

Automatización de detección de crecimiento de estructuras coralinas

Sergio Daniel Hernández Charpak, José Francisco Molano Pulido

Resumen—El crecimiento del área del coral está influenciado por el nivel de acidez del mar. Se tomaron en laboratorio varias muestras del coral. Se exponen estas muestras a varios niveles de acidez. Medir el área del coral a partir de fotografías ha sido un reto en este tema. Este reto ha sido examinado en fotografías en campo más no en fotografías en laboratorio, donde el montaje puede facilitar enormemente el análisis de las imágenes. Nosotros en este trabajo automatizamos la segmentación de imágenes de coral tomadas bajo un montaje definido en laboratorio. Obtuvimos resultados satisfactorios y prometedores. Finalmente, discutimos varios factores pueden influenciar nuestros resultados.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los fenómenos que más preocupan a la comunidad científica en relación a los ecosistemas marinos corresponde a la acidificación del océano. Este fenómeno, ocasionado por un incremento de las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico, es una amenaza preocupante para los sistemas coralinos. Esto se debe a que la acidificación del océano afecta directamente al proceso acreción de carbonato, el cual corresponde al mecanismo de crecimiento de dichos organismos [1]. Por este motivo, el análisis del crecimiento en estructuras coralinas resulta de gran importancia en el campo de la biología marina. Hoy en día, éste corresponde a uno de los principales métodos para medir el impacto de la acidificación y del incremento de los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera.

Actualmente, el estudio del crecimiento de estos organismos se ve fundamentado en el análisis de imágenes ópticas, que son adquiridas tanto en el hábitat natural como en entornos de laboratorio. En ambos casos, el objetivo principal de dichas tomas corresponde a realizar una medida del crecimiento de los corales sin recurrir a métodos invasivos. Finalmente, se efectúa el análisis de las imágenes obtenidas al estimar parámetros como el área o la longitud de los organismos mediante diversos métodos. En particular, es posible observar en la literatura que varios estudios hacen uso de métodos computacionales con la finalidad de automatizar el proceso de definición de parámetros, esto resulta particularmente provechoso teniendo en cuenta que este tipo de análisis requiere del procesamiento de un número considerable de imágenes. Sin embargo, en muchos casos, los investigadores se ven obligados a emplear métodos manuales, principalmente porque no disponen de herramientas especializadas para obtener los parámetros de interés en cada caso particular.

En particular, se tiene que el grupo de investigación Biomar de la Universidad de los Andes no dispone de herramientas especializadas para el análisis de imágenes de corales, por este motivo dicho análisis es realizado de forma manual. El objetivo del presente trabajo consistió en dar soporte a este grupo desarrollando un producto de software para determinar los parámetros de interés en el caso específico de muestras de laboratorio. El método desarrollado permite la obtención del área de los corales a través de una serie de imágenes ingresada por parámetro. El algoritmo implementado hace uso de técnicas ligeras de procesamiento para obtener las respectivas medidas y calcular la diferencia entre los componentes de la secuencia, para efectos prácticos, esto corresponde al crecimiento del coral en cuestión. El producto de software se presenta como una propuesta diferenciadora a alternativas similares debido a su carácter de código abierto. Éste puede ser modificado por medio de procesos relativamente sencillos para acoplarse a requerimientos del mismo tipo, evitando también que los grupos de investigación interesados incurran en el pago de licencias para productos comerciales.

El presente documento realiza una breve exposición de los métodos observados en la literatura para cumplir con el mismo objetivo y con objetivos similares, posteriormente, se hace una breve presentación del método implementado. Luego, se presentan los resultados obtenidos al emplear el producto de software en imágenes de prueba con su respectiva validación y finalmente se exponen las conclusiones relacionadas con la solución propuesta y con el proceso que se llevó a cabo para la obtención de la misma.

II. ESTADO DEL ARTE

En el campo de la biología marina, la evaluación de las principales características de los organismos coralinos ha sido soportada por el análisis de imágenes. Mendes [2] hace énfasis en que este método corresponde a una alternativa no invasiva, factor que resulta importante para la conservación del medio ambiente evitando la perturbación de los hábitats. Adicionalmente resalta el hecho de que, particularmente en las últimas décadas, el análisis de imágenes para el estudio de los organismos marinos se ha apoyado fundamentalmente en las técnicas computacionales. El uso de estas herramientas permite manejar grandes volúmenes de información y obtener resultados más precisos en aplicaciones que antes eran realizadas mediante procesos manuales.

El trabajo realizado en la presente década, en materia de métodos computacionales para el estudio de corales, se ha centrado principalmente en el desarrollo de técnicas de procesamiento para imágenes adquiridas *in situ*, es decir que

han sido obtenidas directamente en el hábitat de los organismos a analizar. Es por este motivo que las investigaciones realizadas en este período se enfocan en los retos que supone la toma de imágenes en entornos no controlados. De esta manera es posible observar propuestas centradas en tareas como la corrección de fotografías debido a la inclinación de los dispositivos de captura o a pendientes en el suelo marino [3], la identificación y caracterización de objetos en videos obtenidos mediante exploración robótica autónoma [4] y la segmentación en imágenes con estructuras pequeñas sin bordes ni formas definidas [5]. Si bien los distintos enfoques expuestos cumplen con el objetivo de apoyar procesos para determinar las características principales de los organismos coralinos, éstos no son aplicables a las condiciones de laboratorio propias del presente proyecto.

Un enfoque más aproximado a la detección de crecimiento de corales en condiciones de laboratorio, dada la geometría característica de las estructuras desarrolladas en este caso, corresponde a las técnicas de segmentación de estructuras tubulares. Este también corresponde a un campo ampliamente estudiado en la disciplina del procesamiento de imágenes debido a su extenso margen de aplicación. En particular, se han identificado tres categorías principales en las que se pueden clasificar los métodos de segmentación de estructuras tubulares: métodos manuales asistidos, métodos semi-automáticos y métodos automáticos.

II-A. Métodos manuales asistidos

Gran parte de los trabajos en el campo de la segmentación de imágenes biológicas involucra una interacción del experto con un software especializado. Describimos los métodos manuales más sofisticados que *dibujar* el contorno de un objeto sobre una imagen, alternativa que aún es presentada como viable [6] cuando las imágenes son de alta complejidad.

Existen numerosos métodos de segmentación para asistir interactivamente al usuario. Nombramos uno de ellos, el método de estrellas geodésicas convexas, propuesto por Gulshan et al., [7], ya que es usado en el campo relevante a este trabajo [8] y brinda buenos resultados.

La distribución Fiji de ImageJ [9] es actualmente el software estado del arte en este campo y lleva más de 25 años [10] siendo utilizado en este a través de sus distintas evoluciones. Sin embargo la interacción consume tiempo, dependiendo del problema. En el trabajo de Stokes et al [11] de clasificación de especies de corales en imágenes *in situ*, el análisis de clasificación manual toma entre 15-30 min dependiendo de la complejidad de la imagen. Trabajando con grandes conjuntos de datos el tiempo (y costo) del experto se vuelven inviables.

Para imágenes complejas evitar la interacción de un experto es difícil. Sin embargo, para imágenes simples evitar dicha interacción para poder analizar grandes cantidades de imágenes es deseable y en este caso, es la prioridad en el marco de este proyecto.

II-B. Métodos semi-automáticos

Automatizar los métodos de análisis de imágenes hace parte de los retos en este campo. Se han obtenido resultados relevantes a través de métodos semi-asistidos o semi-automáticos.

Treibitz et al. [8], basándose en el método de Gulshan et al. [7], desarrollan un método semi-asistido para imágenes *in situ* fluorescentes de campo amplio de corales. El usuario interactiva indica brevemente el ruido y una región de objeto. El algoritmo segmenta los objetos dados estos datos. El tratamiento que enseguida se le hace a los objetos es automatizado (no-interactivo). Así, logran mostrar una correlación entre los espectros resultantes de este tratamiento y las medidas de espectrómetro de los mismos corales.

De la misma manera, Neal et al. [6], con el objetivo de hacer medición de las varianzas de estimaciones de campo en colonias de corales, utiliza una segmentación de imágenes *in situ* interactiva en la que se indican ruido y objetos antes de que el software identifique los contornos. El usuario tiene la posibilidad de corregir dichos contornos. El análisis que luego hace el software es independiente y efectivo.

II-C. Métodos automáticos

Esta categoría corresponde al conjunto de métodos más relevante para el desarrollo del presente proyecto en la medida en que uno de los requerimientos más importantes del mismo corresponde a la caracterización sistemática, en términos de tamaño, de los organismos coralinos sin intervención alguna del usuario. En particular, estas técnicas hacen uso de algoritmos basados en niveles de intensidad, colores y detección de formas con la finalidad de identificar objetos de interés.

En primer lugar, se destaca el método propuesto por Tripathi et. al. [12] para la identificación de autopistas en imágenes aéreas, el cual consta de dos etapas principales: segmentación gruesa y refinamiento. La primera etapa hace uso de los niveles de intensidad y la geometría presente en la imagen para realizar una selección preliminar de un conjunto de píxeles de interés. Posteriormente, se realiza el refinamiento respectivo para seleccionar los píxeles finales por medio de un análisis de croma y formas. Este algoritmo resulta interesante para la identificación de estructuras tubulares debido a la aplicación de una etapa previa de segmentación general, esto permite que su respectiva ejecución sea más eficiente en relación a otras técnicas.

Asimismo, se destaca el uso de algoritmos basados en la curvatura. Turetken et. al. [13] demostraron la efectividad de emplear conceptos asociados al flujo en estructuras tubulares para la segmentación de objetos. En particular han empleado el flujo óptimo orientado (OOF), el flujo orientado multi-dimensional (MDOF) y el flujo orientado antisimétrico (OFA) para la identificación de estructuras de interés, principalmente vasos sanguíneos en imágenes médicas. Estos métodos resultan particularmente interesantes debido a que son poco susceptibles a errores de segmentación debido a estructuras adyacentes.

Finalmente, se destaca el caso de la segmentación basada en la identificación de figuras geométricas. Para ilustrar este punto, se puede tomar como referencia la investigación desarrollada por De Leener et. al. [14] quienes propusieron un método para la identificación de vértebras en la espina dorsal, una estructura tubular, basándose en la detección de elipses y tomando provecho de las características de simetría de la anatomía humana. Este método se destaca entre los demás

debido a que permite, además de la segmentación de la espina dorsal, el etiquetamiento sobre las vértebras que componen dicha estructura.

Estos métodos no resultan muy apropiados para el caso particular debido a que este puede ser solventado mediante niveles de gris.

III. MÉTODOS

■ Captura de las imágenes

Definir ciertos estándares en la captura de imágenes facilita su procesamiento. Debido a que el objetivo es de calcular áreas de corales, se propuso que la captura de imágenes tuviera las siguientes características:

1. un fondo que contraste con el coral,
2. en la parte superior de la imagen, un cuadrado negro de 1 cm^2 que servirá de escala.
3. el coral en su base completa en la parte inferior de la imagen.
4. una iluminación para que haya un contraste entre base y estructura coralina.

En el marco de este trabajo, se capturaron imágenes en diferentes calidades. Se comprobó que para que el método funcione correctamente no es necesaria una alta calidad de la imagen. El montaje fue realizado por un miembro del grupo Biommar. En la figura 1 se puede observar una de las imágenes capturadas.

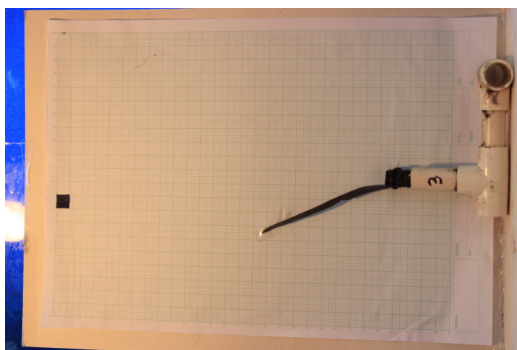


Figura 1. Un ejemplo del nuevo montaje de captura de imágenes

■ Python y Scikit-image

Python es uno de los lenguajes de alto nivel en el contexto actual cuyo uso es generalizado en la comunidad científica. Como lenguaje facilita la integración con librerías abiertas y desarrolladas por expertos. En el marco de este trabajo se hizo uso de las librerías científicas de Python tales como Numpy, Matplotlib, PyLab y scikit-image.

La librería en Python scikit-image [15] es una librería reciente, mantenida, completa, para el análisis de imágenes en Python. Brinda un número extensivo de funciones y métodos para ello y su curva de aprendizaje es menor.

■ Umbralización

El primer tratamiento que se decidió hacerle a las imágenes fue pasarlas a niveles de grises para enseguida umbralizarlas

para obtener imágenes binarias. Las imágenes binarias son mucho más simples de tratar que las imágenes a color RGB o a escala de grises. En la figura 2 se puede observar el histograma de la imagen en la figura 1. Es claro como este histograma es bimodal, es decir que su histograma se puede ver como la suma de dos funciones gaussianas. Esto es una consecuencia natural de la captura de las imágenes al tener en contraste el coral y el cuadrado de 1 cm^2 con respecto al resto de la imagen.

La umbralización Otsu es un método que está hecho para histogramas bimodales. El método busca el valor de gris que separe los dos modos que minimice la varianza individual de cada uno de estos. Para optimizar el resultado y evitar discrepancias debidas a la iluminación en la toma de la imagen, se aplica esta umbralización de manera independiente a la sección superior de la imagen y a la sección restante de la imagen. En las figuras 3 y 4 se pueden observar los resultados con los cuales se forma la imagen umbralizada, figura 5, que será enseguida procesada.

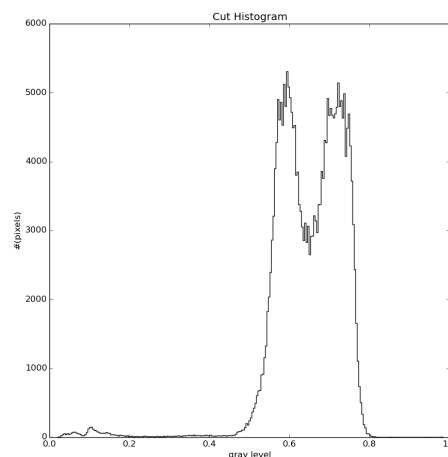


Figura 2. Un ejemplo del histograma de la imagen en escala de grises

■ Componentes conectados

Una vez obtenida la imagen umbralizada de manera correcta, el siguiente paso trata de eliminar los objetos que no son de interés, es decir en eliminar los objetos que no son ni el coral, ni el cuadrado de escala.

Para ello realizamos un análisis de reconocimiento de regiones por conectividad. Este análisis se basa en el concepto de conectividad. Existen varias definiciones de conectividad. En la figura 6 se expone el concepto de la 4-conectividad. Están conectados a C los elementos 1 y no los elementos 0. C tiene 4 vecinos que están conectados. La 8-conectividad es intuitiva. Los elementos 0 en diagonal son ahora considerados como conectados a C igualmente. C tiene entonces 8 vecinos.

Se busca entonces en la imagen los diferentes componentes conectados y a cada uno se le asigna un nivel de gris distinto para diferenciarlos los unos de los otros. Este análisis se

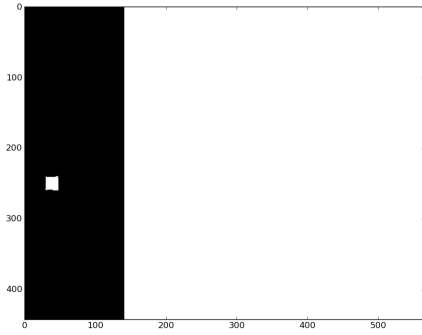


Figura 3. Umbralización Otsu sobre la sección superior de la imagen

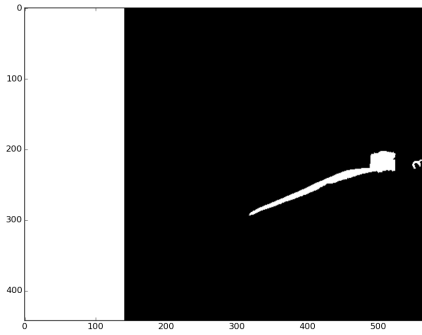


Figura 4. Umbralización Otsu sobre la sección inferior de la imagen

realiza de manera independiente en la sección superior de la imagen (cuadrado) y en la parte inferior (coral). Tanto el cuadrado como el coral son los componentes de área más grande en sus secciones independientes. Se puede entonces eliminar respectivamente en la sección superior los componentes de área menor al área del cuadrado y eliminar en la parte inferior los componentes de área menor al área del coral. Ya teniendo el componente del coral y del cuadrado a mano independientemente se realiza un proceso de dilatación y erosión para rellenar huecos pequeños que tengan estos dos objetos sin dañar su forma total.

■ Proceso de desarrollo

Con la finalidad de establecer un mecanismo ágil de desarrollo de software se hizo uso de una serie de herramientas para facilitar dicho proceso. En primer lugar, se empleó un sistema

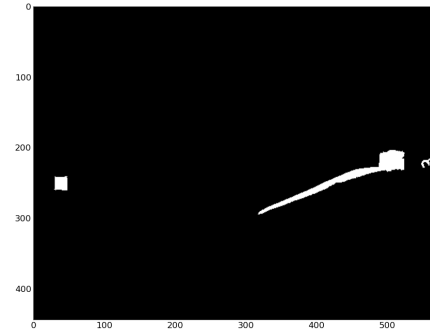


Figura 5. Imagen Umbralizada

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & C & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 6. Ilustración del concepto de 4-conectividad

de control de versiones en línea con el propósito de implementar un sistema de administración del código desarrollado. Adicionalmente, se utilizó un repositorio público (GitHub) con la finalidad de que la comunidad interesada pueda consultar los archivos fuentes del producto y realizar modificaciones, adiciones y consultas. El repositorio mencionado puede ser consultado en el siguiente vínculo: https://github.com/serchapak/Image_Analisis/tree/master/Proyecto. Adicionalmente, se hizo uso de dos Notebooks de Python. Esta herramienta permite realizar un proceso de desarrollo más interactivo en el cual se puede combinar la ejecución de código con elementos de gráficos. En particular, gracias al uso de Notebooks, fue posible realizar ejecuciones parciales del código implementado y observar resultados inmediatos en gráficas dispuestas en secciones intermedias. De esta manera se facilitó el proceso de depuración e identificación de errores.

IV. RESULTADOS

Al finalizar el proceso se obtienen, de un lado, las imágenes con únicamente el cuadrado de escala y el coral segmentado y por otro lado, dos archivos de texto plano. Uno de los archivos contiene el área del coral, en cm^2 , y otro archivo contiene los datos de los pasos intermedios realizados en el proceso. En las figura 7 y 8 se pueden observar ejemplos de estas imágenes. Únicamente contienen el cuadrado de escala y el coral umbralizado, siempre se guardan en el caso se desea hacer un uso posterior de esta información.

El otro resultado que obtenemos del proceso es el área en cm^2 del coral. Para el análisis de una carpeta completa se

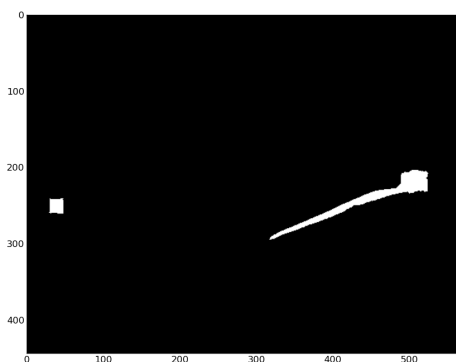


Figura 7. Ejemplo de imagen al finalizar el proceso

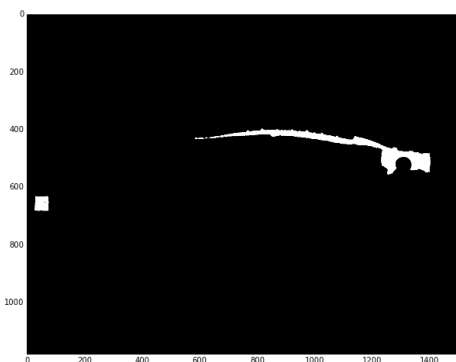


Figura 8. Ejemplo de imagen al finalizar el proceso

obtiene un archivo de texto con dos columnas, el nombre de la imagen, y su respectiva área. Un ejemplo de esta tabla se puede observar en la tabla I para una carpeta con 5 imágenes JPG.

El hecho que las áreas sean enteras en la tabla I es en parte debido al número discreto de píxeles de las regiones encontradas. Las áreas calculadas no necesariamente siempre serán números enteros.

Con asesoría del grupo Biommar, se tuvo acceso a datos reales de estas áreas. Sin embargo, debido a limitaciones de uso del software actual Fiji con estas imágenes en particular, se

Nombre Imagen	Área [cm^2]
Coral6_S3	7.0
Coral_3_S3	7.0
Coral4_S3	8.0
Coral4_2_S3	9.0
IMG_6780	10.0

Cuadro I. EJEMPLOS DE ÁREAS CALCULADAS AL ANALIZAR UNA CARPETA.

decidió que no eran suficiente para validar nuestros resultados. Sin embargo se realizó el proceso y se encontró que nuestros resultados tienen una discrepancia debida a la base oscura en donde se encuentra atado el coral. Al discutirlos con los expertos de Biommar, se decidió que tener el área de dicha base era de gran interés también. A futuro se espera tener datos por parte del experto para comparar de una manera cuantitativa los resultados de este trabajo.

Para detectar crecimiento coralino, se recomienda almacenar en la misma carpeta las imágenes capturadas para un mismo coral en diferentes instantes. Así, se podrá observar al analizar una sola vez la carpeta, el crecimiento de área del coral.

V. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se logró implementar un producto de software para el análisis de imágenes de corales. En particular, se realiza la determinación del crecimiento de estos organismos a través de una serie de imágenes que son procesadas con técnicas especializadas. Específicamente, se propuso un método basado en operaciones de umbralización e identificación de componentes conexos para la identificación del área del coral y de una referencia para definir las mediciones en unidades reales. Adicionalmente, se realizan operaciones de procesamiento adicionales como la erosión y el truncamiento de las imágenes con el objetivo de reducir el ruido y, de esta manera, obtener mediciones más precisas. El software desarrollado también está dispuesto para realizar el cálculo directo del crecimiento o diferencia en área, facilitando así el proceso de estudio para el grupo de investigación Biommar.

Al realizar un análisis sobre los resultados obtenidos se puede concluir que se desarrolló un producto funcional que corresponde a los objetivos propuestos. En particular, permite calcular el crecimiento coralino tomando una serie de imágenes como parámetro de entrada. Al evaluar el desempeño del producto con casos de prueba se obtuvieron mediciones aceptables que efectivamente corresponden, aproximadamente, a los valores obtenidos mediante el proceso manual. Sin embargo, las pruebas también permitieron evidenciar las limitaciones del método propuesto. Principalmente, se resalta el hecho de que el algoritmo está supeditado directamente a los niveles de contraste en las fotografías tomadas. Esto conlleva a que el producto tenga un alto nivel de dependencia respecto a la toma de la fotografía en términos de iluminación y orientación. No obstante, también cabe resaltar que el método de desarrollo de software y la disposición del código fuente permiten realizar modificaciones con relativa facilidad,

de esta forma es posible ajustar los parámetros de operación.

Como posibles trabajos futuros sobre el producto desarrollado, se pueden incluir una serie de técnicas de procesamiento de imágenes para que el resultado no tenga un alto nivel de dependencia sobre la toma de las imágenes. En este caso, se podría pensar en incluir operaciones que consideren información adicional obtenida en la imagen, como datos estadísticos o características locales. Otro componente complementario que resultaría de gran utilidad para el grupo de investigación Biommar sería la determinación de la longitud del coral entendida como la medida del segmento central dispuesto entre los extremos del organismo

VI. AGRADECIMIENTOS

Presentamos nuestros más sinceros agradecimientos a los integrantes del grupo Biommar por su disposición y por proveernos de las imágenes de prueba requeridas para las pruebas del producto implementado. Particularmente agradecemos a Susana Simancas y Nancy Estefanía Ruiz Uribe por la disposición, colaboración y tiempo que brindaron a este trabajo a lo largo de todo el proyecto. También agradecemos a Marcela Hernández por su constante asesoría a lo largo del desarrollo del producto.

REFERENCIAS

- [1] O. Hoegh-Guldberg, P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, and K. Caldeira, "Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification," *Science*, vol. 318, no. 742, p. 1, 2007.
- [2] A. Mendes, M. Hoeberechts, and A. B. Albu, "Evolutionary computational methods for optimizing the classification of sea stars in underwater images," in *Applications and Computer Vision Workshops (WACVW), 2015 IEEE Winter*, Jan 2015, pp. 44–50.
- [3] M. R. Algodon, A. Hilomen, and M. Soriano, "Estimating coral reef slope or camera pitch from video," in *OCEANS 2015 - MTS/IEEE Washington*, Oct 2015, pp. 1–5.
- [4] A. Maldonado-Ramírez and L. A. Torres-Méndez, "Autonomous robotic exploration of coral reefs using a visual attention-driven strategy for detecting and tracking regions of interest," in *OCEANS 2015 - Genova*, May 2015, pp. 1–5.
- [5] O. Beijbom, P. J. Edmunds, D. I. Kline, B. G. Mitchell, and D. Kriegman, "Automated annotation of coral reef survey images," in *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*, June 2012, pp. 1170–1177.
- [6] B. P. Neal, T.-H. Lin, R. N. Winter, T. Treibitz, O. Beijbom, D. Kriegman, D. I. Kline, and B. Greg Mitchell, "Methods and measurement variance for field estimations of coral colony planar area using underwater photographs and semi-automated image segmentation," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 187, no. 8, Aug. 2015. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-015-4690-4>
- [7] V. Gulshan, C. Rother, A. Criminisi, A. Blake, and A. Zisserman, "Geodesic star convexity for interactive image segmentation." *IEEE*, Jun. 2010, pp. 3129–3136. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5540073>
- [8] T. Treibitz, B. P. Neal, D. I. Kline, O. Beijbom, P. L. D. Roberts, B. G. Mitchell, and D. Kriegman, "Wide Field-of-View Fluorescence Imaging of Coral Reefs," *Scientific Reports*, vol. 5, p. 7694, Jan. 2015. [Online]. Available: <http://www.nature.com/articles/srep07694>
- [9] J. Schindelin, I. Arganda-Carreras, E. Frise, V. Kaynig, M. Longair, T. Pietzsch, S. Preibisch, C. Rueden, S. Saalfeld, B. Schmid, J.-Y. Tinevez, D. J. White, V. Hartenstein, K. Eliceiri, P. Tomancak, and A. Cardona, "Fiji: an open-source platform for biological-image analysis," *Nature Methods*, vol. 9, no. 7, pp. 676–682, Jun. 2012. [Online]. Available: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nmeth.2019>
- [10] C. A. Schneider, W. S. Rasband, and K. W. Eliceiri, "NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis," *Nature Methods*, vol. 9, no. 7, pp. 671–675, Jul. 2012.
- [11] M. D. Stokes and G. B. Deane, "Automated processing of coral reef benthic images: Coral reef benthic imaging," *Limnology and Oceanography: Methods*, vol. 7, no. 2, pp. 157–168, Feb. 2009. [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.4319/lom.2009.7.157>
- [12] A. K. Tripathi and S. Swarup, "Shape and color features based airport runway detection," in *Advance Computing Conference (IACC), 2013 IEEE 3rd International*, Feb 2013, pp. 836–841.
- [13] E. Türetken, C. Becker, P. Glowacki, F. Benmansour, and P. Fua, "Detecting irregular curvilinear structures in gray scale and color imagery using multi-directional oriented flux," in *2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, Dec 2013, pp. 1553–1560.
- [14] B. D. Leener, J. Cohen-Adad, and S. Kadoury, "Automatic segmentation of the spinal cord and spinal canal coupled with vertebral labeling," *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 34, no. 8, pp. 1705–1718, Aug 2015.
- [15] S. van der Walt, J. L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, J. D. Warner, N. Yager, E. Gouillart, T. Yu, and the scikit-image contributors, "scikit-image: image processing in Python," *PeerJ*, vol. 2, p. e453, 6 2014. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.453>