



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Implementación de algoritmos subóptimos para reordering en síntesis de circuitos
integrados para Synopsys

PROPUESTA DE TEMA DE MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN COMPUTACIÓN

Diego Alberto Ruiz Ramirez

PROFESOR GUÍA:
Gonzalo Navarro

SANTIAGO DE CHILE
2023

1. Introducción

Synopsys es una empresa estadounidense líder en el mercado de soluciones de software y hardware para el diseño de circuitos integrados, sistemas electrónicos y software. La empresa ofrece una amplia gama de productos y servicios para ayudar a los ingenieros de diseño y de verificación de circuitos integrados a mejorar la calidad, el rendimiento y la seguridad de sus productos, así como a reducir los costos y el tiempo de desarrollo.

En el contexto particular del equipo DFT (Design for Testability), Scan Insertion es una técnica que se utiliza para mejorar la capacidad de prueba de un diseño de circuito integrado. Esta técnica implica la inserción de elementos de escaneo en el diseño, “scan cells”, que permiten la carga de patrones de prueba y la captura de resultados de prueba [1].

El proceso de Reordering de Scan Insertion es una técnica utilizada para optimizar la eficiencia de la inserción de escaneo en el diseño. Esta técnica implica reorganizar la conectividad entre scan cells para mejorar la eficiencia de la inserción [6].

El problema de Reordering de Scan Insertion corresponde a una instancia particular del conocido problema NP-hard “Travelling Salesman Problem” (TSP) geométrico, a través de cual determina el mejor orden en que se deben reconectar las scan cells del diseño. TSP es un problema matemático bien conocido que implica construir el camino hamiltoniano de menor costo en un grafo.

En TSP geométrico, las ciudades ubicadas en un espacio n-dimencional real representan los nodos y las distancias entre las ciudades determinadas por los caminos que las unen definen el costo. Esta técnica se puede aplicar al reordering de scan cells en el diseño para determinar el orden más eficiente de conexión y minimizar la longitud de cableado de una scan chain.

Encontrar la solución exacta del TSP resulta infactible debido a la complejidad factorial de la solución óptima, por lo cual se recurre a varios algoritmos heurísticos aproximados que pueden proporcionar soluciones eficientes y cercanas a la óptima.

En Synopsys, se han implementado dos heurísticas para resolver el problema de reordenamiento en el contexto del problema del TSP. Estas heurísticas son la heurística constructiva del algoritmo de Nearest Neighbor y la heurística de optimización iterativa 2-opt.

Las heurísticas constructivas inician desde un punto arbitrario y van construyendo una solución iterativamente, añadiendo el punto más cercano disponible en cada paso, hasta formar finalmente un camino hamiltoniano cerrado. Si bien este camino hamiltoniano es una solución factible para el problema del TSP, es posible que no sea la mejor solución posible [5].

Por otro lado, las heurísticas de optimización iterativa n-opt son una clase de heurísticas de búsqueda local que buscan mejorar una solución existente cambiando n arcos del circuito hamiltoniano. Este proceso se repite hasta que no se pueda mejorar más la solución [3].

En Synopsys, buscan mejorar la eficiencia de la heurística de optimización iterativa 2-opt mediante la implementación de una versión más eficiente. Una opción, por ejemplo, es la heurística 3-opt, que extiende la 2-opt al eliminar tres arcos del circuito hamiltoniano y reemplazarlos por tres nuevos arcos, permitiendo explorar un espacio de soluciones más grande y alcanzar una solución óptima más efectiva [5].

En Synopsys también están interesados en desarrollar una implementación eficiente de un algoritmo para reemplazar al algoritmo de Nearest Neighbor como método constructivo para resolver el problema del TSP. El algoritmo de Christofides, por ejemplo, es un algoritmo heurístico que encuentra una solución aproximada para el problema del TSP en tiempo polinómico, utilizando técnicas de teoría de grafos y programación lineal. A diferencia del algoritmo de Nearest Neighbor, el algoritmo de Christofides garantiza que la solución obtenida esté a un factor de 1.5 de la solución óptima en el peor de los casos [2] lo cual resulta deseable.

La implementación de nuevos algoritmos podría mejorar significativamente la calidad de las soluciones obtenidas y garantizar una solución más cercana a la óptima, pero también implica un mayor costo computacional [5] [2]. Por lo tanto, en Synopsys están interesados en encontrar un equilibrio entre la calidad de la solución y el tiempo de ejecución de los algoritmos utilizados.

2. Situación Actual

El equipo de DFT de Synopsys ya ha desarrollado un software en C++ para resolver TSP. Para representar las scan cells del problema, el software implementa un objeto “ciudad” con atributos que incluyen la posición de input y output de cada scan cell. Además, el equipo ha creado un programa generador de casos de prueba que utiliza una distribución uniforme en el espacio 2D para generar un conjunto de n ciudades, con n determinado como argumento de llamada del programa.

En cuanto a la implementación del algoritmo que soluciona el TSP, el equipo ha adoptado una perspectiva completamente abstracta, ignorando los aspectos electrónicos y tratando el problema como un TSP geométrico que utiliza la distancia Manhattan. En esta implementación, también en C++, no considera aspectos relevantes como el uso de voltaje, área o longitud máxima de conexión, abstrayéndolos. El algoritmo se compone de dos procedimientos para optimizar la cadena de escaneo: primero, se optimiza la cadena original mediante un proceso iterativo de 2-opt, y por otra parte primero se reconstruye la cadena utilizando el algoritmo Nearest Neighbor y luego optimiza iterativamente esta solución con 2-opt. Como conclusión, se comparan ambos resultados.

Se ha demostrado en diversos artículos comparativos que otros algoritmos de optimización iterativa y construcción de scan chains generan mejores soluciones subóptimas respecto a Nearest Neighbor y 2-opt [5] [2] y la optimización de las soluciones es deseable para Synopsys, lo cual motiva la implementación de estas nuevas heurísticas.

En términos académicos, los siguientes artículos sirven como referencia del contexto de este trabajo y guía para la realización del proyecto. El artículo [2] describe la implementación del algoritmo constructivo de Christofides, el cual sirve de guía la solución. El artículo [5] describe la implementación del algoritmo de optimización iterativa 3-opt, también utilizado en la solución. En general, estos papers conforman la base teórica sobre la cual se sustenta la realización del proyecto, asegurando con gran probabilidad que hay una solución con mejores garantías de optimalidad.

3. Objetivos

Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es implementar nuevas heurísticas que logren resultados subóptimos superiores a las heurísticas existentes. Es probable que estas nuevas heurísticas requieran un mayor costo computacional, sin embargo, se espera alcanzar un buen equilibrio entre la calidad de la solución y el tiempo de ejecución.

Objetivos Específicos

1. Implementar una heurística de optimización iterativa que genere mejores resultados de optimalidad respecto a 2-opt ya existente independiente de su costo computacional.
2. Desarrollar una versión optimizada de la heurística anterior en caso de ser necesario, obteniendo entonces una solución de similar calidad y menor costo computacional.
3. Comparar la optimalidad de la nueva heurística con 2-opt ya existente para chips reales de clientes e integrar al software de Synopsys en caso de tener un buen resultado.
4. Implementar una heurística constructiva que resuelva el problema de TSP con mejor optimalidad que Nearest Neighbor ya implementado.
5. Integrar la nueva heurística constructiva al software de Synopsys.
6. Integrar la nueva heurística constructiva junto a la nueva heurística de optimización iterativa en un único pipeline.
7. Comparar los resultados en tiempo y optimalidad entre la nueva heurística constructiva de optimización iterativa versus Nearest Neighbor y 2-opt ya existentes.

Evaluación

La longitud de scan chain es la métrica fundamental para evaluar la calidad de la solución de un diseño de chip. Esta métrica será evaluada tanto en casos de prueba generados por distribuciones aleatorias como en chips reales de clientes. Para el nuevo algoritmo de optimización iterativa sin optimizar, la optimalidad será evaluada comparando su solución con la de 2-opt, considerándose exitoso si logra obtener una solución más óptima que la de este último. Por otro lado, el nuevo algoritmo de optimización iterativa optimizado será evaluado en términos de optimalidad y tiempo. Se considerará exitoso si obtiene una solución más óptima que 2-opt y un costo computacional menor a $O(n^3)$.

El nuevo algoritmo constructivo será evaluado exclusivamente en términos de optimalidad en comparación con la solución ya implementada por Synopsys. El éxito se medirá en función de su capacidad para mejorar la optimalidad en comparación con el algoritmo Nearest Neighbor ya implementado. Por último, el algoritmo conjunto constructivo y optimizado iterativamente será evaluado en términos de optimalidad y tiempo de ejecución. El éxito se determinará por su capacidad para mejorar la optimalidad en comparación con el uso exclusivo del nuevo algoritmo de optimización iterativa, teniendo en cuenta también la percepción de los usuarios de Synopsys sobre el tiempo de ejecución.

4. Solución Propuesta

Para dar contexto, la entrada de datos consiste en una lista de objetos ciudad, implementados previamente por Synopsys para la resolución del problema TSP.

Para mejorar la optimización iterativa de 2-opt, se propone implementar una versión generalizada de 3-opt basada en el artículo [5]. Este paper garantiza que el algoritmo 3-opt obtiene resultados óptimos en el problema general de TSP, aunque con un mayor costo computacional.

El programa a desarrollar recibirá una lista de objetos ciudad conectadas y generará iterativamente un nuevo reordenamiento, finalmente calculando la longitud de la scan chain resultante. La ejecución iterativa ocurre hasta que la solución se estanque en torno a un subóptimo local o hasta que transcurra un tiempo definido por el usuario.

Con el fin de optimizar el costo computacional del nuevo algoritmo de optimización iterativa 3-opt a un costo subcúbico, se utilizará como guía el algoritmo presentado en el paper [4]. Luego, se comparará la solución optimizada de 3-opt con la versión no optimizada, tanto en términos de tiempo como en el largo promedio del cable para un conjunto significativo de pruebas con chips de clientes reales.

Con el fin de determinar si efectivamente el resultado es el esperado, se realizará una serie de tests sobre distribuciones uniformes utilizando el software generador de casos de prueba de Synopsys. En base a variar el número de ciudades de conjunto se determinará empíricamente cuál es la complejidad de este algoritmo, determinando si cumple con ser subcúbico o no.

Si la versión optimizada de 3-opt no solo mejora el grado de optimalidad respecto a 2-opt sino que además se ejecuta en un tiempo adecuado y aceptable subóptimo, se integrará esta solución al software de Synopsys.

Respecto a la implementación del algoritmo constructivo, se opta por el algoritmo de Christofides en base al paper [2]. Esto dada la garantía de estar a 1,5 veces del óptimo, garantía la cual no es dada por Nearest Neighbor y sumado a que experimentalmente se demuestra que suele obtener mejores óptimos, aunque a cambio de una mayor complejidad computacional [2].

Se probará el correcto funcionamiento del algoritmo implementado utilizando el software de testing de Synopsys, contrastando sus soluciones con el algoritmo de Nearest Neighbor.

Una vez implementados tanto 3-opt como Christofides, se procederá a integrar ambos, generado para toda scan chain de input, un pipeline que primero genere un nuevo ordenamiento con Christofides y que luego pueda este ser optimizado iterativamente mediante 3-opt.

Finalmente, se probará el resultado de ambos caminos para las métricas de tiempo en función del tamaño de entrada y el grado de optimalidad según largo de scan chain promedio. Si se obtiene un buen tradeoff de tiempo y optimalidad para alguno de los casos Christofides con 3-opt o 3-opt solamente, se integrará al software de Synopsys como el solver por defecto del problema de optimización de reordenamiento. Luego, se recibirán apreciaciones de los clientes sobre los resultados obtenidos.

5. Plan de Trabajo (Preliminar)

1. Semanas 1-4 Explorar implementaciones de 3-opt y Christofides, junto a métodos de evaluación de algoritmos y aspectos particulares de aplicación de heurísticas de Traveling Salesman Problem al caso de optimización de reordering de scan chains. Fundamentar este paso en las referencias bibliograficas, con énfasis en [5] y [2].
2. Semana 3-5: Implementar el código el algoritmo 3-opt, evaluando su correcto funcionamiento mediante el software de testing de Synopsys e integrándolo a los flujos de operación de Synopsys.
3. Semanas 6-7 Implementación de una versión optimizada de 3-opt, reduciendo su complejidad a subcúbica.
4. Semanas 8-10 Implementar algoritmo de Christofides, integrándolo con la implementación subcúbica de 3-opt.
5. Semanas 11-13 Testeo de las soluciones.
6. Semanas 14-15 Escritura de la memoria.

Referencias

- [1] Abramovici, Miron, Melvin A Breuer, Arthur D Friedman *y cols.*: *Digital systems testing and testable design*, volumen 2. Computer science press New York, 1990.
- [2] Christofides, Nicos: *Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem*. Informe técnico, Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh Pa Management Sciences Research Group, 1976.
- [3] Croes, Georges A: *A method for solving traveling-salesman problems*. Operations research, 6(6):791–812, 1958.
- [4] Lancia, Giuseppe y Marcello Dalpasso: *Finding the Best 3-OPT Move in Subcubic Time*. Algorithms, 13(11):306, 2020.
- [5] Lin, S. y B. W. Kernighan: *An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem*. Operations Research, 21, no. 2:498–516, 1973.
- [6] Seo, Sungyoul, Keewon Cho, Young Woo Lee y Sungho Kang: *A statistic-based scan chain reordering for energy-quality scalable scan test*. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 8(3):391–403, 2018.