

包装ライン用低慣性ハンドリングロボットの開発

Development of Small Inertia Handling Robot for Packing Line

技術本部 千 蔵 孝*¹

広島製作所 松 田 勝 實*² 井 上 朗*³

缶製品の段ボールケースへの充てんなどの包装ラインで仕分け、集積、パレタイジングに適用されるハンドリングロボットには、(1) 1 kgf 未満の単体製品から 50 kgf のコンテナまで扱える広範囲の可搬能力、(2) 単純動作であるが高速の繰返し運動能力、が要求される。これらの要求に対し、動力学による負荷解析とハンドリング作業のロボット軌道の解析により、ロボットに作用する慣性力を最小化できる構造とし、最短サイクルタイム 0.86 s (標準軌道往復) と最大可搬重量 50 kgf のハンドリングロボットを開発した。

A handling robot that is applied to sorting, accumulation and palletizing of products on packing lines to fill cans into cardboard boxes should have the following required capacities. (1) Handling capacity of various weight products from less than 1kgf to 50kgf. (2) Rapid periodic movement of simple steps. In order to realize these requirements, we have minimized inertia force by means of load analysis based on a dynamic model and analysis of the robot's movements. We developed handling robot which has a maximum handling capacity of 50kgf, and achieved the fastest motion of 0.86s (reciprocation on 1 m length track).

1. ま え が き

近年、食品、医薬品分野における包装ラインでのロボットの導入が急速に増加している。これは、包装分野においても、多品種生産傾向が強まり、専用ラインにすることはコスト的に有利ではなくなり、多品種の製品が取扱えラインの変更が容易なロボットシステムが必要となってきたことによる。

そこで、包装ラインでの仕分け、集積、パレタイジングを主な目的とするハンドリングロボットを開発した。

当該ロボットは、高速ラインでの使用に耐える高速性と重量物まで扱える可搬能力をねらいとし、慣性力を最小化できる構造とした。本報では、低慣性化を実現したハンドリングロボットについて報告する。

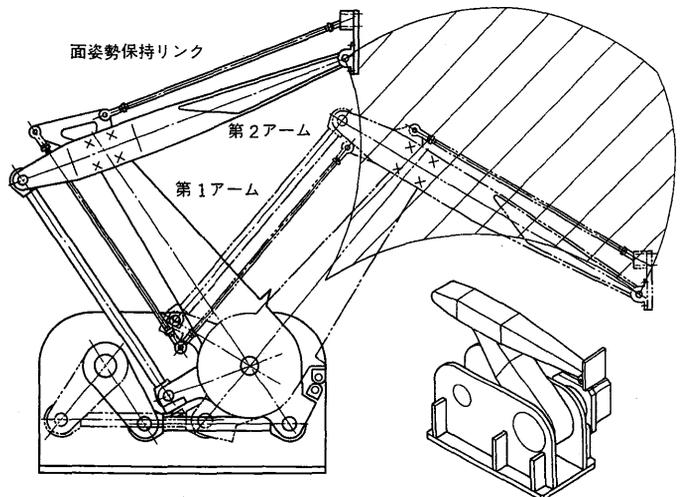


図1 ハンドリングロボットの構成 開発したハンドリングロボットの構成と外観の概略を示す。
Structure of handling robot

2. ハンドリングロボットの仕様

ハンドリングロボットの仕様を示す。

最大速度	: 3.2 m/s
最大可搬重量	: 50 kgf
繰返し位置決め精度	: ± 1 mm
動作範囲	: 前後 800 × 上下 500 mm
第1アーム長	: 750 mm
第2アーム長	: 750 mm
重量	: 420 kgf

図1に示す開発したハンドリングロボットは、先端が垂直平面内の動作範囲内の任意の位置を取れるように、相対運動が可能な関節で結合されている2本のリンク、第1アームと第2アームから成っている2軸構成である。2本のアームの駆動機構は、平行リンクとしている。これは、モータ及び減速機の重量物を固定ベース上に配置でき高速化に有利なこと、モータの突起物を片側にまとめられロボットをコンベヤ等に接近して配置できることにより、当該構成を採用している。また、先端のハンド取付け面の姿勢は、全動作範囲内にて一定方向である必要があり、取付け面の姿勢を一定とする平行リンク機構を設けている。

3. 開発手法の考え方

ロボット等シリアルリンク機構の開発では、まず、目標動作サイクルから最大速度、最大加速度を決める。次に、リンク構成上最大モーメントアームとなる位置にて最大速度、最大加速度から動力や各部材に働く力を求めて、機械系の開発を進める。しかし、包装ラインのハンドリング用と限定した場合には、ロボットはワークを持ち上げ、移動し、降ろすという単純な軌道を取り、最大モーメントアームとなる位置にて最大速度、最大加速度となることはない。従来の手法で開発すれば、ハンドリングロボットとしては、必要以上の動力を持つ重量の大きなロボットとなり高速化できない。そこで、ハンドリング作業のロボット軌道の解析を行い、基準とする標準軌道を定めた。

また、慣性力の低減には、質量の低減と、慣性中心の位置の適正化が要求される。そのためには、発生する力の詳細な把握が必要である。力の詳細な把握には、動力学的解析が用いられる。

*1 広島研究所機構技術グループ *2 一般機械部包装機械設計課
*3 一般機械部包装機械設計課主務

したがって、前記標準軌道と動力学的解析を用いて開発を行う方針とした。

4. 動力学的解析

ロボットなどの開ループリンク機構の運動方程式は、リンクごとの位置、速度、加速度の運動のパラメータと質量、慣性モーメントなどの物理パラメータから求められる。一般に用いられる方法は、ニュートン・オイラー法とラグランジュ法である⁽¹⁾。ニュートン・オイラー法はダランベールの原理に基づき、リンクごとの動的釣合いから運動方程式を導く方法である。一方、ラグランジュ法による運動方程式は、エネルギーに基づいて考えるもので、ロボット全体の運動エネルギーと位置エネルギーをラグランジュ方程式に代入することにより求められる。ラグランジュ法による運動方程式では、全体の運動方程式が陽に得られるため、各物理パラメータが運動に対してどのように影響しているか理解しやすい。このため、ラグランジュ法にて運動方程式を求める。

ラグランジュ法による運動方程式は、運動エネルギー T 、位置エネルギー U 、ラグランジアン $L=T-U$ 、関節角度 θ_i 、トルク Q_i 、 θ_i の時間微分 $\dot{\theta}_i$ とすると、

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} \quad (1)$$

で表される。図2に示す構成の本ロボットの運動方程式は、下記となる。

$$Q_1 = D_{11} \cdot \ddot{\theta}_1 + D_{12} \cdot \ddot{\theta}_2 + D_{13} \cdot \ddot{\theta}_2^2 + D_{14} \quad (2)$$

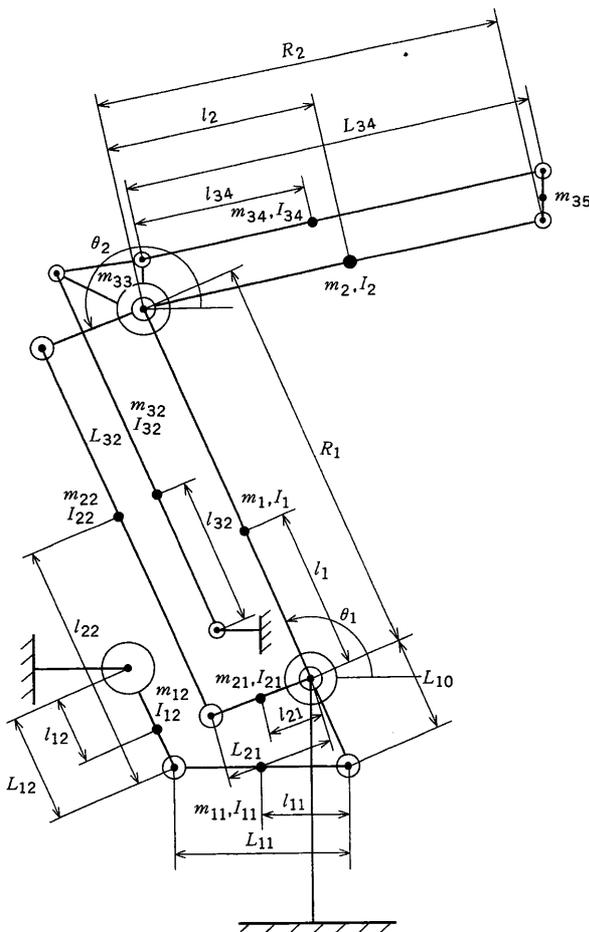


図2 ハンドリングロボットのリンク構成 ハンドリングロボットの力学系を説明するリンク構成を示す。
Link structure of handling robot

ここで、

$$\begin{aligned} D_{11} &= m_1 l_1^2 + I_1 + m_{11} L_{10}^2 + m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\ &\quad + m_2 R_1^2 + m_{22} l_{22}^2 + I_{22} + W R_1^2 + m_{32} l_{32}^2 \\ &\quad + I_{32} + (m_{33} + m_{34} + m_{35}) R_1^2 \\ D_{12} &= (-m_2 R_1 l_2 + m_{22} l_{22} L_{21} - W R_1 R_2 \\ &\quad - m_{34} R_1 l_{34} - m_{35} R_1 L_{34}) \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{13} &= (-m_2 R_1 l_2 + m_{22} l_{22} L_{21} - W R_1 R_2 \\ &\quad - m_{34} R_1 l_{34} - m_{35} R_1 L_{34}) \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ D_{14} &= \left\{ m_1 l_1 - m_{11} L_{10} - m_{12} l_{12} + m_2 \left(1 + \frac{l_2}{L_{12}} \right) R_1 \right. \\ &\quad + m_{22} l_{22} + W \left(1 + \frac{R_2}{L_{21}} \right) R_1 + m_{32} l_{32} \\ &\quad \left. + m_{33} R_1 + m_{34} \left(1 + \frac{l_{34}}{L_{21}} \right) R_1 + m_{35} \left(1 + \frac{L_{34}}{L_{21}} \right) R_1 \right\} g \end{aligned}$$

$$Q_2 = D_{21} \cdot \ddot{\theta}_2 + D_{22} \cdot \ddot{\theta}_1 + D_{23} \cdot \dot{\theta}_1^2 + D_{24} \quad (3)$$

ここで、

$$\begin{aligned} D_{21} &= m_2 l_2^2 + I_2 + m_{21} l_{21}^2 + I_{21} + m_{22} L_{21}^2 \\ &\quad + W R_2^2 + m_{34} l_{34}^2 + I_{34} + m_{35} L_{34}^2 \\ D_{22} &= D_{12} \\ D_{23} &= -D_{13} \\ D_{24} &= (-m_2 l_2 + m_{21} l_{21} + m_{22} L_{21} \\ &\quad - W R_2 - m_{34} l_{34} - m_{35} L_{34}) g \end{aligned}$$

ここで、

- Q: トルク
- m: 質量
- I: 主慣性モーメント
- l: 関節中心から質量中心までの距離
- R: アーム長
- L: リンク長
- W: ワーク質量
- g: 重力加速度
- 添字 1: 第1アーム
- 添字 2: 第2アーム
- 添字 3: 面姿勢保持リンク
- 添字 i: リンク番号

この運動方程式から、高速化には下記を実現する必要があることが分かる。

- (1) 質量、慣性モーメントを低減する。
- (2) 関節中心から質量中心までの距離を短縮する。
- (3) トルクには他の関節の速度、加速度によるトルクが発生し相互に干渉している。この干渉トルクは、関節の位置に関係し、三角関数の項を含み変動が大きい。変動は振動や軌道精度の不良の問題を起こすため、この干渉トルクを低減する必要がある。

5. 軌道特徴解析

包装ラインのハンドリング装置としてロボットが用いられる場合、ロボットの軌道は図3に示すような、作業面上にあるワークをつかみ (P0)、持上げ (P1)、移動し (P2)、置く (P3) といった単純な軌道である。このような軌道の場合、P0 → P1、P2 → P3では第2関節が、P1 → P2では第1関節が主に運動をしており、第1関節、第2関節とも同時に速度、加速度が最大となることはない。そこで、一般的なハンドリング作業であるカップラーメン等の整列、段積み作業でのロボット軌道を、標準軌道 (図3) と定めた。この標準軌道で発生する速度、加速度、トルクを基に開発を進めた。

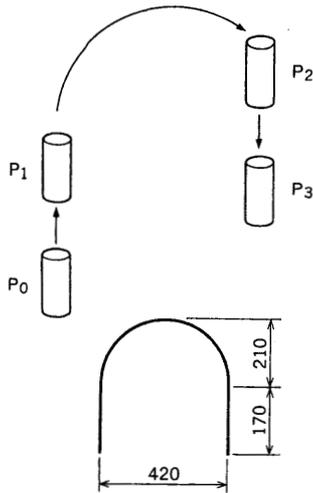


図3 標準軌道 包装ラインのハンドリング作業のロボット軌道の説明と基準とした標準軌道を示す。
Standard motion

6. 開発アルゴリズム

本ロボットの開発課題は、第1には慣性力の最小化である。これは、構造体をいかに軽くできるかに懸かっている。次に干渉トルクの最小化である。干渉トルクをなくすには、バランスを付加すれば良いが、付加されたバランスの質量による慣性力が増加するため、適正な配置を見いだす必要がある。したがって、いかにスリムな構造、バランスのよい構造にするかがポイントである。

部材の形状、配置の計画は、発生するトルクや力を正確に求め部材の応力を詳細に把握して行う必要がある。運動方程式により物理パラメータとトルクや力の関係は明らかになるが、物理パラメータは多数の部材形状、配置が絡んで複雑である。そこで、パソコンレベルでのソフトを用意した。

(1) 軌道作成プログラム

始点、経由点、終点、移動時間を指定する。直線補間、円弧補間を行い軌道を作成し、軌道上の各関節の速度、加速度を算出する。

(2) トルク計算プログラム

物理パラメータと(1)の速度、加速度から軌道上の各関節の発生トルクを算出する。

(3) 物理パラメータ算出支援プログラム

計画図面のアーム、シャフト等の質量、質量中心位置、慣性

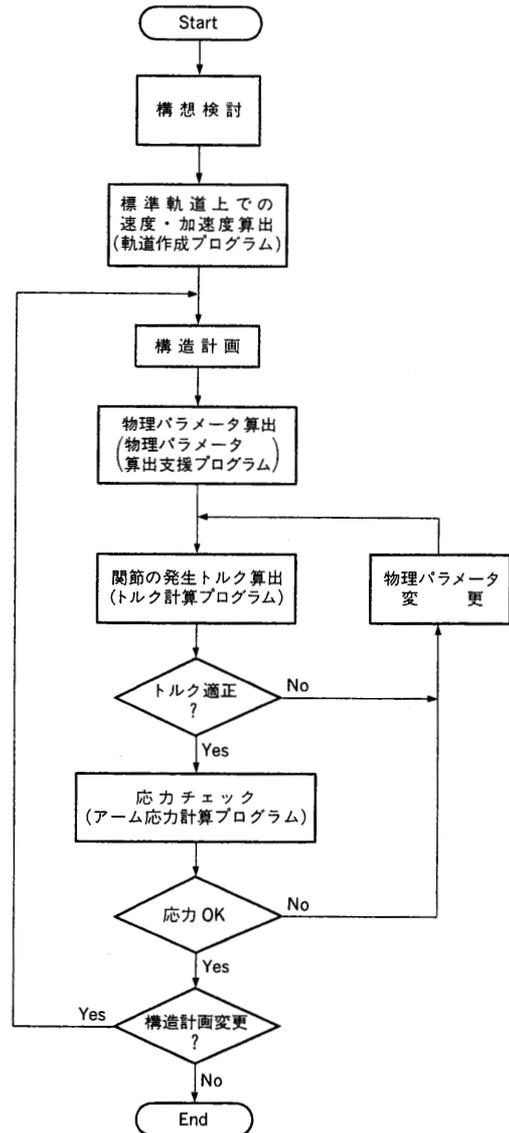


図4 開発手順 低慣性構造開発において実施した開発手順を示す。
Flow chart for development procedure

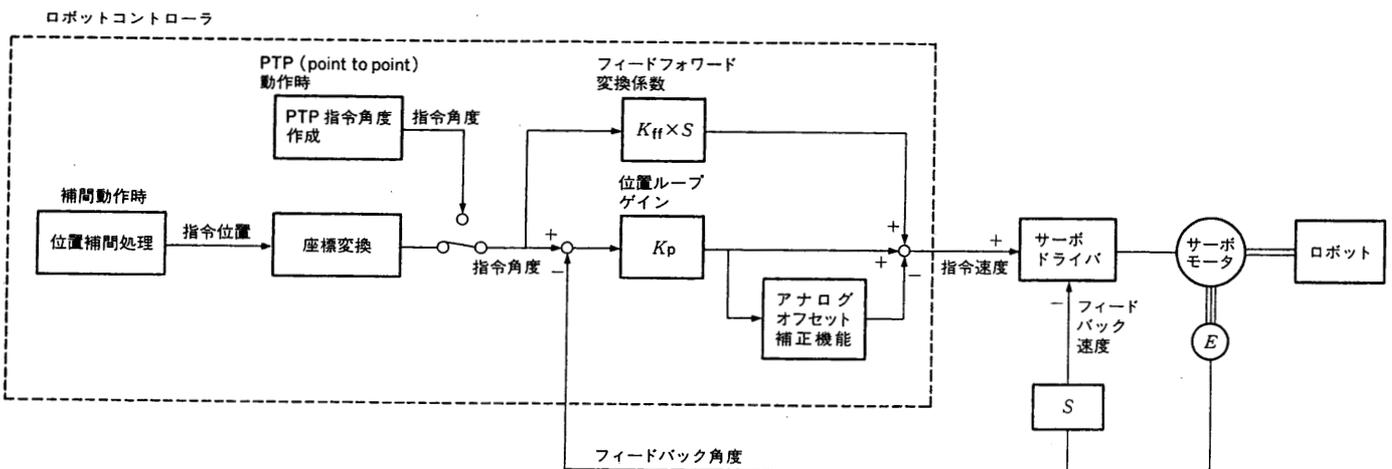


図5 制御ブロック図 ハンドリングロボットシステムの制御系ブロック図を示す。
Block diagram of control system

モーメントを求める表計算プログラム。

(4) アーム応力計算プログラム

計画図面のアーム形状から、指定断面の断面係数を算出し、重力と加速度による慣性力による応力を算出する。

その他、物理パラメータを変化させた場合の発生トルクの変化をグラフ化するプログラム等を用意しており、適正な部材形状、配置の検討を迅速に実施した。

図4に開発手順のブロック図を示す。

7. 試作検証

7.1 運動方程式の精度

本ハンドリングロボットの開発の成否は、運動方程式の精度に懸かっていた。モータの発生トルクを測定し評価した。実測値には、運動方程式には考慮に入れていない摩擦の影響や制御系の性能の影響が加わってくる。図5に制御系のブロック図を示す。モータの実効トルクの計算値と測定値を図6に示すが、ほぼ一致しており、この運動方程式にて精度よく開発を進められることが分かる。

7.2 最短サイクルタイムにおける繰返し精度の検証

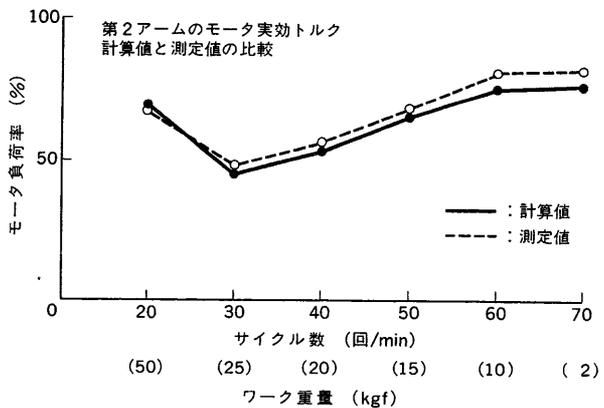
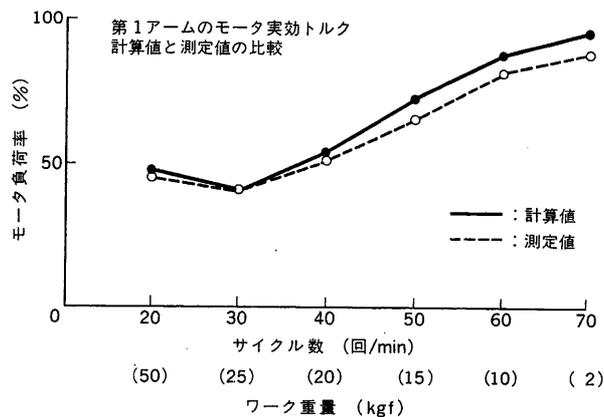
サイクルタイムの目標値は、標準軌道往復 0.86 s と設定している。他社製品の 1.0 s に対し 1.17 倍の速度アップであり、サイクル数で表現すれば、60 回/min から 70 回/min への向上である。この最短サイクルタイムにおいて、停止位置の繰返し精度及び軌道繰返し精度を測定した。

停止位置の繰返し精度は、ロボットのアーム先端の停止位置を距離センサにて測定した。

軌道の繰返し精度は、ロボットのアーム先端にペンを取付け画板上に軌跡を描かせ測定した。図6に示すとおり高精度の繰返し精度を実現した。

8. あとがき

包装ライン用と専用化することにより軌道条件を単純化して設計条件をスリム化し、動力学から負荷条件を明確化して部材へ掛かる力を詳細に解明することにより、軽量でバランスの良い構造を実現した。最短サイクルタイム 0.86 s (標準軌道往復) と最大可搬重量 50 kgf のハンドリングロボットを開発した。



最短サイクルタイムでの繰返し精度測定結果

停止位置繰返し精度結果	± 0.07 mm
軌道の繰返し精度結果	± 0.15 mm

図6 試作検証結果 運動方程式の精度検証結果及び最短サイクルタイムでの繰返し精度測定結果を示す。
Test results

開発した本体に対し、ティーチングデータの編集などの機能をソフト的に付加していき、ロボットの玉成を進めていく。

参考文献

(1) Craig, J. J., ロボティクス, 共立出版 (1991) p.155