

博士論文

生産機械における運動生成と制御の
高機能化に関する研究

Study on Improvement of Motion Generation and Control
for Production Machine

金沢大学大学院自然科学研究科

氏 名 疋津 正利

提出年月 2016年6月27日

Abstract

A production machine is one of the most important elements of automation technology. In this research, it's considered about improvement of motion generation and control for the production machine. The spots of this research are the following 4. First : The servo mechanism is compared with cam mechanism in indexing motion, and the cam curved line which considered drive reaction force is proposed. Second : The effect of the current limit and the current feedback are considered. Current limit is a necessary element to protect a circuit in the amplifier, but it has a nonlinear influence on a control system. Third : Realization of soft lift motion in a power assist lift. It's important to reduce the impact force in the lift motion. Forth : Improvement of the pick-and-place motion by a robot. The robot is one of the most important production machine, and the pick-and-place motion is the most typical motion for the robot. The precision of the pick-and-place motion to the stacked objects is improved. Improvement of motion generation for the production machine is considered in these 4 spots, and improvement of control of the production machine is considered.

1. 緒言

日本の工業は自動機械に代表される生産技術の発展と共に成長してきている。特に生産ラインにおける自動化技術において、その発展は目覚ましいものとなっており、それらの技術は様々な分野にも応用されている。生産機械に必要とされる要素技術として最も基本となる技術はアクチュエータの制御であり、様々な環境および対象物の測定とその情報のフィードバックになる。これらのメカトロニクス技術は様々な対象物と様々な環境に対して柔軟に対応出来るフレキシビリティの高さから、生産機械の発達に大いに貢献している。生産機械の発展と共に生産機械が扱う物の多様化が進み、生産機械自体の動きの複雑化、扱う情報の複雑化も進んできている。このため、生産機械の高機能化を考える場合にそれを構成する各要素技術自体の高機能化を考えた上で、それらの要素技術を取りまとめたシステムとしての高機能化を図ることが大事となる。

本研究は生産機械に必要とされる様々な要素技術の高機能化、およびそれら要素技術を統合して運用するシステムの高機能化を目指す。そのため、基本となるアクチュエータに関する要素技術から、それらをシステムとして応用的に運用するロボット技術を範囲として、以下の項目にスポットを当て、各要素技術における高機能化に関する検討、および考察を行う。

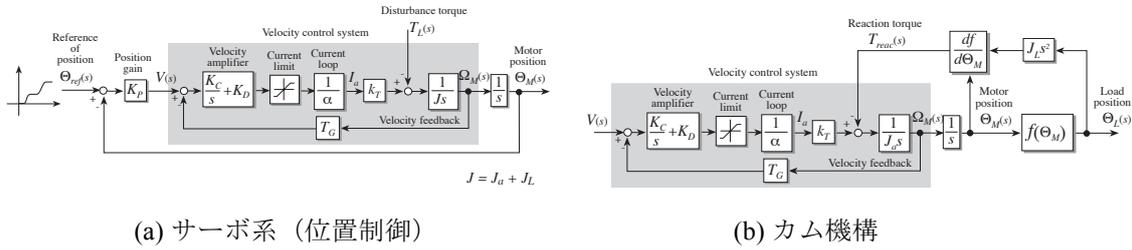
- 高速位置決めのための要素技術であるカム機構と汎用性の高いサーボ系の比較と検討。
- メカトロニクス技術の基本となるサーボ系含まれる電流制限と電流フィードバックに関する考察と応用。
- 重量物を搬送することに利用されている搬送リフトのためのパワーアシスト技術における制御系の改善と考察。
- ロボットを用いたピッキング作業を行うシステムの高機能化に関する検討。

尚、本要旨では紙面の都合上、一部のみを取り上げる。

2. 間欠運動の高速化に関する考察

近年のメカトロニクス技術の発展に伴い、機械運動の全てを制御を主体としたメカトロニクス技術によりその目的を達してしまおうとする機構設計の考え方も普及してきているが、間欠運動を得るのに本研究ではサーボ系を構成したメカトロニクス系を用いる場合と、カム機構によるこれまでの手法により間欠運動を得る場合とを比較することにより、間欠運動の高速化における性能を評価する。固有振動数が比較的低いロボットアーム等の運動制御においては仮想的なカム曲線制御を用いて運動の高速化による残留振動の発生を少なくする研究もされているが、機械系の間欠運動の中には同じ量の移動を速くかつ正確に繰り返し行うことが求められることも多い。こうした間欠運動においてサーボ系とカム機構に同等の位置決め精度を与えることを前提とし、どちらの方式がより高速化が可能であるかを考えてみることにする。これより本研究では、ほぼ同程度の駆動源を用いて同じ大きさの負荷を駆動する場合を考え、サーボ系とカム機構のそれぞれの方式がもつ特徴と同時に、どちらの方式が間欠運動の高速化に有利であるかを明確にすること

を試みる.



(a) サーボ系 (位置制御)

(b) カム機構

図 1 間欠運動のブロック線図

表 1 速度制御システムのパラメータ

Parameter	Symbol	Value
Inertia of motor	J_a	$5.586 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Max. of current	I_{\max}	3.5 A
Torque constant	k_T	0.188 N · m/A
Current feedback gain	α	2.0 V/A
Tachometer generator coefficient	T_G	0.0668 V/(rad/s)
Inertia of load	J_L	$5.586 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

図 1(a)にサーボ系を利用して間欠運動を得るための位置制御系のブロック線図を、図 1(b)にカム機構による間欠運動を定量的に評価するためのブロック線図を示す. 各ブロック線図中に含まれる速度制御システムの各パラメータの値を表 1 に示す. 各ブロック線図から得られる伝達関数は以下の様に与えられる.

$$\text{サーボ系: } \Theta_M(s) = \frac{A_4 s + A_5}{A_0 s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3} \Theta_{ref}(s) - \frac{\alpha s}{A_0 s^3 + A_1 s^2 + A_2 s + A_3} T_L(s) \quad (1)$$

$$A_0 = \alpha(J_a + J_L) = \alpha J, A_1 = k_T T_G K_D, A_2 = k_T(T_G K_C + K_P K_D), A_3 = k_T K_P K_C, A_4 = k_T K_P K_D$$

$$\text{カム機構: } \Omega_M(s) = \frac{k_T K_D s + k_T K_C}{\alpha J_a s^2 + k_T T_G s + k_T T_G K_C} V(s) - \frac{\alpha s}{\alpha J_a s^2 + k_T T_G s + k_T T_G K_C} T_{reac}(s) \quad (2)$$

ここで間欠運動時にモータが消費するエネルギーの指標として次式に示す様なモータ電流値 I_a の 2 乗の積分値を定義する.

$$L_M = \int_{t_0}^{t_1} I_a^2 d\tau \quad (t_0 < t \leq t_1) \quad (3)$$

ただし、 t_0 はインデックス開始時間、 t_1 はインデックス終了時間である. 図 2 にサーボ系およびカム機構に対してインデックス速度として 8, 12[index/s]を与えた時のそれぞれの間欠運動における負荷の回転速度 ω_M とその時の変位 θ_M および駆動モータの電流値を示す. ここで、図 1(a)のサーボ系は 70Hz 付近までフラットな動特性を持つ位置制御系として設計しており、図 1(b)のカム機構に含まれる速度制御系の積分ゲイン K_C と比例ゲイン K_D は位置制御系と同じ値を使用している. 図 2(a)より、割り出し時間 $0.042\text{s} = 24\text{Hz}$ である 8 [index/s] においてもすでに目標値としての ω_{ref} , θ_{ref} との間に大きな遅れが見られ停留時間が短くなってしまっている. 割り出し時間 $0.027\text{s} = 37\text{Hz}$ である 12 [index/s] まで速度を上げると駆動用モータに流れる電流値がその限界値

(±3.5A)に達してしまい間欠運動性能を著しく劣化させてしまっており、本研究で設計した位置制御系では12[index/s]までの速度を得ることは実用上困難であることがわかる. 図2(b)中に示す ω_{ideal} および θ_{ideal} はカム機構において入力軸モータの速度変動が全く無いとしたときの理想的なカム曲線である. モータ軸の回転変動および駆動用モータの電流値はインデックス速度の上昇に伴って大きくなっており, その結果として出力軸側のカムの加速度曲線は歪み, 加速側と減速側とで非対称になってくるが, 12[index/s]まではカム曲線の速度および変位はそれぞれ ω_{ideal} と θ_{ideal} とほぼ等しくなっており, サーボ系を利用した間欠運動と比較すればほぼ理想的な間欠運動が得られているといえる.

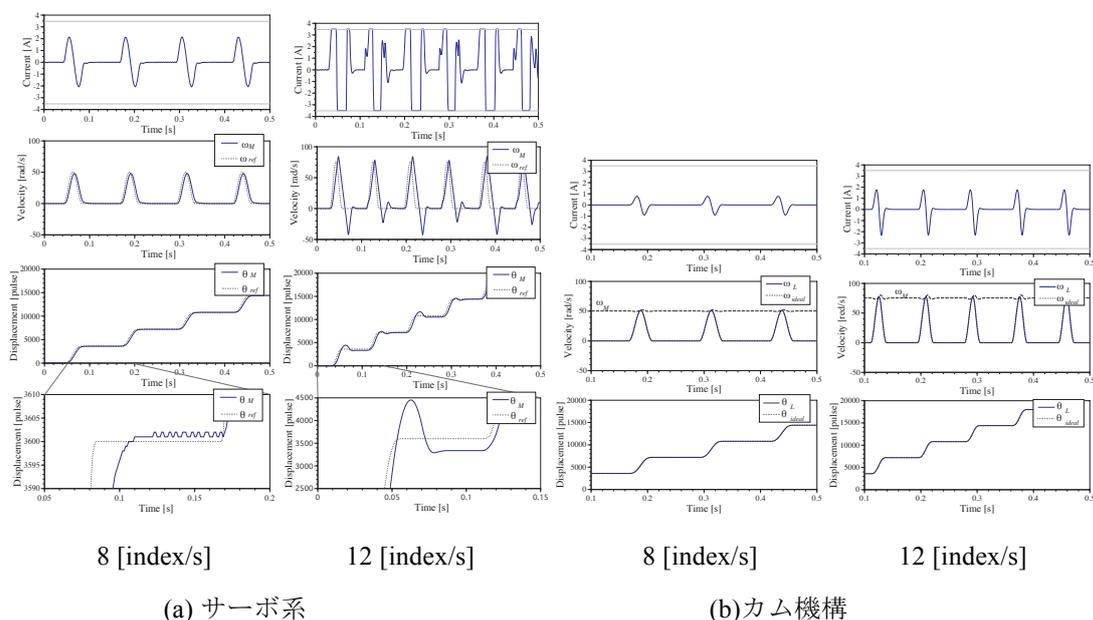


図2 各機構における間欠運動

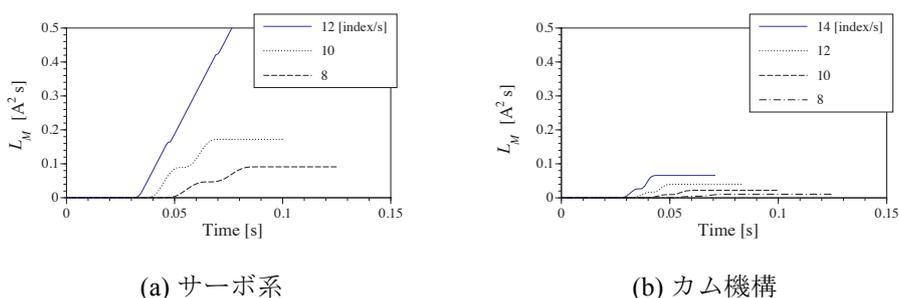


図3 モータの消費エネルギー

図3に式(3)で定義したそれぞれの機構における消費エネルギーを示す. 図3(a)と(b)を比較してわかるようにカム機構を用いた方がサーボ系を用いた場合よりはるかにその消費エネルギーは小さくなる. サーボ系を用いて得る間欠運動においては図2(a)に見られるようにその運動の高速化の限界は駆動用モータに流れる電流の大きさであり電流がその限界値に達する速度が高速化の限界であった. これに対してカム機構においてはモータに流れる電流値がその限界を超えるよう

なインデックス速度を得ることが可能である。ただし、入力軸であるモータ軸の回転変動 ω_M に伴い出力軸側のカム加速度曲線 θ_L が歪み、加速側が小さく減速側が大きくなるといった非対称な加速度特性を示し、出力軸側の加速度 α_L は理想とするカム曲線 α_{ideal} からはかなり歪曲された加減速を行ってしまっている。本研究では運動時に得られるカム曲線の歪曲を小さくする方法としてカム機構に与えるカム曲線の減速時間を伸ばし加速側と減速側とで非対称にすることで実際に出力されるカム曲線の歪曲を抑えることを試みる。図4に提案する非対称な加速度曲線と、高速な間欠運動に対して従来のカム曲線と提案するカム曲線を適用した場合のカム曲線の歪曲の比較を示す。図4からわかる様に、減速時間を伸ばすことによりインデックス減速時に入力軸に加わる駆動反力を低減することで、入力軸側の速度変動が小さく抑えられ、出力軸側で出力されるカム曲線の歪曲も小さく抑えられている。

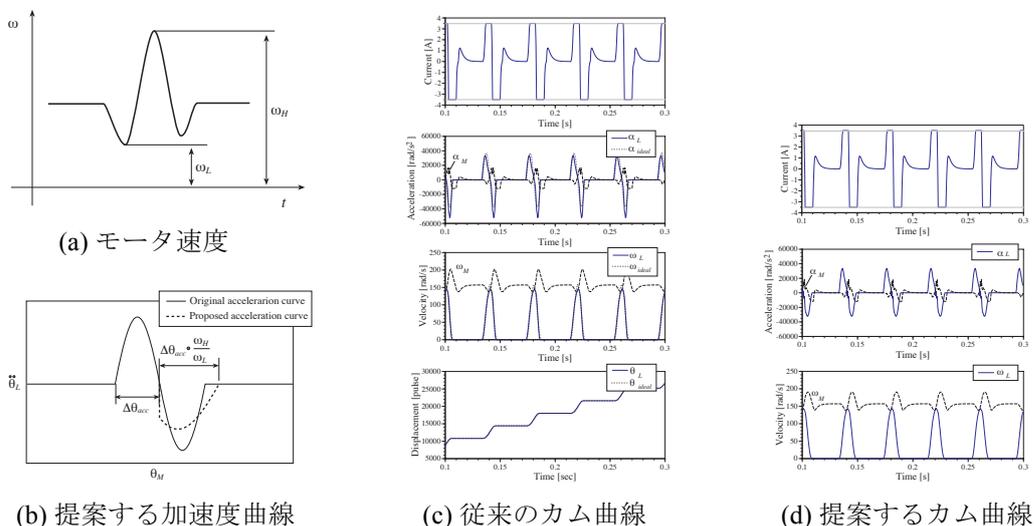
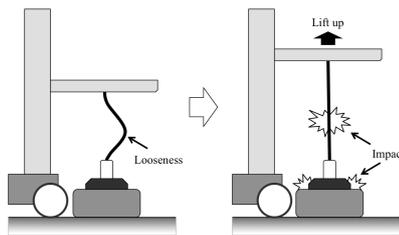


図4 非対称なカム曲線



(a) 真空吸着式パッド



(b) 搬送リフトを用いた吊り上げ

図5 真空吸着式搬送リフト

3. 真空吸着式搬送リフトのためのパワーアシスト技術の改善

工場内や倉庫内での重量物の搬送装置の一つとして懸垂機構をもつ搬送リフトがある。中でも図5(a)に示すような真空吸着式のパッドを利用した真空吸着式のリフトが普及してきている。搬送リフトにおいては使用者が高重量な物体を持ち上げる装置であるため、まず持ち上げ時において使用者にかかる重量負担をできるだけ小さくすることが求められる。こうした要求を満たすた

めにクレーンのようにモータの駆動力を応用して重量物を持ち上げるパワーアシスト付きの搬送装置の開発がこれまでは一般的であった.しかしこの方式には基本的に持ち上げられる対象物が持ち上がる瞬間に受ける衝撃力が考慮されていない.すなわち図 5(b)に示すように搬送用リフトにおいては持ち上げ以前には吊り上げロープがたるんだ状態であり,このため引き上げ動作時にそのロープのたるみがなくなった瞬間にロープが急に引っ張られ,その時に急激な衝撃力が発生してしまう.持ち上げられる対象物の材質等によってはこうした衝撃力は緩和されることが強く望まれる.本研究ではこうした問題に対してパワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装し,引き上げ時の衝撃力を緩和する試みを行った.パワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装することによって吊り上げられる対象物が受ける衝撃力は小さくなると同時に柔らかい材質の物体はゆりかごのようにソフトに動くことになり,パワーアシスト装置に安全性を与えることが期待できる.コンプライアンス制御を実装した本研究で提案するパワーアシスト装置のブロック線図を図 6 に示す.パワーアシスト用の操作レバーに取り付けられた歪ゲージにより介助者の意図である微小な操作力を検出し,制御装置へ入力する.

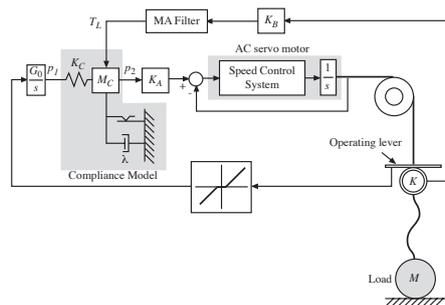
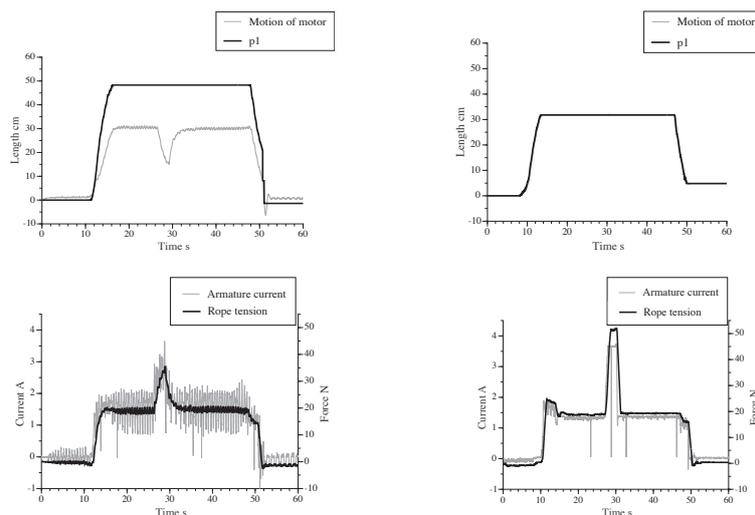


図 6 コンプライアンス制御を実装したパワーアシスト装置のブロック線図



(a) 張力フィードバックあり

(b) 張力フィードバックなし

図 7 コンプライアンスモデルを用いたパワーアシスト

コンプライアンス制御の効果をパワーアシストに活かすために吊り上げ時に受けるロープ張力

をセンサあるいはモータの電流値などで検出し、この値をコンプライアンスモデル部の質量 (M_C) に外乱力 (T_L) としてフィードバックすることによりコンプライアンス制御の効果を引き出すことにした。負荷荷重 (M) によりロープ張力 (T_L) が発生すればコンプライアンスモデル内の質量 (M_C) は動き、結果としてロープにかかる張力を大きくしない方向にモータを動かすことができる。ロープ張力である外乱力 (T_L) がコンプライアンスモデル中のばね (K_C) による復元力と釣り合う時点まで質量 (M_C) の移動は止まり、その後に負荷 (M) が持ち上げられ始めることになる。こうした運動をモータに発生させることによって吊り上げロープのたるみがなくなってロープが引っ張られた瞬間に発生する負荷 (M) への急激な衝撃力を緩和することができる。図 6 の系を用いてパワーアシストを機能させた負荷の持ち上げ制御実験を行った結果を図 7 に示す。制御をスタートさせて約 6 秒後に負荷の持ち上げ動作を約 10 秒間行い、その後負荷を吊り上げた状態を約 30 秒間維持している。次の約 5 秒間で負荷を下降させ元の床の位置に着地させている。負荷の持ち上げ動作時間の方が下降に要する時間より長いのは最初にロープがたるんでおり、その分のロープをモータが巻き取らなければならないためである。図 7 には比較のためにロープ張力をフィードバックする場合としない場合を示している。また、実験のスタート後約 30 秒後に負荷 (M) を故意に 5 秒間ほど重力方向に引っ張っている。制御スタート時点ではコンプライアンスモデルへの入力値 (p_1) とモータが巻き取ったロープ長には大きな差が見られないが、約 10 秒後からその差が次第に大きくなる。これはロープの初期たるみ量がなくなった後にコンプライアンスモデルの質量 (M_C) に働く外乱力としてのロープ張力の増大に伴ってコンプライアンスモデル中のばね (K_C) が次第に引き伸ばされていることを示している。この間のロープを巻き取るモータの運動は p_1 である操作力の積分値の運動に比べ比較的ゆっくりとした運動になっている。こうした運動が制御系中のコンプライアンスの効果であり、ロープが急に引っ張られることによって生ずる衝撃力を緩和してくれることになる。張力フィードバックなしの結果と比較しても持ち上げ時の衝撃力が緩和されていることがわかる。

4. ロボットハンドリング技術の高機能化

ロボットを用いた作業の中では対象物を掴んで移動させるというピック&プレース作業が最もよく行われる。大量生産型の生産ライン等ではピック&プレース作業を効率化させるために部品配列装置を用いられるが、多品種変量生産や家庭内にロボットが進出していった場合を考えると、コストやスペース的に配列装置を適用できない問題がある。このため、本研究では対象物が整列されずに雑多に置かれ、あるいは積み重ねられているような状況でのピック&プレース作業の高機能化を検討する。対象物が積み重ねられている様な状況においては、対象物の 3 次元情報を知る必要があることから、システム全体の流れは(1)3次元環境の計測、(2)対象物の 3次元位置・姿勢の認識、(3)干渉を考慮した対象物のハンドリング計画となる。これら一連の処理においていくつかの工夫をすることにより、物体認識の精度の向上とハンドリング計画の簡易化を行う。

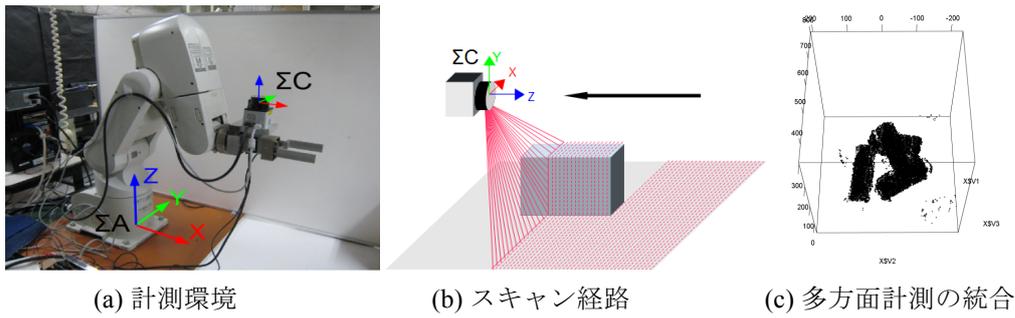


図 8 3次元環境の計測

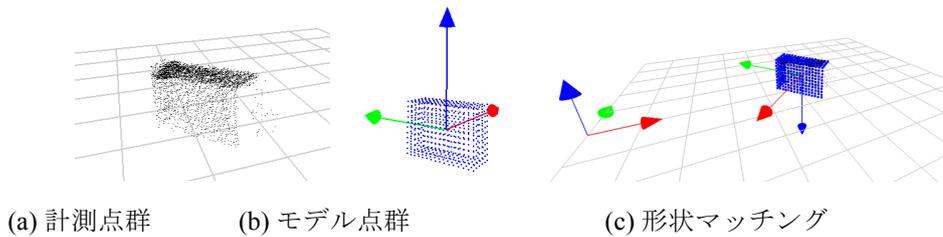


図 9 対象物の 3次元位置・姿勢の認識

図 8 に 3次元環境の計測方法を示す。ロボットアームの手首に LRF（レーザ式測距センサ）が取り付けられており、ロボットの自由度を利用して LRF のスキャン面を移動させることで環境の 3次元計測を基本としている。隠れ問題を極力小さくするために、多方面からの計測結果を統合したものを認識に利用している。図 8(c)に示される様に、対象物は 3次元の点群情報として得られる。本研究ではロボットで把持する対象物は既知であるという条件で対象物の認識を行う。計測点群に対して、対象物のモデルも図 9(b)に示す様に点群情報として与え、ICP アルゴリズムを用いた形状マッチングを行う。ICP アルゴリズムの評価関数としては次式を用いる。

$$e^{(m)} = \frac{\sum \Delta e}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N |p_{k_i^{(m)}} - q_i^{(m)}|}{N} \quad (4)$$

ここで、 e はモデル 1 点あたりの距離、 p は計測点群、 q はモデル点群、 N はマッチングに使用するモデル点群、 m は繰り返し計算の試行回数、 k_i はモデル点群中の i 番目の点に対応する計測点である。一般的な ICP では単純に Δe の総和を用いるが、本研究ではモデルに対してもセンサ視点から見える点のみ使用することで認識精度の向上を図っている。このため、マッチング中にモデル点数 N が大きく変化するため、対応点間距離 Δe の平均値 e を評価値として用いている。この評価値 e に対して閾値を設定し、その閾値を下回ることでマッチングの可否を判断することを基本とする。ただし、閾値の設定の妥当性の問題や、バラ積み環境の様に対象物同士が極めて近い位置に複数存在する場合にはローカルミニマムが生じやすいという問題があるため、本研究では閾値はあくまでも目安として用い、複数の認識結果を総合的に判断することで認識の精度を向上させる。複数の認識結果を用いることでセンサの測定誤差をある程度許容できるようになる。図 10 に円柱を複数積み上げた環境に対して複数回の認識を行った結果の例を示す。例では 16 回中

閾値を下回った結果が7回であり、閾値以上の結果は基本的にローカルミニマムな結果となっている。これらの結果に対して、センサの精度内で十分に同じ位置であり、事前情報として与えられた同じ姿勢と見なしてもよい姿勢の結果を統合したものが図 11 となる。ここで、ロボットでの作業を考え、より上部に存在し、よりロボットに近い物から順に優先順位をつけることで、複数の認識結果に対して把持の優先順位を決定している。

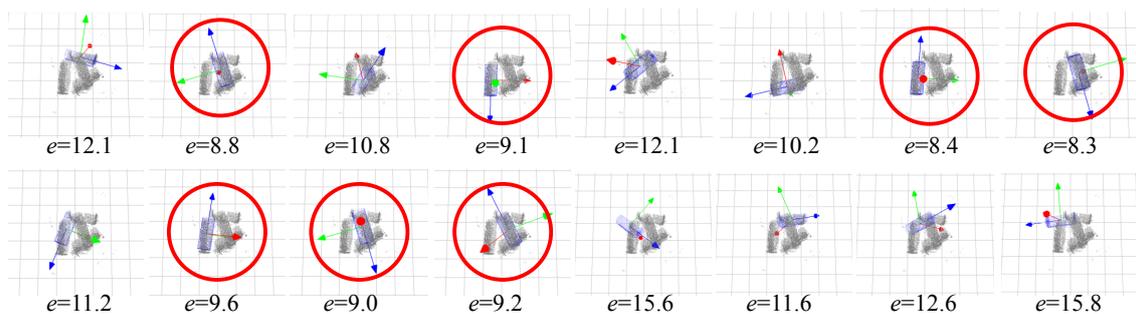


図 10 複数回認識の結果例

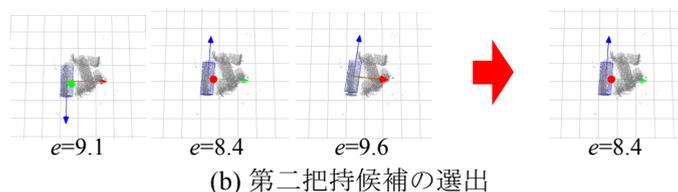
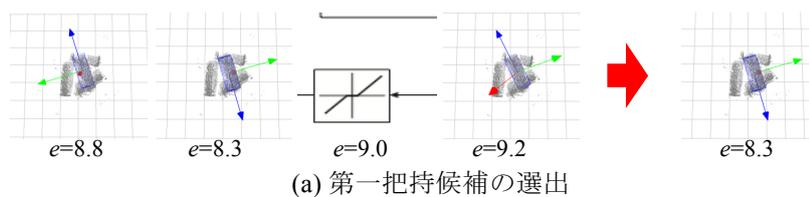


図 11 認識結果の統合と把持候補の選出

得られた認識結果を用いて、把持位置の探索とアプローチ経路の探索を行う。本研究ではロボットのハンドとして最も一般的に用いられている 2 指グリッパハンドによる把持を対象とし、その把持位置の探索を簡便化するために図 12 に示すような把持軸を事前情報として与えることにする。把持軸の長さや方向は並進方向の探索範囲と探索方向、与えられた方向ベクトルは回転方向の探索範囲として軸の位置と数を含めユーザが任意に設定する。

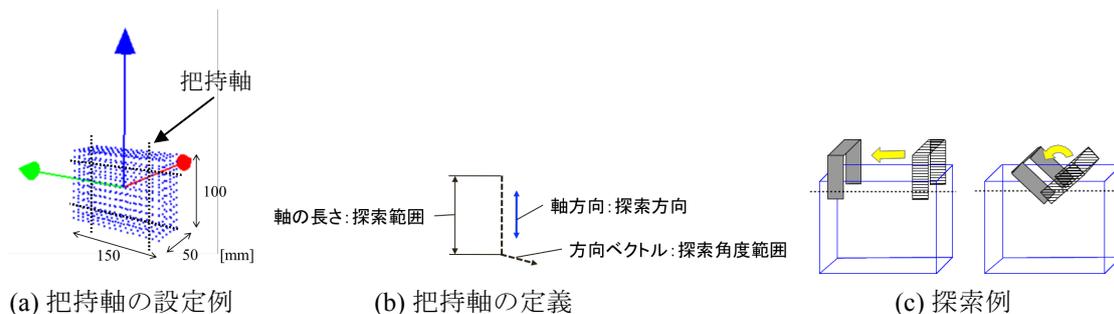
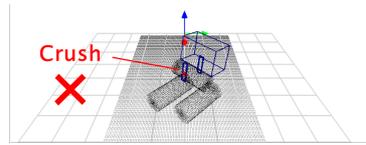


図 12 把持軸の設定例，定義および把持位置の探索例



(a) アーム干渉判定モデル



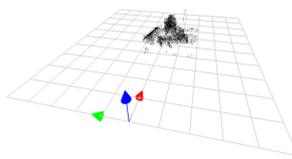
(b) 環境点群との干渉評価例

図 13 干渉判定モデルを用いた干渉評価

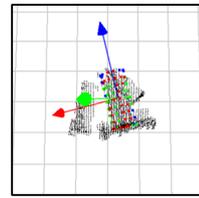
図 12(c)に示す様に把持軸を把持位置の探索の基準として用いることで、把持位置の探索を簡便化している。また、このとき図 13 に示す様な干渉判定モデルを用いて対象物以外との干渉判定も同時に行っている。これらの一連の流れを検証した実験結果を図 14 に示す。円柱が積み上げられた環境に対して、ロボットの自由度を利用した 3 次元計測を行い、得られた計測点群に対して把持対象物の認識ができていることがわかる。認識結果から干渉判定を含む把持位置探索によりロボットの動作計画を行うことで、実際のロボットによる把持を可能とした。



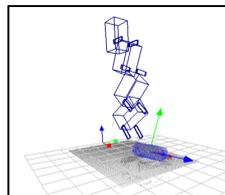
(a) 実験環境



(b) 計測点群



(c) 認識結果



(d) 動作計画



(e) 実行結果

図 14 積み上げられた環境におけるハンドリング計画の実施例

5. 結言

本研究では生産機械の高機能化を目指し、生産機械の構成要素の基本となるアクチュエータに関する要素技術から、それらをシステムとして応用的に運用するロボット技術を範囲として、以下の項目にスポットを当て各要素技術における高機能化に関する検討と考察を行った。

(1) 間欠運動の高速化に関する考察

メカトロニクス技術の発展に伴い、機械運動の全てを制御を主体として目的の運動を得ようという考え方が普及してきているが、生産ライン等においては同じ量の移動を高速かつ正確に繰り返し行うことが求められる間欠運動を行うことも多い。そのため、間欠運動を対象にしてサーボ系とカム機構を比較検討を行い、間欠運動の様に一定の加減速を繰り返す運動ではサーボ系に比べてカム機構を利用する方がモータの消費エネルギーを小さくかつ高速化が可能であることを示した。カム曲線を減速時間を伸ばして加速側と減速側とを非対称にすることで入力軸であるモー

タ軸の回転むらがあっても出力軸における加減速の歪曲を解消することができることを示した。

(2) サーボモータ系に含まれる電流制限と電流フィードバックとの関連に関する考察

生産機械のアクチュエータとしてサーボモータを使用することが増えてきており、一般的なサーボドライバには過電流に対してモータやドライバを保護する目的から、ドライバ回路内に飽和要素を設けて、モータに流れる電流値に制限を与えている。実際のサーボモータの利用状況においてはこの電流飽和の影響を無視することができない。しかしながら電流フィードバックを与えることにより、モータが発生する誘起電圧の影響を無視することができるようになるため、モータが発電機として動作する場合の回生エネルギーについて考慮する必要はなく、かつサーボドライバ内の動作電圧を低下させることができ、サーボドライバ中の操作量飽和に対する影響を小さくできることを示した。

(3) 真空吸着式搬送リフトのためのパワーアシスト技術の改善

工場内や倉庫内での重量物の搬送装置の一つとして真空吸着式の搬送リフトを対象にして、荷物の引き上げ時に生じる衝撃力を緩和するためにパワーアシスト装置の中にコンプライアンス制御を実装する手法を提案した。本研究ではサーボゲインを大きくした位置制御系を用いて外乱に対して強いモータ軸の回転を得ることで安定性を確保している。その一方でコンプライアンスモデルを計算機中に構成し、ロープ張力以外の不必要な外乱のないコンプライアンスモデルからの出力を AC サーボモータへの位置指令値として与えることによりパワーアシストのためのコンプライアンス制御を実現した。この結果非常に柔らかいコンプライアンス制御が実現できることを示した。

(4) ロボットハンドリング技術の高機能化

ロボットアームに要求される動作には物体を把持し別の場所へ置くといったピックアンドプレースの動作が多く、近年ではその作業環境も多様化してきているため、考慮しなければならない点が増えてきている。特に家庭内の様に雑多に物が置かれている状況を対象として、事前に与えたモデルを用いた形状マッチングを基本として、複数回の認識結果を総合的に判断することにより、認識精度の向上を行った。ロボットの動作計画においては把持をするための把持情報を用いてロボットハンドとして最も一般的な 2 指グリップハンドを対象とした把持位置の探索方法を提案した。また、ロボットアームに干渉モデルを設定し、より簡単に干渉問題の回避した軌道の生成を行えることを示した。ただし、認識における限界や現状では不可避な干渉問題も存在することが分かった。

以上の結果、生産機械において必要とされる要素技術の内、生産機械の動作の基本となるサーボ技術の高機能化と、様々な要素技術を組み合わせてシステムとして応用的に運用されるロボット技術における高機能化を実現することができた。

学位論文審査報告書（乙）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

生産機械における運動生成と制御の高機能化に関する研究

(Study on Improvement of Motion Generation and Control for Production Machine)

2. 論文提出者 氏名 ^{かりがな} ^{ひき} ^づ ^{まさ} ^{とし}
足津 正利

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成28年8月3日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文及び関係資料について詳細に検討した。さらに、同日に行われた口頭発表後に、第2回学位論文審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

IT化を含め、生産ラインにおける自動化技術の発展はとどまるところを知らない。本研究では、生産の多様化・複雑化に対応するため、基礎となるモータの制御からロボットの運動生成にいたるまで幅広く、生産機械の高機能化に取り組んでいる。まず、高速位置決めのための間欠運動に着目し、サーボ系とカム機構の比較検討を行って、カムを利用する方がモータの消費エネルギーを小さくでき、加減速を非対称にすることで回転むらを少なくできることを示した。制御理論ではあまり扱われないサーボ系の電流制限に関する考察では、電流フィードバックが飽和を抑えることや意図的に電流制限することで簡易に位置制御と力制御の両立が可能であることを指摘している。また、懸垂型搬送リフトのパワーアシスト制御では、衝撃力を緩和するための新しいコンプライアンス制御を実現した。さらに、ロボットによる多様な対象物のピッキング作業に関し、3次元点群を得るためのレーザ距離センサのついたアームの運動生成や点群から対象物を認識する精度を高める工夫を行い、グリップによる把持位置や接近軌道の探索方法を提案した。

以上のように、本論文は生産機械の制御や運動生成に関して有用な知見を得るなど、工学的な価値が高く、博士（工学）に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）