onda mínima y máxima para obtener la longitud de onda de la imagen
4. Asignar valores para el ángulo de orientación
5. Realizar el filtro de Gabor y calcular la magnitud de respuesta para el filtro
6. Asignar una variable para las matrices del número de columnas y filas (x , y)
7. Realizar una matriz *meshgrid* basada en las coordenadas de los vectores filas (x) y columnas (y).
8. Enlazar las matrices como un conjunto de características a lo largo de una dimensión. En este caso el valor de la dimensión sería 3 y las matrices serían la resultante del filtro de Gabor y las coordenadas de filas y columnas.
9. Calcular el número de píxeles de la imagen a través de una variable en la cual se multiplica el número de filas por el número de columnas de la imagen.
10. Con la función *reshape*, redimensionar o cambiar la forma de la matriz del conjunto de características y el número de píxeles, dejando el tamaño de la nueva dimensión con [] para que se calcule automáticamente, de modo que la cantidad de elementos de número de píxeles coincida con la cantidad de elementos del conjunto de características.
11. Con la función *bsxfun*, normalizar las características para que sean de media cero, primero restando el promedio o media de la columna de los elementos de la matriz en sí y segundo dividiendo la matriz entre la desviación estándar.
12. Después se procede a visualizar los componentes principales de los datos sin procesar para tener una idea de cómo son las características de magnitud de Gabor, donde las filas corresponden a las observaciones y las columnas a las variables.
13. Redimensionar nuevamente la matriz, ahora todas las filas de los principales componentes con la primera columna de la matriz.
14. En el siguiente paso, la única información previa asumida en este ejemplo es la cantidad de distintas regiones de textura de la imagen que se segmenta. Se repite el agrupamiento de k-means

cinco veces para evitar mínimos locales al buscar medios que minimicen la función objetivo. Además, en este punto se convierte la matriz en una imagen de color RGB con el fin de visualizar las regiones etiquetadas. La función *label2rgb* determina el color que se asigna a cada objeto en función del número de objetos en la matriz.

15. Por último, devolver una matriz de ceros, con la misma clase, dispersión y complejidad. Se asigna una variable que es igual al número de regiones a segmentar y, con la función *repmat*, se organizan las copias de la matriz en cada dimensión

El proceso de segmentación por el método de Gabor se lleva a cabo a través de la división de regiones y de acuerdo con la textura dentro de la imagen. Es por esto que dependiendo de la imagen, existe un margen de error. Para este método se ha hecho la evaluación de diez imágenes para calcular el error promedio al aplicar el filtro de Gabor para segmentación de imágenes aéreas. Este proceso se realiza en el *software* Image J, donde se calcula manualmente el área de pavimento y el área de lo que no es pavimento dentro de la imagen real, y se compara con el área que se considera pavimento y no pavimento después del proceso de segmentación a través del Filtro Gabor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para cubrir el área de estudio se propuso dividir la captura de imágenes en cuatro vuelos, debido a que la duración máxima de las baterías de este equipo es de 23 minutos y uno solo no sería suficiente para abarcar toda el área. Después de haber hecho el levantamiento, se obtuvieron 588 imágenes mostradas en la Figura 3, con una altitud media de vuelo de 45.6 metros y una resolución de las imágenes de 1.7 cm/pix y 0.157 km² de superficie cubierta.

En el siguiente paso se realizó una selección de algunas imágenes, a las cuales se les aplicó el filtro de Gabor para analizar el error de segmentación. Se realizó por dos regiones

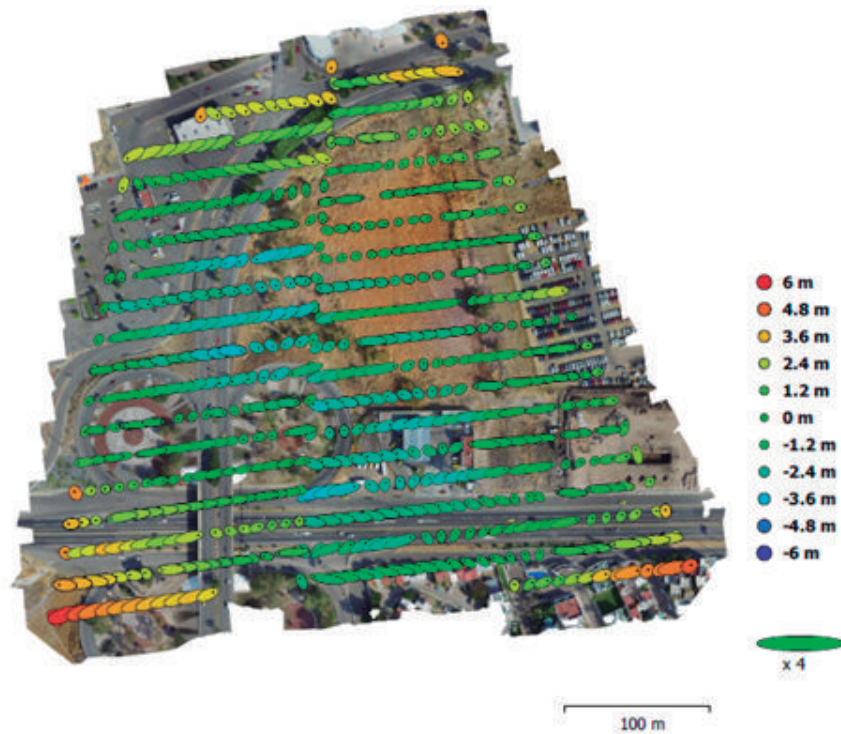


Figura 3. Posicionamiento de las cámaras y estimación de errores. El color representa el error en Z, y la forma y tamaño de la elipse indican el error en XY.

para identificar dentro de la imagen las áreas pavimentadas y todo lo que no es pavimento. Las imágenes segmentadas comparadas con las originales se presentan en las Figuras 4, 5, 6, 7 y 8. Cabe mencionar que la aplicación del filtro por medio del código en MATLAB se lleva a cabo para cada imagen, debido a que es un procesamiento largo que toma tiempo y depende también del tamaño de la imagen, por lo cual como primer paso se hace una reducción del 25% del tamaño original, teniendo imágenes con menor número de píxeles que facilitan el proceso.

Después del proceso en MATLAB se realizó una segmentación manual para hacer una comparación numérica entre la aplicación del filtro de Gabor, considerando el área total de pavimento y lo que se logra segmentar con el filtro para tener como resultado el porcentaje de error del proceso de segmentación. Los resultados de esta comparación se presentan en la Tabla 1.

En la Figura 4 se puede observar que se realiza mejor la segmentación debido a que se encuentran edificios y pavimento, y las textu-

ras de éstos son diferentes. Ambos se encuentran en dos regiones diferentes y es por esto que se tiene un error de 2.56%.

La Figura 6 muestra cómo casi toda el área de pavimento queda segmentada por medio del filtro, sin embargo, el error con respecto a la segmentación manual es de 4.99%, similar a este caso es la figura 5, en la cual no se logra segmentar parte de lo que no es pavimento debido a la similitud entre la textura del pavimento y la del acotamiento. Es ahí donde se presentan mayores errores ya que seguramente se considera dentro de la región de textura de pavimento cuando realmente no lo está, es por esto que el error de segmentación en esta imagen es el mayor con 5.16%. La Figura 7 es la imagen con menor error obtenido, debido a que los objetos presentados en la imagen son pavimento, vehículos y vegetación, los cuales tienen texturas muy distintas. En esta imagen se tiene un 0.72% de error de segmentación. En la Imagen 8, además del pavimento, se observan edificios y vegetación, por lo cual el error presentado entre la técnica manual y la aplicación del filtro es de 2.36%.



Figura 4. Imagen 1 a) Imagen original b) Imagen segmentada

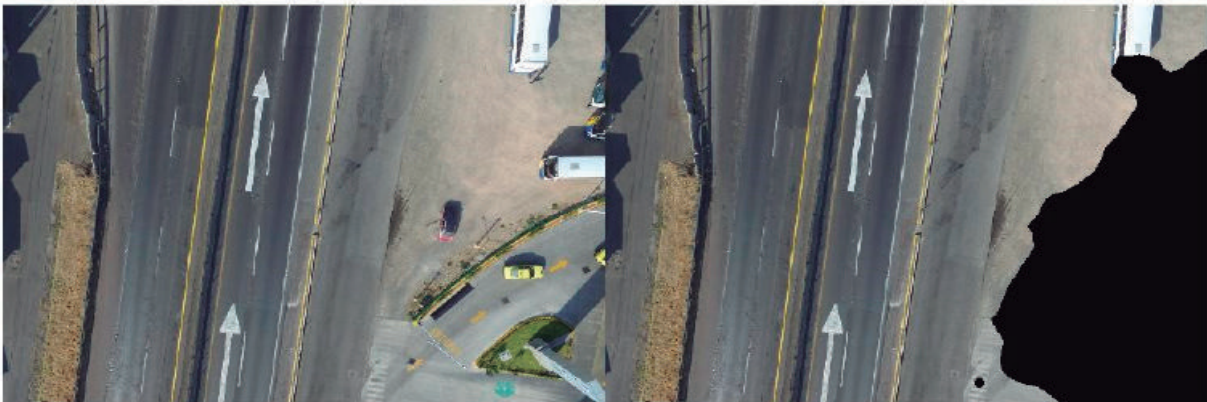


Figura 5. Imagen 2 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 6. Imagen 3 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 7. Imagen 4 a) Imagen original b) Imagen segmentada



Figura 8. Imagen 5 a) Imagen original b) Imagen segmentada

Tabla 1. Resultados de segmentación pavimento filtro de Gabor

	Área total (m)	Área pavimento medido manualmente (m)	Área segmentada pavimento (m)	Error (%)
Imagen 1	3799.345	2514.331	2611.407	2.56%
Imagen 2	4762.275	3817.862	4063.367	5.16%
Imagen 3	2888.152	1864.95	1720.898	4.99%
Imagen 4	2888.152	2,135.44	2114.508	0.72%
Imagen 5	4989.22	3609.145	3491.158	2.36%
			Promedio de error	3.16%



CONCLUSIONES

En este artículo se describe y analiza otra aplicación útil de los sistemas aéreos no tripulados. La adquisición de información a través de estos equipos demuestra tener alta resolución y ofrece otras ventajas como la facilidad de adquirir imágenes aéreas en menor tiempo y de manera segura. Es necesario mencionar la importancia de la implementación de estos sistemas debido a que ofrecen información georreferenciada y con una buena precisión geográfica, conjuntamente, son equipos cada vez más comunes y, por tanto, se pueden encontrar de manera económica.

El pavimento puede ser detectado con la aplicación del filtro de Gabor en las imágenes aéreas de manera exitosa, considerando que el error obtenido en las imágenes de prueba es menor del 5%, así mismo este tipo de análisis se puede realizar para otros estudios, ya que utilizar este filtro no es tan común para los procesos de segmentación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por su apoyo durante toda esta investigación, así como al laboratorio de mecánica de suelos y resistencia de materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro por la proporción del equipo UAV para realizar este estudio.

REFERENCIAS

[1] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial system for photogrammetry and remote sensing: A review," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp. 79-97, 2014.

[2] I. Cruz, F. Oloumi, R. Rangayyan, J.C. Aviña and A.A. Hernández, "Automatic segmentation of coronary arteries using Gabor filters and thresholding based on multiobjec-

tive optimization," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 25, pp. 76-85, 2016.

[3] C. Eschmann, C.M. Kuo, C.H. Kuo and C. Boller, "Unmanned Aircraft Systems for Remote Building Inspection and Monitoring," *6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, pp. 1-8, 2012.

[4] J. Gonçalves and R. Henriques, "UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 104, pp. 101-111, 2015.

[5] R. C. Gonzalez, R. E. Woods and S. L. Eddins, *Digital Image Processing Using MATLAB*. Estados Unidos: Editorial Gatesmark Publishing, 2009.

[6] A. Lucieer, S. M. Jong and D. Turner, "Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography," *Progress in Physical Geography*, vol. 38, no. 1, pp. 97-116, 2014.

[7] F. Nex, and F. Remondino, "UAV for 3D mapping applications: a review," *Applied Geomatics*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2013.

[8] U. Niethammer, M. James, S. Rothmund, J. Travelletti, and M. Joswig, "UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results," *Engineering Geology*, vol. 128, pp. 2-11, 2011.

[9] V. Olaya, *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2014.

[10] N. S. Palomino and U. C. Román, "Técnicas de Segmentación en Procesamiento digital de Imágenes," *Revista de Ingeniería de sistemas e informática*, vol. 6, no. 2, pp. 9-16, 2009.

[11] F. C. Pereira and C. E. Pereira, "Embedded Image Processing Systems for Automatic Recognition of Cracks using UAVs," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no.10, pp. 16-21, 2015.

[12] H. Ping Hu, W. Bin Wu and Q. Lin Tan, "Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Geological Disaster Reconnaissance Along Transportation Lines: A Case Study," *Applied Mechanics and Materials*, pp. 2376-2379, 2012.

[13] A. Samad, N. Kamaruizaman, , M.H. Asyraf, T.M. Aslamiah, and K.H. Afendy, "The Potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Civilian and Mapping Application", 3rd International Conference on System Engineering and Technology, pp. 19-20, 2013.

[14] S. Siebert and J. Teizer, "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system," Automation in Construction, vol.41, pp. 1-14, 2014.

[15] V. Tadic, M. Popovic and P. Odry, "Fuzzified Gabor filter for license plate detection", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 48, pp. 40-58, 2016.

[16] D. Turner, A. Lucieer and S. M. Jong, "Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," Remote sensing, vol. 7, pp. 1736-1757, 2015.

[17] A. Younesi and M. A. Chehel, "Gabor Filter and Texture based Features for Palm-print Recognition," International Conference on Computational Science, vol. 108, pp. 2488-2495, 2017.