

6自由度マニピュレータを用いたパレタイジング作業の タクトタイムマップによる環境整備

千葉 龍介*・藤田 武久*・太田 順*
新井 民夫*・植山 剛**

Environmental Design for Palletizing Tasks
with 6DOF Manipulator using Takt-time Map

Ryosuke CHIBA*, Takehisa FUJITA*, Jun OTA*,
Tamio ARAI* and Tsuyoshi UHEYAMA**

This paper presents a method to design the work environment of a manipulator for palletizing task. Cycle time can be reduced with an effective design of the working environment such as position of manipulator, shape and position of pallet. However, it takes long time to search the effective working environment because of high dimensions of the searching space and large number of motion planning of a manipulator. In this paper, we propose the method with takt-time maps which can reduce the computation time for the design. Though simulation experiments, we can obtain the results that the effectiveness of a palletizing task with the proposed method increase by about 40 % compared with an empirical method.

Key Words: placement design, palletizing, environmental support

1. 序 論

1.1 研究の背景

工場内の生産を自動化する上で、マニピュレータなどの産業用ロボットの適切な設置をおこなうことは、生産効率を向上させるために非常に重要である。更には、ロボットの設置のみならず、周囲の環境を整備することによって、より一層の生産効率の向上を可能とすることができる。

工場内における自動化に関し、ロボットがおこなう重要な作業の1つにパレタイジング作業がある。この作業は、Fig.1のように、ロボットがベルトコンベア上の製品を繰返しパレット上に整列させる作業である。このパレットに並べられた製品は、フォークリフトなどによりパレット単位で、倉庫やトラックなどに搬送される。すなわち、パレタイジング作業は製品の製造過程で必須の作業であり、この作業に多大な時間を要すると製造時間のボトルネックとなり、生産効率が大きく減少することとなる。ここにおいて、パレタイジング作業は専用機械でおこなうことも多いが、多品種少量生産および変種変量生産が必要な現在の生産現場において、汎用的な6

自由度マニピュレータを用いて各種作業をおこなうことが望ましい。

そこで、6自由度マニピュレータを用いた効率的なパレタイジング作業が必要となるが、これには以下の問題を解決する必要がある。

- 最短時間で作業達成が可能な、マニピュレータの動作計画問題。
- 作業環境の設計問題。

ここにおける“環境”とは、マニピュレータがパレタイジング作業をおこなう際の設計可能な要素であり、主に以下のものを指す。

- マニピュレータの設置位置・姿勢
- パレットの形状
- パレットの設置位置・姿勢

従来の生産現場において、これらの設計要素は、熟練者が経験や勘に頼って設計したといえる。しかしながら、このような方法では以下のような問題を引き起こす。

- 設計時に試行錯誤を繰り返すことが多いため、設計時間および労力が大きい。
- より効率的な設計解の存在を見逃す可能性が大きい。

以上により、パレタイジング作業において、体系化され自動化された作業環境設計手法は非常に重要であるといえる。その重要性から、マニピュレータの設置位置の設計に関する従来研究がいくつかおこなわれている^{1)~5)}。Hsuらは、非常

* 東京大学大学院工学系研究科

** (株)デンソーウェーブ

* School of Engineering, The University of Tokyo

** DENSO WAVE INCORPORATED

(Received June 16, 2006)

に多くの障害物が環境中に存在する場合における、マニピュレータの適切な設置位置を導出する手法を提案した¹⁾。この論文では、Randomized Path Planning (RPP)⁶⁾を用いてマニピュレータの動作を生成し、最短距離になるマニピュレータの設置位置を反復探索によって求めている。Trabiaらは、2自由度マニピュレータの設置位置を運動学的観点から最適化している²⁾。この研究においては、作業ポイントからの逆運動学を解くことによってマニピュレータの存在可能範囲を計算し、その範囲内で最適化をおこなっている。Abbelらも、2000年の研究において、作業可能範囲を算出しており³⁾、また2004年の論文においては、器用さ (Dexterity) という指標を用いて、最適なマニピュレータ設置位置の設計をおこなっている⁴⁾。また、Feddemmaは障害物の存在しない環境において、マニピュレータのベース位置の最適化をおこなっている。しかし、この研究においては、マニピュレータの運動が常に加速もしくは減速しているという仮定がなされている。すなわち、等速運動を想定しておらず、現実的でない⁵⁾。

また、移動マニピュレータの作業位置計画^{7), 8)}も、ベース位置研究と同様の意義をもつ研究である。Serajiは、移動マニピュレータ (7自由度) の位置設計をおこなっている。この研究において、使われている指標は到達可能性 (reachability) であり、解析的に設計問題を解いている⁷⁾。鬼頭らは、可操作性を指標として、作業のための停止回数が最も少ない停止位置を計画している⁸⁾。

しかしながら、これらの研究は、マニピュレータ基底部の位置・姿勢のみを設計対象としている。パレットの形状や位置・姿勢、つまり作業ポイントの設計は大きく作業効率に影響を及ぼすため、これらを設計対象としていない上記研究は不十分である。また、従来のPTP作業に対するベース位置の設計手法では、ある2点間のPTP作業に対する適切なベース位置は設計可能だが、多点間のPTP作業に適切なベース位置の設計は困難である。パレタイジング作業は2点間ではなく多点間のPTP作業であるため、新たな手法の提案が必要である。

更には、計算機シミュレーションによる繰返し順問題解決による設計方法は、設計に多大な時間を要する。したがって、Trabiaらの研究²⁾のように低い自由度のマニピュレータのみに用いられるか、Hsuらの研究¹⁾のように、最適性を犠牲にして時間短縮のためにPRMを用いている。

以上の点から、従来研究では、パレタイジング作業を効率的におこなうための環境整備法として不十分である。

1.2 本論文の目的と構成

上記の研究背景を踏まえ、本論文では、6自由度マニピュレータでおこなうパレタイジング作業のための環境整備手法の提案をおこなう。具体的には、パレタイジング作業に対する、サイクルタイムを短くする、高速な作業環境の設計手法の提案が本論文の目的である。

ここにおいて、設計に多大な時間を要することは、実システムへの適用の観点から、好ましくない。したがって、本問

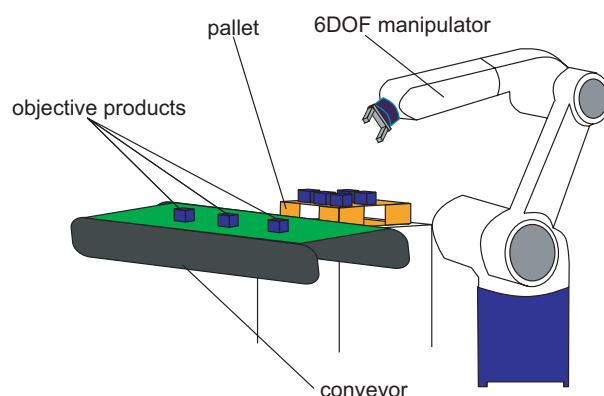


Fig. 1 Palletizing task with 6DOF manipulator

題においては、設計時間に制約があり、高速な設計手法が必要となる。

次節において、上記の目的を達成するために提案する、マニピュレータによるパレタイジング作業の効率化の具体的な方法論を説明する。2章では、用語の定義およびパレタイジング作業の定義について説明する。3章では、具体的な効率化のための環境整備手法について論じ、4章では当該提案手法の有効性を検証するために、シミュレーションによる実験を示す。5章で本論文をまとめる。

1.3 本論文の新規性

上記の目的を達成するためには、いくつかの課題を解決する必要がある。本節では、その問題と解決法を示す。

パレタイジング作業において、サイクルタイムとはすべての製品をパレット上に置くのに要する時間、すなわち、全製品の収納時間の総和を意味する。それゆえ、これを小さくするためには、すべての製品のパレタイジングを計画し、各製品ごとのパレタイジング時間を算出する必要がある。なぜならば、一つ一つの製品の収納位置は、パレット上で微妙に異なるからである。つまり、マニピュレータの動作生成や環境整備は、サイクルタイムを評価値として適切におこなわれる必要がある。

本論文における、サイクルタイム最小化のための手順をFig.2に示す。このアルゴリズムにおいて、環境整備のパラメータが繰返し評価・探索される。この際、以下の課題を解決しなければならない。

- すべての製品のパレタイジングという、多数のパスプランニングに要する時間の短縮
- 多数のパラメータにより表現された環境を適切に設計するという、高次元の探索に要する時間の短縮

すなわち、ある1つの環境パラメータを評価する時間も大きく、また環境パラメータの次元も大きいために、非常に設計に時間を要するという問題を解決しなければならない。これらの問題の解決のために、本論文では以下の新たな手法を提案する。

- マニピュレータモデルの適切な設定による、設計対象となる作業環境パラメータの数の低減。

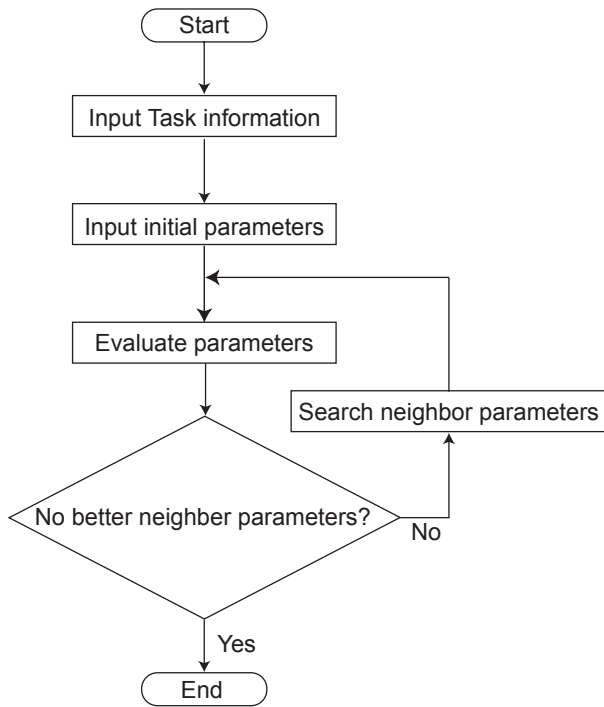


Fig. 2 Problem-solving algorithm

- 高速な評価を可能とする，マニピュレータによるタクトタイムマップの作成．
- 上記手法の具体的な内容は 3 章で述べる．

2. 問題設定

2.1 設計時間制約

第 1 章で述べたように，実際の生産現場でサイクルタイムの短縮をおこなう場合，その設計時間は非常に重要である．本論文においては，効率の観点から，環境パラメータの設計時間制約を約 1 時間とする．

2.2 変数・用語の定義

本論文におけるパレタイジング作業は 6 自由度マニピュレータによっておこなわれる．ここで，一般的な関節配置として，6 軸垂直型 (RPPRPR 型) を想定する．

本論文では，そのパレタイジング作業に用いるマニピュレータの仕様を Table 1 に示す．これは，あくまで一例であり，必ずしもこの数値である必要はない．なお，第 6 関節の速度が他の関節に比べ速いことが特徴として挙げられるが，これは汎用マニピュレータとして一般的である．

また，本論文における変数の定義を以下に示す．

- N : パレタイジングされるべき製品の総数
- d : パレットの設置が不可能な，picking point からの距離 [mm]
- θ_i : 関節 i の角度 [deg]
- l_{ij} : 関節 i と関節 j との間の距離 [mm]

パレットは picking point から一定距離離して設置する必要がある．これは，パレタイジング作業において製品は通常ベルトコンベアなどで運ばれてくるため，それらの機械が存

Table 1 Manipulator spec.

	Range of θ_i (deg)	Max velocity $\dot{\theta}_i$ (deg/sec)
joint 1	± 165	48
joint 2	+150, -65	30
joint 3	+155, -50	64
joint 4	± 160	90
joint 5	± 115	120
joint 6	± 360	150

在する領域にはパレットを設置することはできないことを意味している．本論文では，その距離をパレット設置不可能距離と呼び， d と表わす．ベルトコンベアを想定すると，その存在範囲は長方形であるが，本研究においては z 軸まわりの回転を無視できるため (3.2.1 項で説明)，円形と近似しても一般性を失わない．また，設置不可能な距離 d をベルトコンベアの短辺と考え，何も設置されていない空間に長辺方向を伸ばすことが可能であり，現実に用いる場合においても，ベルトコンベアの設置角度を様々に取ることが可能であるように，設置不可能領域を円形とするほうが好ましいと考える．

ここで，パレタイジング作業における一般的なマニピュレータの動作を以下に示す．パレタイジング作業では，製品がパレットやベルトコンベアに衝突しないために，この手順が必要となる．

- (1) マニピュレータにより，製品を picking point 上で把持する．その後，製品を床面に対し鉛直方向にある一定量を持ち上げる．このときの製品の姿勢は，製品によらず一定とする．本論文では，製品を床面に対し，鉛直方向から把持するとする．
 - (2) マニピュレータは製品を把持したまま，picking point 上からパレットの dropping point 上 (dropping point の一定距離上方) まで移動する．このときの製品の姿勢は dropping point における姿勢と同一とする．
 - (3) 製品を把持しているマニピュレータは，製品の姿勢を維持したまま，パレットの dropping point に製品を置く．
- なお，本論文では”サイクルタイム”と”タクトタイム”という 2 種類の作業時間を表す用語を用いる．”サイクルタイム”とは，前述のように全製品をパレット上に置くまでに要する時間であり，”タクトタイム”とは，1 つの製品がパレット上に置かれるのに要する時間を指すこととする．

2.3 パレタイジング作業の設定

本論文でのパレタイジング作業として，以下の条件・仮定を設定する．

- 最小時間による作業達成のため，少なくとも 1 関節は最大速度で変位する．また，仮定として，各関節における加速度は考えない．
- 製品数” N ”は設計段階で既知であるとする．
- パレットの形状は，” N ”個の製品を載せることが可能な

だけの面積である一面をもつ、直方体とする。

- 製品を把持する picking point における製品の姿勢は常に一定であるとする。また、製品をパレット上に置く姿勢も一定とする。
- 製品・マニピュレータ、パレット以外の物体は作業環境内に存在しない。これは、作業環境の整備という観点から、妥当である。

3. パレタイジング作業のための環境整備

3.1 設計アルゴリズム

本節では、パレタイジング作業におけるサイクルタイムを短縮するための作業環境設計法を具体的に提案する。

本論文では、Fig.2 のフローチャートで示す設計方法を提案する。以下に詳細なアルゴリズムを示す。

- (1) 使用するマニピュレータのスペックや製品の形状、パレタイジングする製品数、製品の把持・収納姿勢を入力する。
- (2) 環境設計パラメータの初期値を設定、入力する。環境設計パラメータの内容は、マニピュレータのベース位置やパレットの形状などであり、3.2.1 項で詳細に述べる。
- (3) 入力された環境設計パラメータを評価する。評価はサイクルタイムに基づいておこなわれるが、詳細は 3.3.1 項で述べる。
- (4) 環境設計パラメータの近傍を探索し、評価する。
- (5) 現在の環境設計パラメータより評価値の高い近傍が存在しなければ、現在の環境設計パラメータを最終設計とし、設計プロセスを終了する。
- (6) 現在の環境設計パラメータより高い評価値の近傍が存在すれば、最も評価値の高い近傍を現在の環境設計パラメータとし、(4) に戻る。

このアルゴリズムを採用するにあたり、繰返し計算を必要とするために、多大な設計時間を要する可能性がある。本論文では、以下のアプローチを採ることにより、設計時間の問題の解決を図る。

- 可能な限り環境設計パラメータの数を減らし、探索次元を抑制する。
- マニピュレータの動作計画を単純化し、1 回の評価に要する計算時間を抑制する。具体的には、マニピュレータの手先の移動を 2 次元平面上に拘束し、詳細なシミュレートをおこなうことなく動作を生成する。2 次元平面上での適切な動作を可能とするために、パレットの高さは picking point と同一にする。これによって、衝突がなく最短のサイクルタイムで作業が可能な動作を、経路探索することなく、短時間で生成可能となる。この動作生成法の詳細は、3.3 節において述べる。

3.2 環境設計パラメータ

3.2.1 作業環境のパラメータ化

パレタイジング作業のための環境を表現する設計対象パラメータの数を抑制することにより、探索が必要な空間の次元

を減らすことが可能であり、設計時間短縮が可能になる。本項では、そのパラメータの種類および内容を述べる。

本論文において、設計対象となる物体は、マニピュレータおよびパレットである。これら物体の状態を示すパラメータを以下に示す。なお、picking point の座標を $(0, 0, 0)$ とする。

- パレットの形状：パレットは様々な形状が考えられるが、実用上の理由およびパラメータ数抑制の観点から、製品収納面が長方形であるとする。収納すべき製品数は既知であるので、パレットの収納面積はあらかじめ決めることができる。したがって、パレットの形状は 1 つのパラメータで表現可能である。この長方形の一辺を a というパラメータで表現する。

- パレットの位置・姿勢：パレットは、マニピュレータの動作生成法 (3.3 節にて後述) により、高さを picking point と同一にすることによって高速な設計を可能とする。したがって、パレットの位置の表現は x, y の 2 座標により表現される $((p_x, p_y, 0))$ 。また、姿勢に関しても、製品収納面が地面に対し水平であることが必要になるため、 z 軸まわりの回転角度のみで表現することが可能である。この回転角度を w と表現する。

- マニピュレータの位置・姿勢：マニピュレータの位置および姿勢は $(0, m_y, m_z)$ で表わす。パレタイジング作業における物体の把持は鉛直方向からであるので、第 6 関節によってマニピュレータの設置姿勢の相違による最終の把持姿勢の相違を制御する。ここで、Table 1 に示したように、一般的なマニピュレータにおいて、第 6 関節は他の関節に比べ高速で動くため、タクトタイムを考慮する際に無視できる関節となる。したがって、マニピュレータの設置姿勢は設計パラメータとする必要はなく、マニピュレータと picking point との距離と高さのみを設計することで適切な環境設計が可能となる。

パレタイジング作業の環境設計は以上の 6 個のパラメータ $(a, w, m_y, m_z, p_y, p_z)$ を適切な値にすることにより達成される。

3.2.2 適切なパラメータ値の探索

上記の 6 個の環境設計パラメータを適切な値にするため、探索をおこなう必要がある。本論文では、近傍探索法によって探索をおこなうこととする。近傍探索における各パラメータの評価値は、サイクルタイムである。したがって、ある環境設計パラメータのセットを評価するごとにサイクルタイムの算出が必要となる。近傍探索法では、パラメータセットは近傍で最も評価が高い方向に移動していく。そして、近傍に現在のパラメータより評価が高いものがない場合、現在のパラメータを最終設計パラメータとする。近傍探索法は、他の発見的手法に比べ、短時間での収束が可能であり、本研究の目的である高速な環境設計に適した方法であると考えられる。

近傍探索法は局所解に陥ることから、大域的な解に到達しにくいという欠点があるが、本論文の探索空間は、単峰性であり近傍探索でも問題ないと判断する。これは、後に結果で

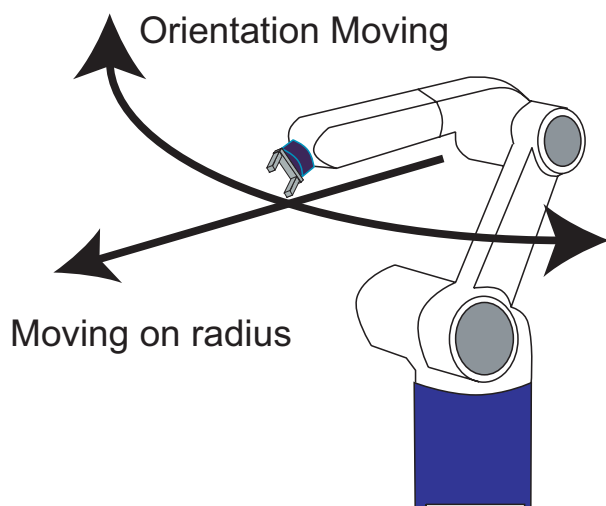


Fig. 3 2 moving directions at horizontal moving

示すタクトタイムマップから明らかである。探索時間に関し、Simulated Annealing(SA)より速く解に到達可能な手法であり、また従来研究¹⁾においても近傍探索を用いていることから、妥当な方法であると考えられる。ただし、多峰性の解空間となった場合はこの限りではなく、SAなどの適用が必要になる。

3.3 高速なパラメータ評価

3.3.1 パラメータ評価法

上記の環境設計パラメータを適切に設計するために、あるパラメータにおける作業時間を評価する必要がある。

考える1つの方法は、関節角コンフィギュレーション空間を用いた最短軌道生成によって、作業時間を推定する方法がある。しかし、6自由度マニピュレータのコンフィギュレーション空間を作成すると、6次元空間を探索することによって作業時間を推定しなければならない。したがって非常に膨大な計画時間を要し、本論文の仕様を満たさない。

ここで、2.2節で述べたように、本論文におけるパレタイジング作業は、1)鉛直持ち上げ、2)目的位置までの手先移動、3)鉛直パレット上配置と定義される。この作業手順において、製品の把持姿勢の変化が作業時間に及ぼす影響は無視できるほど小さい。したがって、鉛直持ち上げ位置と鉛直下げ収納位置の高さが同一かつ障害物が存在しない場合、作業対象物の運動は水平面上の2次元平面のみで最短軌道が表現可能である。

そこで、本論文では最短軌道の生成によるサイクルタイムを用いたパラメータの評価を、2次元平面上的手先の運動によって求める。水平面上の手先の運動を考える場合、マニピュレータの運動は1.)円弧方向運動、2.)動径方向運動の2種類に分類可能である。この2種類の運動をFig.3に示す。

当該モデルにおいて、用いるマニピュレータはRPPRPR型であることから、円弧方向運動は第1関節のみの運動により、動径方向運動は第2関節、第3関節および第5関節の運動により、それぞれの運動が決定される。それゆえ、目標位置・姿勢までの各方向の運動は独立に記述可能である。

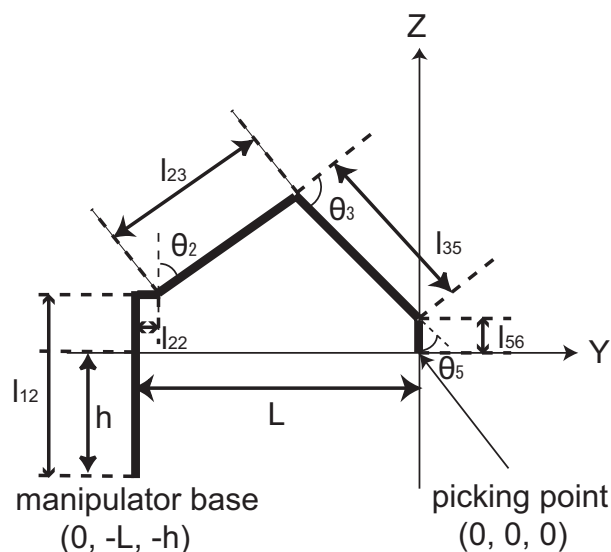


Fig. 4 Model of moving on radius

このモデルを用いることにより、第1関節は目標角度まで最大速度で動くことが可能であることがわかる。なぜならば、円弧方向運動は第1関節のみよりコントロールされ、動径方向には影響を与えないため、他の関節に対する影響が全くないからである。

一方、動径方向の運動は3関節によってコントロールされる。この運動を図式化したものをFig.4に示す。この図において、動径方向はy軸を示している。つまり、手先は $z=0$ を保ったまま、y軸上を運動する。ここにおいて、第2関節・第3関節および第5関節の角度と手先の運動の関係は以下の3式で表わされる。

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_5 = \pi. \quad (1)$$

$$l_{12} + l_{23} \cos \theta_2 = l_{35} \cos \theta_5 + l_{56} + h. \quad (2)$$

$$L = l_{22} + l_{23} \sin \theta_2 + l_{35} \sin \theta_5. \quad (3)$$

ここにおいて L はマニピュレータベース位置と手先との動径方向の距離を表わしている。また、 h は床面とマニピュレータの手先までの距離を示している。ここで、 L および h は環境設計パラメータから一意に決定される。また、 l_{ij} は各関節間の距離であり、マニピュレータの形状からあらかじめ与えられるものである。したがって、各3関節の角度 $(\theta_2, \theta_3, \theta_5)$ は、上記の式により求められる。

本論文では、前述したように障害物が存在しないと仮定しているため、マニピュレータの各関節は初期角度から目標角度まで、関節角空間上で直線的に移動する。したがって、各関節の変位に要する時間は容易に計算可能である。そのことから、すべての関節のなかでもっとも変位に要する時間が長い関節がボトルネックとなる関節であるということがわかり、またその時間がタクトタイムといえる。すなわち、ボトルネックとなる関節に関して、 $(takt\ time) = (the\ target\ degree - the\ initial\ degree) / (the\ max\ velocity\ of\ the\ joint)$ と

る．このときの各関節における最大速度 (max velocity) は Table 1 で示されるものである．

ここで，第 6 関節は，他の関節に比べ，関節角速度が非常に大きい (Table 1) ため，ボトルネックになることはない．したがって第 6 関節は無視でき，パレタイジング作業においては，手先は床面に対し常に鉛直方向を向いているため，第 4 関節も変位の必要がなく無視できる．以上により，本論文によるモデルにおいては，第 1 関節，第 2 関節，第 3 関節，第 5 関節に対する変位に要する時間を計算すれば，正確な評価が可能となる．

本手法を用いることにより，ボトルネックとなった関節以外の関節は，タクトタイムに影響を及ぼさないので，最大速度で動く必要がない．第 1 関節がボトルネックとなる場合は，他の関節は算出されたタクトタイムに従い，平均速度で変位する．第 1 関節以外の関節がボトルネックとなった場合は，第 1 関節は平均速度で変位し，他の関節は手先の運動を床面との水平面上にするために，ボトルネックとなる関節にあわせて変位をおこなう．

3.3.2 タクトタイムマップ

上記のパラメータ評価法を用いる場合，手先の移動は水平面上のみであるため，手先の移動に要する時間，すなわちタクトタイムが 2 次元上にプロット可能である．本論文では，これをタクトタイムマップと呼び，その例を Fig.5 に示す．これにより，そのパラメータの評価が適切かどうかを判断可能とする．

この Fig.5 において，各座標が dropping point となったときのタクトタイムを色別に示している．色は青，緑，灰色，ピンク，黄色，橙色，薄灰色，茶色，赤，白を用いている．タクトタイムはこの順に大きくなるが，白のつぎは青に戻っている．すなわち，白のポイントに隣接している青のポイントは，その白のポイントよりタクトタイムが大きい．そして，つぎにタクトタイムが大きいポイントは緑で示されており，順次タクトタイムが上昇していく．当然ながら，picking point から離れるにつれてタクトタイムが大きくなるが，この図より理解される．

タクトタイムマップにおける各点は，その点がパレット上にあると仮定した場合の picking point からのタクトタイムを示している．すなわち，タクトタイムマップの中心は picking point であり，その中心から扇形上にタクトタイムが増加していく．したがって，picking point とマニピュレータのパラメータから一意に計算可能である．

この図によって，あるマニピュレータベースから各作業ポイントまでのタクトタイムが表現されていることにより，パレットの形状や位置について直感的に適切な値が理解できる．サイクルタイムは，このタクトタイムを製品の数だけ足し合わせたものであるため，パレット内のポイントをすべて足せば，そのサイクルタイムが容易に計算可能であり，サイクルタイム計算の高速化が可能となっている．

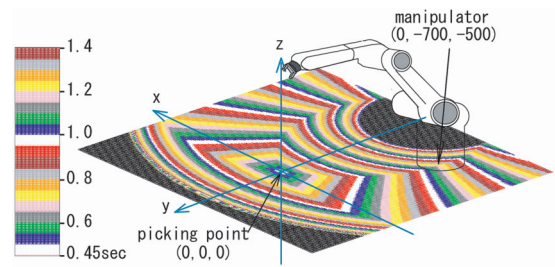


Fig. 5 Takt-time map

Table 2 Manipulator shape

l_{12}	l_{22}	l_{23}	l_{35}	l_{56}
500 [mm]	60 [mm]	500 [mm]	500 [mm]	90 [mm]

4. シミュレーションによる有効性の比較・検証実験

4.1 実験の目的と条件

本提案手法を用いてパレタイジング作業をおこない，当該手法の有効性を検証する．検証にはパレタイジング作業のシミュレータを用いる．

当該手法の有効性の検証は，提案手法と従来手法との比較によりおこなう．従来手法とは，現場作業者のノウハウに基づいたものであり，以下のとおりである．

- マニピュレータベースと picking point との距離を，床面に水平にすることが可能なマニピュレータの長さ ($l_{22} + l_{23} + l_{35} = 1060$) の 70 % 程度である，700[mm] とする．
- パレットの位置は picking point の真横とし，パレットの姿勢は picking point に対し垂直とする．
- パレットの形状は，製品の数をもつ正方形とする．
- 従来手法の動作モデルは提案手法と同様である．すなわち，動作モデルを同一とすることにより，提案する環境整備法の有効性を検証する．

ここにおいて，両手法の比較は，以下の設定に基づいておこなう．

- 製品はすべて同じ形状であるとする．更にここでは，一辺 1[cm] の立方体であるとする．
- 持ち上げおよび持ち降ろしは 100[mm] おこなうとする．
- マニピュレータの形状を表わす l_{ij} は，実際のマニピュレータに基づき Table 2 に示す値を用いる．
- 製品の数 N は，100 個から 100 個刻みに 500 個まで，5 種類の製品数について比較する．
- パレット設置不可能距離 d を，100[mm] か 50[mm] 刻みに 500[mm] まで，9 種類の制限において比較する．

後半の 2 項目に関して，製品数およびパレット設置不可能距離は現場の仕様により異なるため，これらの数値を変えて有効性の比較・検証をおこなうことが妥当と考え，上記の複数の数値で比較をおこなった．

比較する内容は，サイクルタイムの長さ，その設計され

Table 3 Result of simulation (cycle time)

Number of objects	100	200	300	400	500
Proposed method (sec)	107	234	372	520	680
Empirical method(sec)	169	348	538	738	944
<i>Proposed/Conventional</i>	0.635	0.672	0.691	0.705	0.720

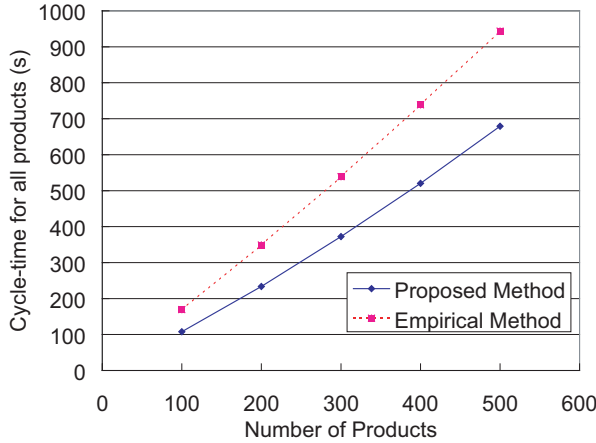


Fig. 6 Transition by number of products

たマニピュレータ位置、パレットの位置・姿勢および形状である。

なお、本手法において、その環境設計パラメータの初期値はランダムとしている。

4.2 実験結果

実験の結果を Table 3 に示す。この表においては、製品数を 100 個から 500 個まで変化させている。このときのパレット設置不可能距離 d は 200[mm] としている。

Table 3 からわかることとして、本論文で提案している手法によって、従来手法に比べ、どの製品数においてもサイクルタイムが短縮できている。これにより、製品数が多い場合でも少ない場合でも、本提案手法は有効であることがわかる。

製品数およびパレット設置不可能距離とサイクルタイムの関係を Fig.6 と Fig.7 に示す。ここにおいて、青線が提案手法によるサイクルタイムの推移を、赤線が従来手法によるサイクルタイムを示している。Fig.6 においては、パレット設置不可能距離を 200mm に固定し、製品数を 100 個から 500 個まで変化させている。同様に Fig.7 においては、製品数を 100 個に固定し、パレット設置不可能距離を 100mm から 500mm まで変化させている。

Fig.8 と Fig.9 は、3.3.2 項で説明したタクトタイムマップと設計結果を、(a) 提案手法、(b) 経験的な方法の 2 つについて示している。床面に対し垂直方向から見たマップを示しており、picking point を原点としている。Fig.8 は製品数が 500 個かつパレット設置不可能距離が 200mm の場合、Fig.9 は製品数が 100 個かつパレット設置不可能距離が 500mm の場合である。両方の図において、図中の太線による円はパレット設置不可能領域を示し、また太線の四角形はパレットを

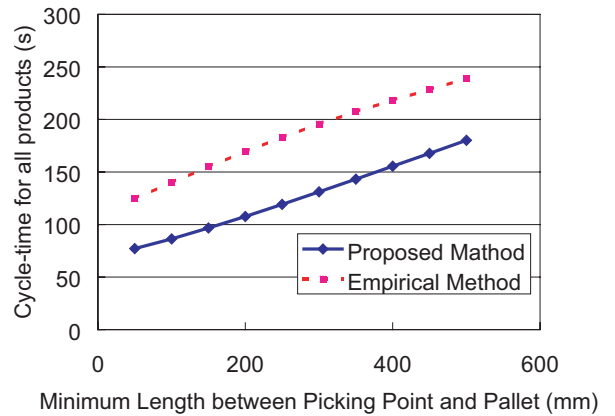


Fig. 7 Transition by distance between picking point and pallet

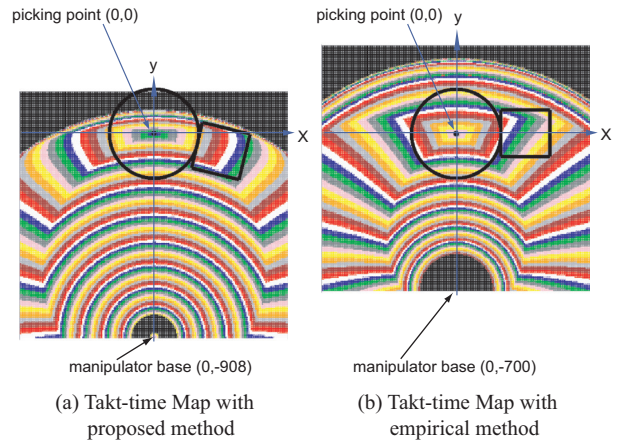


Fig. 8 Takt-time maps and design results (N=500, d=200)

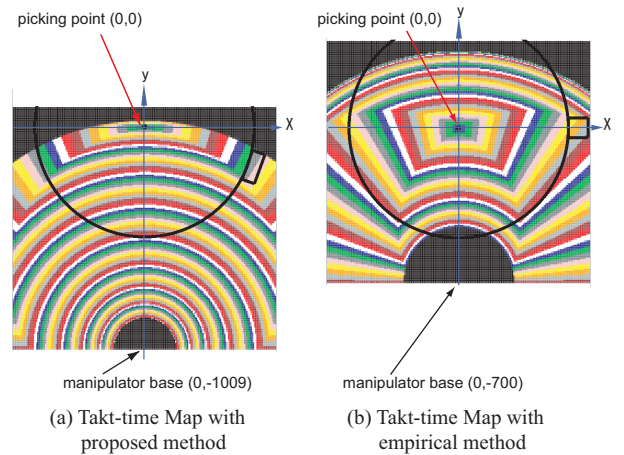


Fig. 9 Takt-time maps and design results (N=100, d=500)

示している。

ここで、設計時間に関し、もっとも設計時間を要する条件は、製品数が 500 個、パレット設置不可能距離が 100mm のときであったが、その場合でも 8[min] 程度 (Pentium4 3.2GHz を使用) であった。これは 2.1 節で述べた設計の要件を十分満たすものである。

4.3 実験結果に対する考察

Fig.6 と Fig.7 に示す結果から、本提案手法は製品数・パレット設置不可能距離の値に関わらず、常に経験的手法より作業効率が高い。提案手法によるパレタイジング作業は、サイクルタイムの観点から、効率が従来法に比べ 1.39 倍から 1.57 倍となっており、これは生産現場において非常に生産性を高める手法であるといえる。製品数などの作業スペックは現場によって様々であるが、提案手法はどの現場においても効率的な手法であると考えられる。

Fig.8 の結果から、提案手法により設計されたマニピュレータベースの位置が、経験的な従来手法に比べ、picking point から離れたものになっている。これにより、マニピュレータが伸びた状態のほうが $1[\text{deg}]$ あたりの手先の移動量が大きくなるため、円弧方向に高速に運動可能となりタクトタイムが少なくなることがわかる。したがって、妥当な結果になっているといえる。ここで、マニピュレータベース位置が picking point から離れると、タクトタイムマップの勾配(変化量)が大きくなるため、パレットの姿勢を適切に設計することで、サイクルタイムの短縮を可能としている。ここで、提案手法が妥当な解の導出を可能とした根拠として、マニピュレータベースが遠いほうが良い、という解の妥当性をここで挙げたが、異なる作業・環境を想定した場合、動作モデルの変更が必要になり、その場合は離れたマニピュレータ位置が良いとは限らない。しかし、上記を根拠として他の動作モデルでも、本手法を用いれば適切な環境設計が可能であると考えられる。

また、Fig.9 から、環境設計について以下の考察を得ることができる。

- パレットの位置・姿勢が効率に大きく影響する。タクトタイムマップの扇形に沿った姿勢が、サイクルタイムの縮小に大きく貢献している。
- パレットの位置・姿勢・形状は事前に適切な値が予測可能ではなく、製品数 N ・パレット設置不可能距離 d およびマニピュレータ位置により作られるタクトタイムマップから、適切に設計されていることがわかる。
- サイクルタイムを低減するためには、複雑に干渉しあうこれらの要素を統合的に設計する必要がある。

マニピュレータのベース位置を picking point から可能な限り離すという設計解は、サイクルタイムの短縮に大きく寄与することがわかったが、同時に可操作性を小さくする危険性が高い。これにより、picking point の誤差(製品の位置のずれ)や設置誤差などに弱い設置位置であるともいえる。しかしながら、これらの誤差をあらかじめ予測し、その予測値の分だけ余裕をとることによって、誤差の影響を受けない設計解にすることは可能であると考えられる。すなわち、あらかじめマニピュレータ位置の設計範囲に対し誤差の分だけ領域を狭めることにより、製品把持が不可能といった現象をなくすことが可能であると考えられる。

5. 結 論

本論文では、パレタイジング作業における、6 自由度マニピュレータを用いた作業を効率化する環境設計法の提案をおこなった。作業の効率化に加え、1 時間以内での設計という拘束条件下において、以下のアプローチにより問題を解決した。

- (1) 適切なパラメータセットを用意することによる探索次元の縮小
- (2) 水平面運動とタクトタイムマップによる評価方法の高速化

以上の 2 点による高速な環境整備方法により、10 分以内の設計が可能になり、また効率も従来の経験的な方法に比べ 1.38 倍以上にすることが可能となった。

また、マニピュレータベースは可能な限り遠い方が円弧方向運動が高速になり、作業が効率よくおこなうことができるという考察を得た。それに加え、パレットの形状も正方形ではなく長方形とし、適切な位置に置くことによってより効率化が可能であるということもわかった。

参 考 文 献

- 1) D. Hsu, J. C. Latombe and S. Sorkin : Placing a Robot Manipulator Amid Obstacles for Optimized Execution, Proceedings of IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 280/285 (1999)
- 2) M. B. Trabia and M. kathari : Placement of a Manipulator for Minimum Cycle Time, Journal of Robotic Systems, 16-8, 419/431 (1999)
- 3) K. Abbel-Malek and W. Yu : On the Placement of serial Manipulator, Proceedings of DETC00, MECH-14125 (2000)
- 4) K. Abbel-Malek and W. Yu : Placement of Robot Manipulators to Maximize Dexterity, International Journal Robotics and Automation (2004)
- 5) J.T.Feddema : Kinematically optimal robot placement for minimum time coordinated motion, In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3395/3400 (1996)
- 6) J. Barraquand and J.C. Latombe : Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach, International Journal of Robotics Research, 10-6, 628/649 (1991)
- 7) H. Seraji : Reachability analysis for base placement in mobile manipulators, J. of Robotic Systems, 12-1, 29/43 (1995)
- 8) 鬼頭朋見, 新井民夫, 植山剛 : 複数作業を実現する移動マニピュレータの操作性を考慮した最少の作業場所計画, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'04 講演論文集, 2A1-L1-54 (2004)

