

プラント内での大型機器の搬送のための経路計画

榎本 敦子, 田畑 潤也, 今村 光孝, 長瀬 博

プラントのメンテナンスや原子炉の廃止措置では、大型の機器やパイプをプラント建屋内で安全かつ効率よく運ぶために搬送計画を行う。本稿では、プラント内の大型機器の搬送計画技術について、経路計画問題としての位置づけと技術的な特徴を紹介する。プラント内の大型機器の搬送計画は、クレーンで吊られた大型機器の姿勢と移動経路の多次元情報をプラント建屋という比較的広い空間で探索するため規模の大きい問題である。プラント内をクレーンで搬送するための空間の分割方法と経路計画の目的関数に関する技術を紹介する。

キーワード：経路計画, 最適化, クレーン吊り

1. はじめに

経路計画問題は、与えられた始点と終点とをつなぐ経路の中で目的関数を最小化する経路を探索する。経路の対象空間を離散化し、離散化した空間同士の隣接関係をネットワークグラフで表すことにより、ネットワークグラフ上での目的関数を最小化するパス探索問題に帰着される。Google Map やカーナビの経路探索がこの例である。地点をノードとして2地点間をつなぐ道路をエッジとしてネットワークグラフを形成する。カーナビであれば、自動車が通行可能な道路でネットワークグラフを構成する。

ここで、大きさをもった搬送物体を障害物のある3次元空間上で移動させる場合の経路計画を考える。この場合、搬送物と障害物の干渉を回避する経路計画が求められる。搬送物が姿勢を一定に保って並進するとき、姿勢を回転させながら方向転換するときの両方で、干渉を回避する位置と姿勢の軌跡を探索する必要がある。さらに、ロボットのような運動機構は、姿勢を変化する際に自分自身のアーム同士が干渉を起こす可能性もある。したがって、干渉回避を伴う経路探索問題は、グラフネットワーク上の経路探索問題に加えて、幾何学的な空間処理技術を必要とする。

プラント建屋内での大型機器の搬送経路計画は、大きさのある移動物体の経路探索問題である。大型機器を搬送台車に乗せるか、クレーンで吊る搬送形態がとられる。場合によって、大型機器は分解や裁断をされ

て容器に格納される。いずれの場合も容積のある移動物体を、狭隘なプラント建屋内で干渉なく通過できる経路を探すのが経路計画問題となる。特に問題となるのが、クレーンによる吊り作業の際の建物との干渉である。搬送物が長尺な場合、吊り上げと吊り下げの際の搬送物の姿勢変化により建屋と干渉し、搬送できないことが起こりうる。さらにクレーン吊り姿勢には、安全性の制約が課せられ、搬送物の姿勢に制約が課せられる。

本稿では、プラント建屋内での大型機器の搬送経路計画について、2節で経路探索問題の問題空間の大きさを、3節で経路探索アルゴリズムとしての特徴を述べる。4節では、計画した搬送経路上で必須となるクレーン吊りの物理シミュレーションについて述べる。

2. 経路探索の問題空間の大きさ

ネットワークグラフ検索では、各ノードが通過可能な地点を表し、二つの地点間に経路がある場合に、ネットワークグラフ上の該当する2ノード間をエッジでつなぐ。与えられた始点から終点への経路で、目的関数が最小となる最短経路を探索する手法として、Dijkstra法 [1] が著名である。Dijkstra法の計算量はノードの個数の2乗と比較的高速な計算方式である。最短経路の探索問題では、Dijkstra法を起点として、ノードの個数が大きな問題に対し、計算量を低減する方式が提案されてきた。

ここでは、最短経路の探索対象の規模について考える。経路探索の問題の規模は、最短経路を求める対象となる空間の次元と、その空間の大きさと要求される分解能により規定される。たとえば、道路地図上の最短経路を求める場合は、対象とする幾何学空間は平面であり平面上の位置を二つの要素で特定するため2次元である。プラント内の搬送経路を求める場合は、幾

えのもと あつこ
株式会社日立製作所研究開発グループ
〒244-0817 神奈川県横浜市戸塚区吉田町292
atsuko.enomoto.ha@hitachi.com
たはた じゅんや, いまむら みつたか, ながせ ひろし
日立GEニュークリア・エナジー株式会社原子力生産本部
〒317-0073 茨城県日立市幸町3-1-1

表 1 経路探索問題の規模

No.	Problem	Vertices n	Computation order ratio $O(n^2)$
1	San Francisco Bay Area map [2]	321,270	1.0
2	Plant building (3 dimension)	973,210	9.2
3	Full USA map [2]	23,947,347	5,556.2
4	Plant building (5 dimansion)	249,141,760	601,385.2
5	Robot (6 dimension)	2,176,782,336	45,908,136.3

何学上は 3 次元空間内の問題であるが、搬送物が大型で姿勢の制御も必要となれば、その大型機器の位置と姿勢を特定するには 6 次元とみなされる。空間の大きさは、探索の対象とする領域の大きさである。この領域をどの粒度でサンプリングするかは、問題が要求される分解能で異なってくる。道路地図の経路探索は、道路の分岐点でサンプリングすればよいかもしれないが、狭隘なプラント内で姿勢を変えながら移動する場合、数十センチメートルごとのサンプリングが必要な場合もある。サンプリング数がグラフのノード数と一致する。

以上のような観点で問題ごとのグラフのノード数を表 1 に示す。表 1 の No. 1 と No. 3 は、それぞれ San Francisco 湾岸地域の道路地図とアメリカ合衆国全体の道路地図を対象とした経路探索問題を示す。同じ表の No. 2 と No. 4 は同一のプラント建屋内の搬送物の経路問題であるが、No. 2 は搬送を姿勢一定として 3 次元の並進運動として、No. 4 は 3 次元並進運動に加えて、クレーン吊りによる 2 次元の回転運動を加えて 5 次元運動とした場合のノード数を示す。No. 5 は 6 軸ロボットの経路問題のノード数であり、対象空間の次元は 6 次元となる。

No. 1 の計算コストを 1 としたときの、それぞれの計算コストとの比を示した。プラント内の搬送計画は道路地図とロボットの中間の問題規模となる。

ちなみに、道路地図の探索の場合は、主要な経由点をランドマークとして、ランドマーク間の最短経路をあらかじめ求めておく。探索中の経路がランドマークを経由した場合、そのランドマークまでの距離より長い経路をとった場合は、その探索中の経路は明らかに最短経路とはならないので、その探索を放棄することにより、探索を高速化する [3]。

移動体と環境の干渉を回避した位置と姿勢の軌跡を探索する場合、経路探索の対象となる空間をセルに細分化し、その中で障害物のないセルをノードとし、障害物のない二つのセルが隣接する場合、それら二つのノードをエッジで結合することにより、経路探索のためのグラフネットワークを構成する。ロボットのように移動体

自身が自由度をもつ機構では、関節角度空間に対して、ロボットと環境との干渉の有無をグラフネットワーク化する。6 軸ロボットの各軸の関節角度空間を 10 度の分解能で量子化したノード数は $(360/10)^6 \approx 2.18 \times 10^9$ となり、厳密な最適化は天文学的な計算時間となると予測されるため、ランダムに空間を量子化することにより問題規模を低減させる準最適化探索が行われる [4]。

3. プラント内の大型機器の搬送経路探索アルゴリズム

プラント内の大型機器の搬送経路は、位置を決める 3 次元とクレーン吊りの姿勢を決める 2 次元（鉛直軸周りの回転と進行方向に直行した軸周りの回転）で 5 次元空間となる。問題規模は、道路地図より大きく、ロボットの問題規模より小さいが、実用的には問題規模を低減させる工夫が必要である。

ここで紹介する方式は、まずプラントの 3 次元空間上での位置を決定するために、プラントの 3 次元モデルを離散化してネットワークグラフを形成する。このネットワークグラフ上の探索において、搬送物の姿勢変換を容易にするような複数の観点からの探索の目的関数を構成することにより、型機器の経路を 3 次元空間の問題規模で求めるという [5] で示されている方式を紹介する。次に、求められた経路に沿ってダイナミクスシミュレーションにより大型機器の姿勢軌道を求める方法 [6] を紹介する。

まず、プラントの 3 次元空間の分割方法について説明する。次に、大型機器の搬送経路探索のための特徴的な複数のスコアを導入し経路探索をするための工夫について説明する。

3.1 ネットワークグラフ

3.1.1 空間の分割

障害物のない空間を探すためにまず、プラントの 3 次元空間モデルを細分化する。細分化された個々の空間はボクセルと呼ばれる。最も単純な分割は、3 次元空間を各基底軸に対して 2 等分することにより、元の空間を 8 分割することを、定めた最小容積まで一定回数繰り返す均一なボクセル分割である。

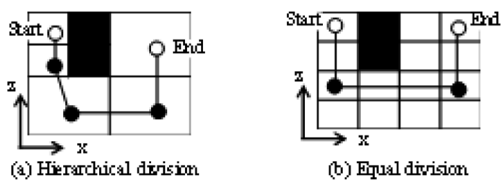


図 1 空間の分割方法

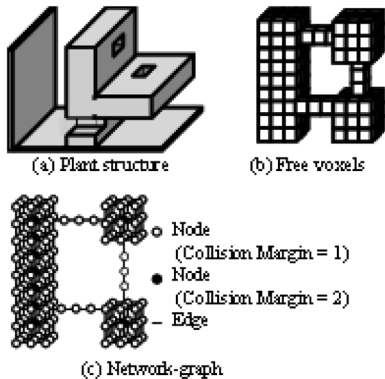


図 2 経路探索問題のネットワークグラフ

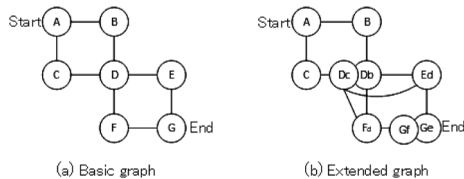


図 3 頂点の多重化

ここで、問題空間の大きさを低減させる方法として、障害物を含まないボクセルには分割を行わない方法がある。図 1 では模式的に問題空間を 2 次元で表した。2 次元なので平面を 4 等分に分割する。分割された個々のボクセルの中に、障害物がある場合にそのボクセルをさらに 4 分割するが、中に障害物のないボクセルについてはそれ以後の分割を行わない方法を示す。障害物のないボクセルが経路探索のためのネットワークグラフのノードに対応する。したがってこの方法では、ノード数の増加を抑制することにより計算効率を向上させる利点がある。

しかし、ボクセルの面積の不均一さが、経路の直線性を低下させる問題が生じる。図 1(a) の経路では移動体は 3 回の姿勢変更をする必要があるが、均一なボクセル分割を行った (b) では、移動体の視線変更は 2 回で済む。

大型機器はクレーンで吊った状態で移動するため、姿勢の変更は極力少ないことが望ましい。そこで、プ

ラント建屋は 3 次元空間であることから、8 分割の均一なボクセル分割を用いる。ここで議論した姿勢の変更回数は経路探索の評価指標として、次に取り上げる。

図 2 に、プラント内の 3 次元構造から経路探索のためのネットワークグラフの構築を模式的に表す。(a) は壁、床や設備などのプラント内の構造物である。均一な 8 分割を行った際に、これらの構造物を含むボクセルは (b) に示すように除外される。残ったボクセルがネットワークグラフのノードとなり、ボクセル同士が隣接するノードの間をエッジで結合する (c)。

3.1.2 ノードの多重化

クレーン搬送では、吊るされた大型機器の姿勢を変える操作は、安全と作業コストの両面から極力回避すべきである。その意味で、経路の曲がり回数を最小化することが肝要である。

Dijkstra 法では、始点ノードから終点ノードに向かう経路を探索する際に、経路上のノードの値を最小なスコアで上書きしたパスを記録するが、最小として採用された以外のパスの経過情報は保存されない。曲がり回数の数え上げには、一つ前に通過したノードが必要であるが、最小値となった一つの経路以外は保存されていないため、同じ曲がり回数のパスを見落とすことになる。図 3 の例では、A-B-D-F-G と A-C-D-E-G は曲がり回数は 2 回で同じスコアであるが、いずれか一つの経路しか得られないことになる。

その対策として、どのエッジから入り込んだかによってノードを多重化する。図 3 のノード D は、ノード C から入り込むエッジとノード B から入り込むエッジがあるので二つのノード D_C と D_B に多重化される。同様に、ノード F もノード F_D と F_G に多重化される。これにより、探索の途中のスコアの等しい経路を温存することが可能となる。ノードの多重化は複数のスコアの比較が必要なプラント内の搬送経路探索には効果的である。

3.2 経路探索

曲がり回数でノードを多重化したネットワークグラフ上で、曲がり回数と空間余裕と経路長の三つのスコアを段階的に評価する探索方法について説明する。

3.2.1 空間余裕

大型機器の搬送では、障害物と干渉しないように経路に空間的な余裕があることが重要である。図 2 のネットワークグラフでは、各ノードの属性に空間余裕度 (collision margin) をもたせている。ボクセル中心位置から障害物までの距離が大きいほど、空間余裕度が大きいとする。

任意のボクセル i の中心から、障害物までの最短距離を s_i とする。そのボクセルの中心に搬送物が位置したとき、 s_i が大きいほど、干渉するリスクが低くなる。つまり s_i は空間余裕を表す。 $1/s_i$ をそのボクセルのスコアと考えれば、 $1/s_i$ は小さいほど空間余裕が大きい。

Dijkstra 法を用いて、ボクセル v_1 から v_m までの m 個の点列から成る経路 $P_m = v_1, \dots, v_m$ を求めた場合、経路 P_m の空間余裕のスコアは、

$$\sum_{i=1}^m \frac{1}{s_{v_i}} \quad (1)$$

となる。ここで、ボクセル u_1 から u_n までの経由点数 n の異なる経路 P_n を考える。経路 P_n の空間余裕のスコアは、 $\sum_{i=1}^n 1/s_{u_i}$ となる。

二つの経路について $n > m$ かつ、すべてのボクセルの空間余裕スコアが等しく s と仮定すると、経路 P_m と経路 P_n の空間余裕のスコアはそれぞれ、 $S(P_m) = m/s$ と $S(P_n) = n/s$ となる。 $m/s < n/s$ であるから、経路 P_m のほうが経路 P_n より空間余裕があることになってしまう。

これは、スコア式 (1) が、経由点の個数 m に依存することに原因がある。経由点の個数に依存しないスコア式とするために、経由点で平均化した空間余裕を求めればよい。

$$\sum_{i=1}^m \frac{s_{v_i}}{m} \quad (2)$$

この場合、空間余裕スコアを最大化する経路を探索する。

3.2.2 段階的なスコア評価による最適化方法

複数のスコアを用いた目的関数として、線形比重和が一般的に用いられる。しかし、重みの値の適切な設定方法がないという問題がある。これに対し、複数のスコアを段階的に評価する方式は、経験則を容易に最適化計算に入れ込むことができる利点がある。

プラント内の搬送計画では、現場の経験則の優先順に、(1) 搬送物の姿勢変化が少ないこと、(2) 広い空間を通ること、(3) 経路が短いこととなる。任意のノード p に、これらを用いた 3 次元のスコアベクトル $s_p = (s_{p1}, s_{p2}, s_{p3})$ を導入する。ここで、 s_{p1} は (1) の経路の曲がり回数スコア、 s_{p2} は (2) の空間余裕スコア、 s_{p3} は (3) の経路長スコアに該当する。

いま、任意のスコアベクトル s_a と s_b について比較式を以下のように定義する。

表 2 線形比重和と段階的スコア方式の結果比較

No.	Weighted linear sum			Cascade evaluation			$\frac{m-m_p}{m_p}$
	c_p	m_p	l_p	c	m	l	
1	2	1.66	151.4	2	1.66	151.4	0.0
2	5	1.41	132.0	5	1.65	213.1	0.17
3	2	1.67	140.7	2	1.67	140.7	0.0
4	2	1.40	61.6	2	1.40	61.6	0.0
5	4	1.55	125.7	4	1.55	125.7	0.0
6	3	1.25	127.0	3	1.36	133.0	0.09
7	5	1.51	207.6	5	1.56	214.5	0.03
8	7	1.11	185.6	7	1.11	185.6	0.0
9	8	1.16	207.5	8	1.18	208.5	0.02
10	6	1.06	165.1	6	1.06	165.1	0.0

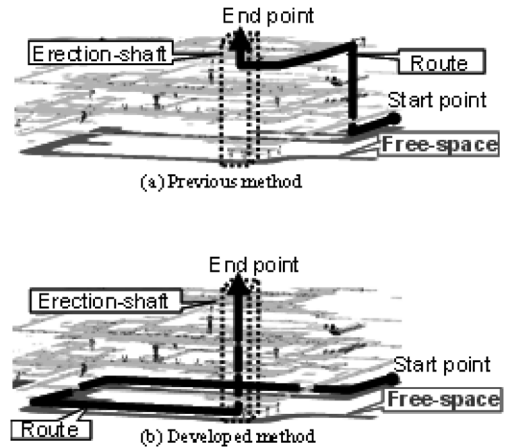


図 4 探索された経路の比較

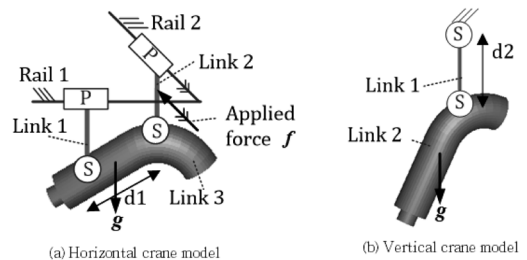


図 5 クレーン吊りの機構モデル

$$s_a < s_b, \text{ if } \begin{bmatrix} s_{a1} < s_{b1} \vee \\ s_{a1} = s_{b1} \vee s_{a2} > s_{b2} \\ s_{a1} = s_{b1} \vee s_{a2} = s_{b2} \vee s_{a3} < s_{b3} \end{bmatrix}$$

3.3 経路の探索結果

段階的なスコア評価方式と、従来の線形比重和によるスコアの探索結果を表 2 に比較する。始点と終点がそれぞれ異なる組み合わせ 10 組を与えて計算を行った。 c_p , c は曲がり回数、 m_p , m は空間余裕、 l_p , l は経

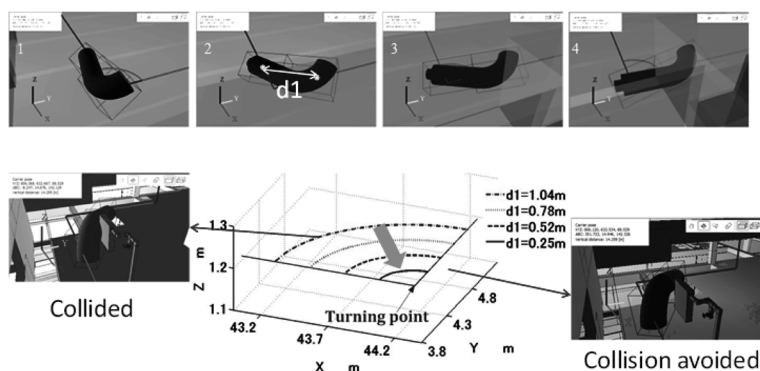


図6 水平面方向転換のクレーン吊りシミュレーション

路長を示す。線形比重和の計算では、スケールを均一化するために項ごとにノーマライズした値を用いた。表の値はノーマライズ前の値を示した。曲がり回数は同じであるが、空間余裕は段階的なスコアのほうが大きな経路を求めている。その場合、経路長は長くなる傾向がある。図4は求められた経路の一例を示す。太線部分の空間余裕の大きな場所を示している。段階的なスコアは、太線空間余裕の大きな場所を通して迂回し、クレーンの吊り上げ用のシャフトの入り口に達し、シャフトを上昇する経路を導き出している。

4. クレーン吊り姿勢のダイナミクスシミュレーター

先の経路探索では、姿勢を変化させる必要のある曲がり回数を最小としたときに、最も空間余裕が大きい経路が導かれている。搬送物は求められた経路上を、クレーン吊りにより移動する。クレーン吊りの搬送物がどのような姿勢をとるかをシミュレーションする方法を紹介する[6]。それにより、実際に周囲と干渉することなく搬送が可能かを判断することが安全の観点で重要である。

クレーン吊りの機構モデルの2例を図5に示す。図中のS, Pはそれぞれ、球対偶、並進対偶を表す。これらの機構モデルはクレーン吊りを計算で模擬するために極力簡略化した機構としている。(a)の機構は水平移動の際にとられる。曲がり角では、作業者がレールから吊られたワイヤーを押して、搬送物は交差するレールを渡って方向を転換する。作業者の加えた力と重力が機構に加わる外力となる。(b)の機構は垂直移動の際にとられる。この際の外力は重力のみである。

これら機構の外力に対する動特性は、以下の微分方程式運動方程式を加速度について解くことにより求められる。

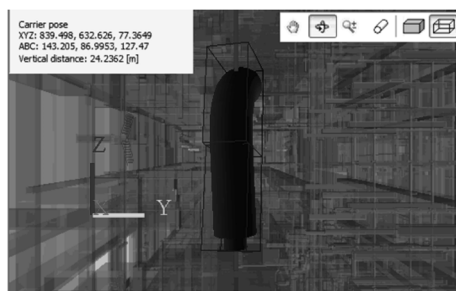


図7 垂直方向のクレーン吊り姿勢シミュレーション

$$\begin{bmatrix} M & O & \dot{\Phi}_{\dot{V}T} \\ O & J' & \dot{\Phi}_{\dot{\Omega}T} \\ \dot{\Phi}_{\dot{V}} & \dot{\Phi}_{\dot{\Omega}} & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{\Omega} \\ \Lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ N' - \tilde{\Omega}' J' \Omega' \\ -\dot{\Phi}^R \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $\dot{V}$, $\dot{\Omega}$ はそれぞれ、各リンクの並進加速度と回転加速度ベクトルを表す。 F , N' は各リンクにかかる外力とモーメントのベクトルである。 M と J' はそれぞれ、リンクの質量の対角行列と慣性テンソルであり、 $\dot{\Phi}_{\dot{V}}$ と $\dot{\Phi}_{\dot{\Omega}}$ はそれぞれ、並進と回転の機構拘束条件を表す。

式(3)の時系列解に従い、プラントモデルの3次元空間で搬送物を動かして、運動に伴う干渉の有無を判定する。図6は水平移動時の方向転換を示す。 d_1 は2本のワイヤーの吊り位置間の距離である。 d_1 を変化させることにより、搬送物の回転半径が変化して、方向転換時の軌道が変化する。経路探索では、曲がり角の経由点(turning point)しか求められないが、実際は図のように吊り位置間の距離が大きいと、干渉を起こす場合もある。その際は、吊り位置間の距離を干渉を起こさなくなるまで自動的に小さく変化させることはできる。しかし、小さ過ぎると外力に対して不安定になり振動しやすくなるため、シミュレーションでそのトレードオフを検討することが必要である。

図 7 は垂直移動時を示す。長大な物体を垂直に吊る際は、吊り姿勢の安定性の確認が重要である。吊った際に振動がなく、周囲と干渉がないかをシミュレーションにより判断する。

5. おわりに

本稿では、プラント内での大型機器の搬送経路の計画問題を扱った。この問題は最短経路問題としてモデル化できるが、その規模は、道路地図経路問題とロボット軌道計画の中間に位置する。一事例として、クレーン吊り搬送において、プラントの建物や設置された機器などの障害物と干渉せずに、作業効率のよい経路を計画するために、複数のスコアを用いた目的関数による探索方式を示した。単純に線形比重和をとるときと段階的なスコア評価をするときとで、異なる経路が得られた。また、プラントの 3 次元モデルで導かれた経路に沿って、クレーン吊り姿勢をシミュレーションすることにより、安全で効率のよい搬送経路を計画することができることを示した。

参考文献

- [1] A. Schrijver, *Combinatorial Optimization*, Springer, pp. 67–68, 2002.
- [2] Y. Nonaka, T. Nakano, K. Ohya, A. Enomoto, G. Erdős, G. Horváth and J. Váncza, “Engineering support systems for industrial machines and plants,” *Advances in Through-life Engineering Services*, L. Redding, R. Roy and A. Shaw (eds.), Springer, pp.199–220, 2017.
- [3] A. V. Goldberg, “Efficient point-to-point shortest path algorithms,” Technical Report, MSR-TR-2005-132, 2005.
- [4] R. Diankov and J. Kuffner, “Randomized statistical path planning,” In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, DOI: 10.1109/IROS.2007.4399557.
- [5] A. Okabe and A. Enomoto, “Automatic route-finding with nonmonotonic-trend factor for large-scale plant maintenance task,” *Procedia CIRP CMS 2015*, No. PROCIR-D-14-01150R1, 2015.
- [6] A. Enomoto, N. Fujii, Y. Nonaka, J. Kolibabka, J. Rasch, S. Schulte, M. Engelhardt, J. Kaneko, T. Ichijo and K. Shibuta, “Multiple path finding system for replacement tasks,” *Procedia CIRP ICME 2014*, **33C**, pp. 3–8, 2014.