

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月23日現在

機関番号：12102  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009～2012  
 課題番号：21560257  
 研究課題名（和文） 衝突を利用するマニピュレーション

研究課題名（英文） Research of Impact Manipulation

### 研究代表者

相山 康道 (AIYAMA YASUMICHI)  
 筑波大学・システム情報系・准教授  
 研究者番号：60272374

研究成果の概要（和文）：ロボットマニピュレーションに衝突を利用することで、瞬間的に大きな力を出せる、弾くことで高速度を対象物に与えることができる。しかし衝突により機械本体にも撃力が加わり機構やアクチュエータが破壊される危険があるため、各アクチュエータ部にクラッチを導入することでアクチュエータを守ることができる。さらにはスイートスポット手法、劣駆動手法を用いることで、導入するクラッチを減らし、軽量化することができる。

研究成果の概要（英文）：Usage of impact for robot manipulation brings some merits; instant very large impact force can be generated, faster speed of object by hitting by robot arm, etc. But, since the mechanism itself has also the impact force, the mechanism or its actuator will be damaged. In this research we introduce clutches into each joint to isolate the actuators from impact force. Sweet spot method and under-actuated manipulator are introduced to reduce number of clutches.

### 交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 1,100,000 | 330,000   | 1,430,000 |
| 2010年度 | 900,000   | 270,000   | 1,170,000 |
| 2011年度 | 800,000   | 240,000   | 1,040,000 |
| 2012年度 | 700,000   | 210,000   | 910,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学機械システム

キーワード：マニピュレーション，衝突，撃力

### 1. 研究開始当初の背景

ロボットアームによる物体操作(マニピュレーション)は、古くから生産ライン等で行われているピックアンドプレイス型のものが現在でも主流である。このような手法は動作の確実性は高いが、対象物は片手で持ち上げられる程度に小さく、軽いものでなければならず、また、対象物の運動はグリッパに固定されるため、グリッパがとり得る位置・姿勢にしか操作できない。

これに対し人間は実に様々な手法で、器用に操りを達成している。人間の器用な操りの一つとして、うまくエネルギーを蓄えることによる物体操作がある。物体の慣性などの動特性を利用した動的マニピュレーションの多くは、このような原理に基づいている。例えばソフトボールのピッチャーが腕を1回転以上させて放り投げる動作も、短い時間ではボールに十分な運動エネルギーを与えられないためのものである。ロボットにおいては、

用いられているアクチュエータの重量に対する出力比が人間や動物に比べ低いため、そのパワー不足を補う手法は重要となる。

蓄えたエネルギーを物体操作に利用する方法としては、投げ操作のように対象物体にも同様に運動エネルギーを蓄えさせ、ロボットから切り離して操作する手法と、まずロボットだけが運動エネルギーを蓄え、それを打撃により瞬間的に対象へ与えることにより大きな力を与える手法が存在する。特に後者はより大きな力や運動エネルギーを対象へ与えることが可能である。瞬間的に大きな力を伝えるために、遠くへ弾く、重摩擦環境下でも摩擦に打ち勝って動かす、破壊する/破断させる、などの操作が可能と思われる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、器用なロボットマニピュレーション(デクストラ・マニピュレーション)の一種である動的マニピュレーションの新たな手法として、「衝突を利用するマニピュレーション」を提案し、実際にこのようなマニピュレーションを利用するアプリケーション(圧入組立、釘打ちなど)を示すことである。衝突を利用することでロボットの問題点であるパワー不足を補うことができ、これまでにない分野へロボットを導入することも可能となる。ただし衝突を利用するためには、衝突の際に生じる撃力の問題が不可避であり、撃力による機構の破壊、過大な力・トルクの発生を避ける手法の開発が必要である。本研究ではこのための機構及びアルゴリズムを開発し、実機による検証実験を行う。

## 3. 研究の方法

以下の3つの課題について研究を進めた。

### (1) インパクト・マニピュレーションによる圧入作業の実現

①インパクト・マニピュレーションの力学的性質の解析と、スイートスポット打撃手法の提案

②劣駆動マニピュレータの利用法の提案

③衝突による圧入物の運動解析・シミュレーション・実験

④望みの圧入量を得るための劣駆動マニピュレータの軌道生成

(2) 衝突を利用したマニピュレータ手先運動の高速化

①マニピュレータ手先の見かけの慣性を考慮した衝突モデルの構築

②衝突位置による手先運動の変化

③2 関節マニピュレータによる衝突実験

(3) 撃力を利用した重量物微小移動機構

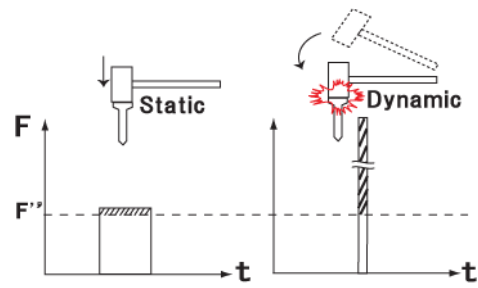


図1 衝突の利用メリット

## 4. 研究成果

### (1) インパクト・マニピュレーションによる圧入作業の実現

①インパクト・マニピュレーションの力学的性質の解析と、スイートスポット打撃手法の提案

インパクト・マニピュレーションとは、衝突による撃力を用いたロボットマニピュレーションである。インパクト・マニピュレーションの特徴として、瞬間的に大きな力を対象物に伝えることができることがあげられる。図1において、左右どちらも同じ力積が物体に加わるとする。左図は小さい力を長時間加えた状態を示しており、右図は非常に大きな力を瞬間的に加えた状態を示している。摩擦などの抵抗力が働く「釘打ち」や圧入作業には、これらの抵抗力を越える力が必要とされ、図1の斜線部が釘を打ち込む仕事に寄与できる。この場合、衝突を利用するほうが、無駄になる力積が少なく、効率の面から有効である。

しかし衝突を利用することにより、衝突時の撃力によってマニピュレータのリンクや関節、特にモータやギアボックス等の駆動系部分が破壊される危険がある。これは、衝突によって関節軸に急激な速度変化、角速度変化が生じることが原因である。

このための対策として、図2に示すようないわゆるスイートスポットで打撃をすることを提案する。スイートスポットで打撃を行

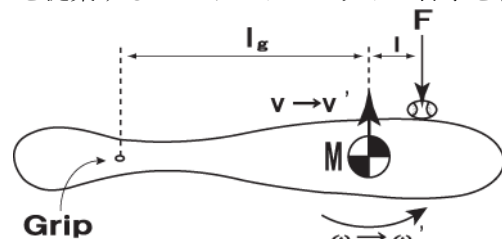


図2 スイートスポットでの打撃

うと、グリップ位置で速度変化が起こらず、撃力が発生しない、という性質がある。この性質を利用することで、先端関節以外に撃力が発生しない状況を作り出すことができる。

### ②劣駆動マニピュレータの利用法の提案

スイートスポットを利用した場合でも先

端関節の角速度は急激な変化を起こすため、この関節にはアクチュエータを接続せず、フリー関節とする。すなわち、マニピュレータ全体を劣駆動マニピュレータとする。これにより、従来手法で必要とされていたクラッチをなくすことが可能となり、小型軽量化を図ることができる。

### ③衝突による圧入物の運動解析・シミュレーション・実験

圧入とは、軸をその外径よりも小さい内径を有する穴に加圧挿入する結合方法である。インパクト・マニピュレーションを用いて圧入作業を行うにあたり、必要な量だけ圧入できることが求められる。そこで衝突時の圧入物の運動のモデルを立てて解析する。

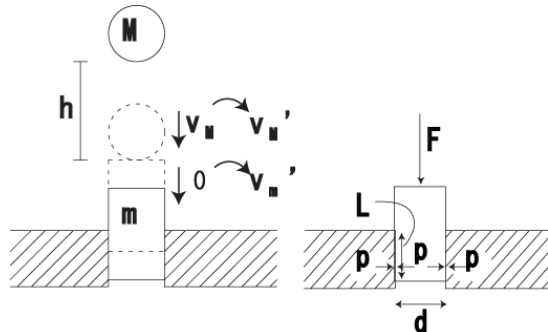
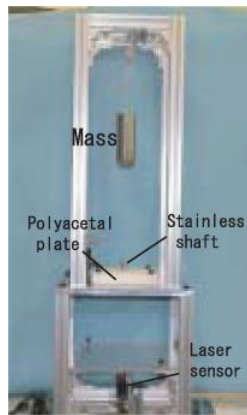


図3 衝突による圧入作業解析

図3のように、高さ  $h$  から質量  $M$  の錘が、自由落下により質量  $m$  の軸に衝突したときの、丸軸丸穴の圧入運動を考える。このときの衝突直前の錘の速さを  $v_M$ 、衝突直後の錘の速さを  $v_M'$ 、軸の速さを  $v_m$ 、反発係数を  $e$  とする。衝突後、軸は初速度  $v_m$  で圧入されすぐに静止する。錘はまだ止まっておらず初速度  $v_M'$  で軸が圧入された分だけ落下し、再び軸と衝突する。この運動が繰り返されるため衝突は多数回行われる。本研究ではこのことを「多重衝突」と呼ぶ。多重衝突は極めて短い時間ではあるが、錘が停止するまで続けられる。最終的な圧入量は、多重衝突時の各衝突の和となる。

軸径  $\phi 8h5$  ( $\phi 7.994 \sim \phi 8.000$ ) のステンレス軸、穴径  $\phi 7.94 \sim \phi 7.9$  のポリアセタール板による、しまりばめを想定したシミュレーションおよび実験を行った。1回の衝突での圧入量を求め、多重衝突が終了するまでの各衝突の圧入量の和を算出する。これを衝突速度を変えて行い、衝突速度と圧入量の関係を検討する。各パラメータは、 $M=443$  [g]、



$m=11$  [g],  $\mu=0.093$ ,  $e=0.65$ ,  $p=10.09$  [N/mm.mm] とした。また軸は予め 1 [mm] 圧入されているものとする。

実験は写真のような装置を用い、錘の初期高さにより衝突初速度を調整し、下部のレーザー距離計により圧入量を計測する。

シミュレーションと実験の結果を図4に示す。

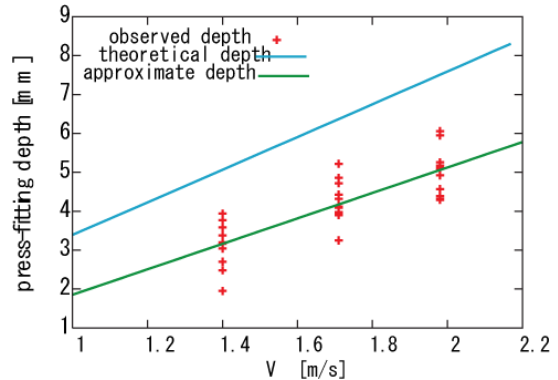


図4 圧入シミュレーション・実験結果

実験値は、理論値よりも小さい値を示した。これは、衝突時に軸が傾いた状態で圧入されたことや、錘が傾いた状態で軸に衝突したことが原因であると考えられる。

### ④望みの圧入量を得るための劣駆動マニピュレータの軌道生成

前章のモデル・シミュレーションより、望みの圧入量を得るための目標の衝突速度が求められることができる。そこで、劣駆動マニピュレータの手先リンクが衝突時に目標の速度を持つような軌道生成を行う。

本研究では常に手先リンクの関節をフリー関節とした3リンク3自由度の劣駆動マニピュレータを用いる。劣駆動であるため、手先リンクの姿勢を第1関節、第2関節のモータで制御する必要がある。そこで動力学モデルを立てシミュレーションを構築する。図5のように振りかぶり姿勢を経て衝突姿勢へと向かう軌道を考える。

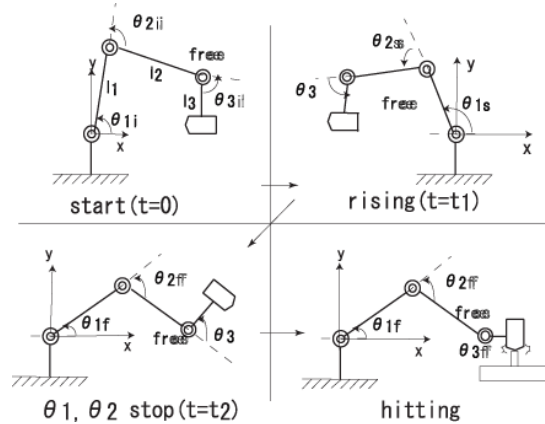


図5 振りかぶり・振りおろし動作

マニピュレータの軌道を生成するためには、振りかぶり時の第1関節角 $\theta_1$ 第2関節角 $\theta_2$ と振りかぶり時刻 $t_1$ 、第1,2関節停止時刻 $t_2$ の各パラメータの値を決める必要がある。しかし、手先リンクの衝突速度が望みの衝突速度となるような、これら4パラメータを求解するには探索範囲が広く、最適解を求めるのは困難である。そこで本研究ではGAによる求解を行った。

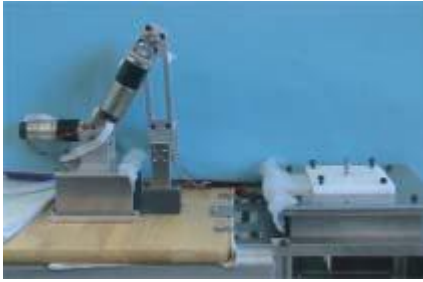


図6 衝突による圧入実験装置

以上に基づき、図6のような実験装置を構築し、実験を行った。劣駆動マニピュレータで軸をたたくことはできたが、GAにより生成した軌道が、用いた劣駆動マニピュレータで実現するには困難であったことにより、インパクト・マニピュレーションにより圧入作業が行えることを強く主張できるまでに至らなかった。

## (2) 衝突を利用したマニピュレータ手先運動の高速化

### ①マニピュレータ手先の見かけの慣性を考慮した衝突モデルの構築

多リンク機構マニピュレータの衝突を考える上で、手先の見かけの慣性は重要な要素である。この手先の見かけの慣性はマニピュレータ手先に着目した場合のマニピュレータの質量に相当する。衝突時の姿勢によって見かけの慣性は変化し、衝突後の発生撃力や手先速度に影響を与える。

本研究は見かけの慣性により衝突時に生じるマニピュレータ手先の速度変化に着目し、これを利用した手先運動の高速化手法を提案する。提案手法ではマニピュレータ手先を壁面に衝突させ、反発により衝突面接線方向に衝突前よりも大きな速度を発生させる。提案手法によりマニピュレータを駆動するモータの性能を越えた手先速度を実現でき、高速な手先速度を活かした質量の小さい物体を弾く操りへの応用が見込まれる。

本研究で扱う衝突モデルについて説明する。モデル化には多リンク機構の衝突現象を扱った文献の手法を用いる。本研究では前提条件を以下の様に設定し、この条件の下モデル化及び解析を行う。(a)マニピュレータは水平2リンク2自由度とし、運動は2次元水

平面内に限定する (b)リンクと衝突対象は剛体とする (c)衝突対象の表面は摩擦のない滑らかな面とする (d)マニピュレータ先端と衝突対象との接触は点接触とする (e)衝突に要する時間は非常に短いとする。

衝突面において摩擦が働かないとすると、このモデルは定式化することで解を求めることができる。すなわち衝突前のマニピュレータの姿勢と手先速度が分かれば衝突後に発生する力積と速度変化を推定することが可能である。

### ②衝突位置による手先運動の変化

前章で述べたモデルを用いて衝突のシミュレーションを行い、衝突位置と手先速度の関係を検証した。衝突点 $P(x, y)$ において第1, 2関節角速度 $\omega_1, \omega_2$ で衝突するものとする。条件として、衝突面はX軸に平行とし衝突方向はY軸負方向に限定する。衝突点Pの位置をX, Y軸方向に変化させて衝突前後における衝突面接線方向の手先速度 $v_{t-}, v_{t+}$ 、手先速度変化 $\Delta v_t$ の値を求めた。

衝突位置によって $\Delta v_t$ の符号が変化した。これは衝突位置に応じて衝突姿勢が変化し、上記の符号が変化するためである。結果を図7に示す。

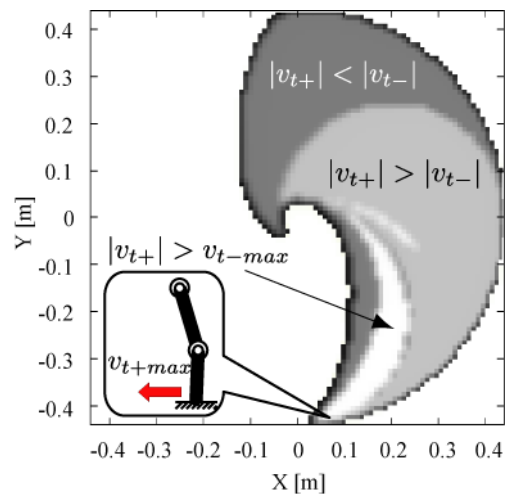


図7 衝突による加速領域と減速領域

図の薄い灰色のエリアでは衝突後の接線方向速度が衝突前よりも上昇し、特に白色のエリアにおいては、衝突前にその位置で出せる最大の手先速度よりも大きな接線報告速度を出せることを表している。ただし、上記枠囲みの図のように、そのようなエリアは接線方向の見かけの慣性が法線方向に対して非常に小さくなっている。

よって、このような提案手法を利用する応用例として、ワークスペース上に置かれたベアリングやカラー等の質量の小さい物体を高速化させた手先で弾き、移動させるマニピュレーションが挙げられる。物体操作に手先

の慣性をさほど必要とせず、物体の運動が衝突時に与えられる初速度に依存するため、提案手法を用いることで高速かつ広範囲な物体移動の実現が見込まれる。

### ③2 関節マニピュレータによる衝突実験

前章で述べたシミュレーション結果との比較及び本研究の有効性の検証のため、平面2リンク2自由度マニピュレータを製作し、衝突実験を行った。

実験用マニピュレータは衝突時に発生する撃力がリンクから駆動系へ伝播し、駆動系が破壊されるのを防ぐため、電磁クラッチを用いた撃力伝播防止機構を採用する。クラッチ切り離し後はフリー関節となりエンコーダによる計測ができなくなるため、各関節軸にポテンショメータを接続し、衝突時及び衝突後の角度情報を取得する。

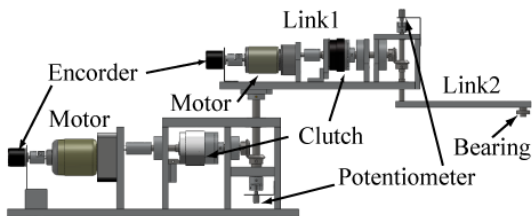


図8 2リンクマニピュレータシステム

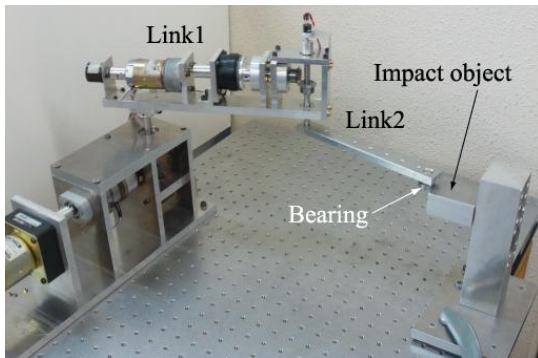


図9 実験外観

図9のように水平面内2自由度マニピュレータを固定された衝突対象へぶつける。接線方向の摩擦をなくすために、ベアリングを取り付けている。この衝突の前後の手先速度を計測し、実際に接線方向速度が上がることを確認する。

図10の結果のグラフより、実際に衝突後に接線方向速度が上昇することが確認された。ただし、その上昇率はモデル・シミュレーションに比較して小幅となっている。この原因としては、フリージョイント部の摩擦や粘性、衝突時のエネルギーがリンクの振動に吸収されたことなどが考えられる。

### (3) 撃力を利用した重量物微小移動機構

衝突を利用したマニピュレーションとして、様々な手段が考えられる。今後行ってい

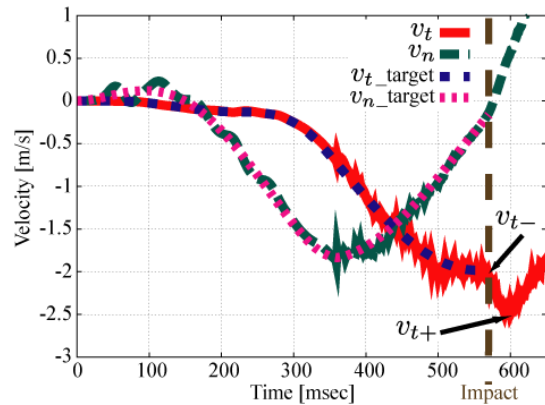


図10 衝突の前後における速度変化

こうと考えている手法としては、重量物を微小量移動させることで、精密な位置決めを行う手法を検討している。

例えば重量のある部品を組付ける際には、クレーンなどで吊るして目的の位置へ運び、静かに降ろしながら人が位置調整をしているのが現状である。しかしこのような方法は吊るされた重量物のそばに人がいる必要があり危険な作業である。そこで、一度クレーンで降ろしてしまい、その後、木づちでたたいて位置調整をするような作業をロボット化することができれば、より安全にかつ自動化したシステムを構築できるのではないかと考えている。

今回の研究では、上記2例とも対象物は小さく、圧入をする、速度を上げる、ということを目指したが、このように重量物を微小移動させるためにも衝突を有効に使えるだろうと考えている。今後の重要な課題である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

- ① 越後谷駿介, 相山康道, “衝突を利用したマニピュレータ手先運動の高速化”, 第16回ロボティクス・シンポジウム予稿集, 査読有, 指宿, 2011年3月14日~15日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

相山 康道 (AIYAMA YASUMICHI)  
筑波大学・システム情報系・准教授  
研究者番号: 60272374