

## レーザ穴あけ機の加工計画

01405600 住友重機械工業株式会社 西村 卓也 NISHIMURA Takuya

### 1 はじめに

本稿では、レーザ穴あけ機による加工における、基板当りの加工時間を最小化するために、組合せ最適化手法を用いて加工を計画した事例を、紹介する。

### 2 レーザ穴あけ機による加工

図1に、レーザ穴あけ機の加工部分の機器構成および、レーザビームの進路を示す。

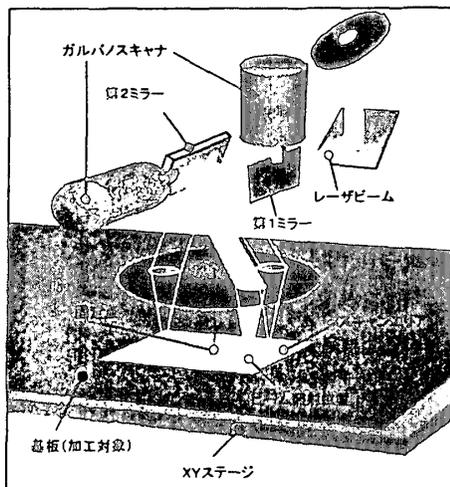


図1 レーザ穴あけ機による加工

レーザ穴あけ機は、水平移動が可能なXYステージに固定された基板上の各穴あけ(目標)位置に対して、レーザビームを順次照射して穴加工を実行する加工機である。

穴あけ位置に位置決めするための機器(以下、位置決め機器と記す)は、XYステージとガルバノ走査系の2種類である。XYステージは、基板自体の絶対位置を移動させる。2台のガルバノスキャナから構成されるガルバノ走査系は、各スキャナのミラーの角度を変えることにより、ビーム照射の絶対位置をX方向、Y方向に移動させる。このビーム照射絶対位置の移動範囲は、XY軸に平行な、固定点を中心とする正方形(以下、スキャンエリアと記す)に限定される。スキャンエリアの大きさは、基板の大きさに比べて小さい。

つまり、位置決め機器の特徴は以下のようである。XYステ

ージは重量物であるので、ガルバノ走査系と比較して低速である。一方、XYステージによる移動範囲は広いが、ガルバノ走査系による移動範囲はスキャンエリアに限定される。

これらの機器を用いて、次の2つのステップを繰り返すことにより、加工を実行する：

ステップ1)ガルバノ走査系を用いて、スキャンエリア内の穴あけ位置を順次加工する、すなわち、穴あけ位置への照射と次の穴あけ位置への移動を、繰り返す、

ステップ2)XYステージを用いて、次のスキャンエリアへ移る。

ここで、本事例のレーザ穴あけ機のXYステージは、XY軸に対し斜め方向の動作は避けたいものとする。また、軸方向への動作は、X軸方向の方がY軸方向より高速であるものとする。

### 3 問題の設定

XYステージには関わらないステップ1に対する加工計画と、ガルバノ走査系には関わらないステップ2に対する加工計画とを、切り離して考える。

ステップ1においては、各穴あけ位置を1度ずつ訪れるときの、穴あけ位置間の移動時間の合計を最小化したい。従って、ステップ1の問題は、まさに巡回セールスマン問題(以下、TSPと略す)として設定できる。ただしここでは、各穴あけ位置間の移動距離(枝長)として、予め計測済みのガルバノ走査系の位置決め時間を採用する。

ステップ2においては、基板上に散布する穴あけ位置がスキャンエリアの何れかによって包囲されるようにエリアを配置したとき、スキャンエリア間の移動時間の合計を最小化したい。また、既に述べたように、XYステージを主にX軸方向に限定して動作させられるように、スキャンエリアがX軸方向に並ぶように配置したい。

したがって、まず基板上のスキャンエリアの移動経路を、図2に示すようにX軸方向に並んだスキャンエリア(以下、ラインと記す)を順次訪れて、次いでY方向に1ライン分移動するステップを繰り返すように決定する。その上で、ステップ2の問題を、ライン数を最少化し、各ラインにおけるスキャンエリアの個数を最少化する問題として設定する。

ライン数の最少化と、各ラインにおけるスキャンエリア個数の最少化は、同一の問題である。すなわち、実数（本事例では穴あけ位置の Y 座標値または X 座標値）の有限集合を、最少個数の次のような部分集合に分割する問題（問題名を仮に Partition とする）である：

- 1) 各部分集合の要素の範囲が所定値以下かつ、
- 2) 2つの部分集合  $A, B$  について、 $A$  の任意の要素が  $B$  の任意の要素より小さければ（大きければ）、 $A$  の最大値は  $B$  の最小値より小さい（大きい）。

ここで所定値とは、本事例ではスキャンエリアのサイズである。

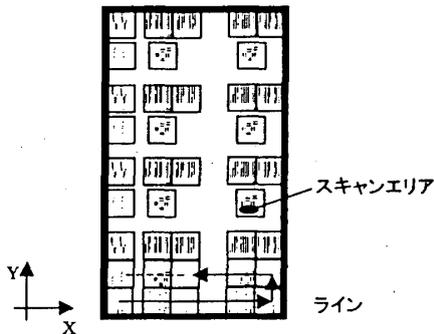


図2 スキャンエリアの配置例

#### 4 巡回セールスマン問題

本事例においては、小さくはないサイズの TSP をスキャンエリア回数（一例を挙げると、サイズ 1000 の TSP を 50 回）解く必要があるので、各回の TSP は極めて高速であることが望ましい。一方、厳密解を求める必要は無く、なるべく良い解で十分である。以上の理由から、局所探索法による解法を採択した。

文献[1][2]を参考にして、3-opt 法、リンカーニハン法、及び反復リンカーニハン法を実装した。解の精度及び計算時間は TSPLIB[3]の問題を用いて検証済みである。計算高速化のために、近傍探索や距離計算の方法にいくつかの工夫を加えている。

#### 5 スキャンエリアを配置する問題

既に挙げた問題 Partition は、最短路問題（以下 SPP と略す）に帰着させることができる。次のようなネットワークを考える：

- 1) 昇順ソート済みの  $n$  要素の集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ （各  $a_i$  は穴あけ位置の座標値を表す）の各要素は、ソート順通りに、 $n$  頂点からなるネットワークの頂点  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  に対応付けられている、
- 2) ネットワークの始点は頂点  $v_1$  である、

- 3)  $a_i + d \leq a_n$  を満たす頂点  $v_i$  は全て、ネットワークの終点の候補である（ $d$  はスキャンエリアのサイズを表す）、
- 4)  $a_j + d \leq a_k$ 、または、 $a_{j-1} + d \leq a_k$  かつ  $a_j + d > a_k$ 、のいずれかを満たす頂点  $v_j, v_k (j < k)$  が接続されている、
- 5) 枝のコストは全て 1（または同一の正值）である。

このようなネットワークの SPP を解いて、最短路上の頂点に対応する要素ごとにソートされた集合を区切り、各区間を 1 つの部分集合とすれば、最少個数の分割を得ることが出来る。SPP の解法であるので、最適解を求めることができ、かつ計算時間は十分に短い。

#### 6 実加工機への適用結果および実加工シミュレーション

以上の加工計画の効果を検証するため、実加工機を用いて加工時間を計測した結果は、紙面の都合上、発表時に報告する。

また、加工計画の内容、効果、計算時間、および、実加工の様子などを即座に確認できるようなソフトウェアを作成している。発表時に公開する。

#### 7 おわりに

本稿では、組合せ最適化手法をレーザー穴あけ機の加工計画に用いた事例を紹介した。実加工機を用いて加工時間を計測した結果、加工計画が有効であることが確認された。

#### 謝辞

本研究にあたって貴重なご指導、ご助言をいただいた京都大学大学院情報学研究所の茨木俊秀教授、柳浦睦憲講師、野々部宏司助手に心から感謝する。

#### 参考文献およびウェブサイト

- [1] D. Applegate, R. Bixby, V. Chvátal, W. Cook: "Finding tours in the TSP", Forschungsinstitut für Diskrete Mathematik Report No. 99885, Universität Bonn, available from the website <http://www.math.princeton.edu/TSP/papers/>.
- [2] D.S. Johnson and L.A. McGeoch: "The traveling salesman problem: a case study," in: E.H.L. Aarts and J.K. Lenstra, eds., *Local Search in Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons, pp.215-310, 1997.
- [3] <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>.