

平成22年 3月31日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20760163

研究課題名（和文） 柔軟多指ロボットハンドによる操り制御

研究課題名（英文） Object Manipulation by Multi-fingered Robot Hand with Soft Fingertips

研究代表者

上木 諭 (UEKI SATOSHI)

岐阜大学・産官学融合本部・産官学融合本部講師（中核的研究機関研究員）

研究者番号：50467213

研究成果の概要（和文）：

本研究では、柔軟指の変形における慣性項を考慮した動的な柔軟指ダイナミクスを提案し、柔軟多指ロボットハンドによる操りの制御則を提案した。提案した制御則は把持対象物の位置決めに対する制御則及び連続軌道に対する操りの制御則の2種類の制御則である。提案した制御則は Lyapunov-like lemma によって、対象物軌道と接触力が目標軌道に漸近的に収束することを証明し、数値シミュレーション及び実験によって、その有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

This research proposed a dynamics of deformation of soft fingertips with inertia force, and proposed two control methods for object manipulation by multi-fingered hand. The asymptotic convergence of object position, object orientation and contact force is proven by the Lyapunov-like Lemma. The simulation results and experiment results shows the effectiveness of proposed controllers.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：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：多指ロボットハンド、柔軟指、物体操作

## 1. 研究開始当初の背景

多指ロボットハンドは多品種少量生産における産業ロボットのエンドエフェクタや高い適応能力が必要となる人間生活環境における汎用的なエンドエフェクタとして期

待され、ロボットの用途範囲の拡大に必要である。多指ロボットハンドが有用な存在となるためには、対象物の把持・操りの信頼性の高い機能の実現が必要不可欠であるが、近年のヒューマノイドロボットではロボットハ

ンドの機能実現には至っていない。その原因はロボットハンドの研究が剛体指の研究に集中しており、機能実現に有効的と考えられる柔軟指での理論的研究が少ないためであると推察できる。

近年、人間のように巧緻な物体把持操りを実現することを目的とした、柔軟指の多指ロボットハンドによる操りの研究が多くなされている。柔軟指を用いると、面接触により安定な把持、大きな摩擦係数、衝撃力の緩和などの利点を得ることができる反面、理論的な安定解析が困難になる。そのため、この分野の研究は実験的アプローチが多く、システムの安定解析のために指先変形弾性モデルを解析的に導き議論した例は少ない。解析的な指先変形弾性モデルを用いてシステムの安定解析を行っている研究として、2本指のロボットフィンガを用いて2次元平面内での対象物の把持・操りにおいて、半球状の柔軟指の弾性変形量を動径方向の押し付け量として発生力の定式化を行い、対象物の安定に把持し操るための制御方法を提案されている。この制御法の3次元への拡張するための研究も行っているが、連続軌道での操りではなく位置決め問題に限定されている。また、2本指ロボットハンドに限定され、且つ対象物表面形状にも限定的な仮定が設けられており、汎用性に欠けている。他方で、指先変形を半球の動径方向と半径方向として発生力の定式化を行い、2次元平面での把持・操りの制御方法も提案されている。この研究もまた3次元への拡張する研究が行われているが、位置決め問題に限定した安定解析のみを行っている。連続軌道における軌道追従制御と位置決め制御を比較した場合、連続軌道における軌道追従制御ではフィードフォワード入力が非常に重要であり、人間が行うような巧緻な物体把持操りにもフィードフォワード入力が重要である。人間は初めて把持する対象物であっても即座に対象物の重さや重心などを推定して把持・操作を行なっていると考えられ、物体の重さなどを推定し、フィードフォワード入力を加えることにより、巧緻な物体把持操りが可能となると考えた。

## 2. 研究の目的

本研究では、より巧緻な物体把持・操りの実現を目標とした柔軟指の多指ロボットハンドによる対象物の把持・操りの理論的に安定性の証明が可能な適応制御理則の理論構築を目標とする。制御目的は対象物の位置姿勢と接触力を目標値に漸近的に収束させることである。柔軟指先を有する多指ロボットハンドによる実験を行い、その有効性を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 多数の柔軟指先変形モデルが提案されているが、それらのモデルは静的な弾性力の関係のみを表している。そこで、Fig. 1に示す2個の力覚センサとXYステージからなる器具を用いて、柔軟指先における力/変位の関係と高速に変形した場合の力の挙動を調べ、柔軟指先変形モデルを検討する。

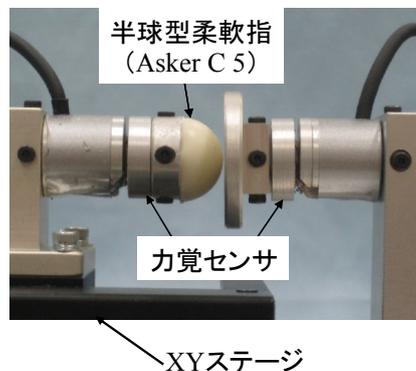


Fig. 1 Experimental equipment

(2) 既に提案されている位置決め制御則からは連続軌道への拡張が困難であったため、連続軌道による把持・操りの適応制御を考慮して提案した柔軟指先変形モデルを用いた位置決め制御則を提案する。制御則は対象物位置姿勢と接触力が漸近的に収束することを Lyapunov-like lemma を用いた安定解析を行う。その有効性を検証するため、Fig. 2に示す柔軟指先を有する多指ロボットハンドによる実験を行う。なお、対象物に取り付けたマーカにより、対象物の位置姿勢は計測される。

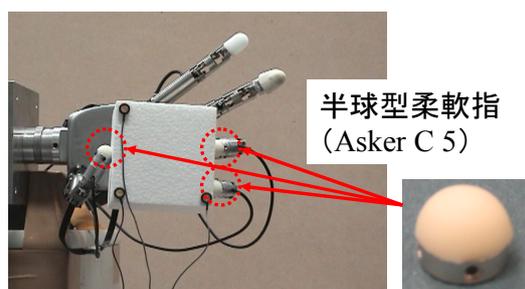


Fig. 2 Multi-fingered robot hand

(3) 提案した位置決め制御則を拡張する形で、連続軌道の把持物体操りのための適応制御則を提案し、安定解析、数値シミュレーション、実験を行う。提案した適応制御則は対象物の質量・重心位置・慣性テンソル、ロボットの動力学パラメータ、及び柔軟指先のヤング率・質量密度・減衰係数を個々に推定する適応則を備えており、連続軌道時における対象物軌道と接触力が目標軌道に漸近的に収束することを Lyapunov-like lemma を用いて証明する。数値シミュレーションは Fig. 3

に示すように視覚的にも確認できるようにし、多様な条件で挙動の解析を行う。最後に、Fig. 2と同じシステムを用いて実験を行い、提案した適応制御則の有効性を検証する。

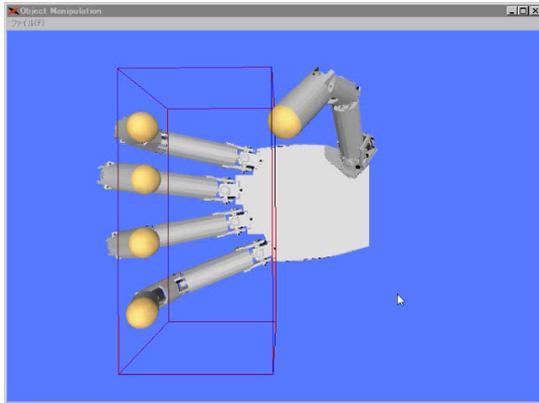


Fig. 3 Screenshot of simulation

#### 4. 研究成果

##### (1) 柔軟指先変形モデルの検討

Fig. 1の実験システムを用いて得られた実験結果をFig. 4と5に示す。Fig. 4は柔軟指の弾性変形量を動径方向の押し付け量として発生力を定式化した既存のモデルによる理論値と計測値のグラフである。この結果から、変形の少ない状態では一致度は高いが、変形が大きくなると誤差が大きくなることから、Fig. 5は同一変形量を異なる速度で変化させた場合の力の挙動を示したグラフであり、圧縮方向に変形させて場合を拡大して表示している。この結果、異なる速度で圧縮して停止させると、静的な弾性力以外の力が

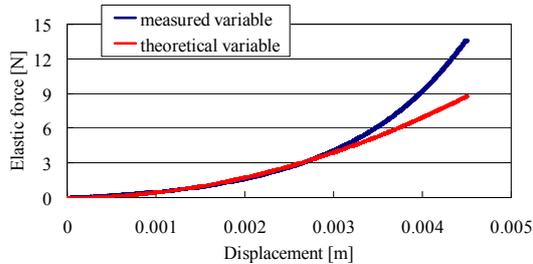


Fig. 4 Elastic force

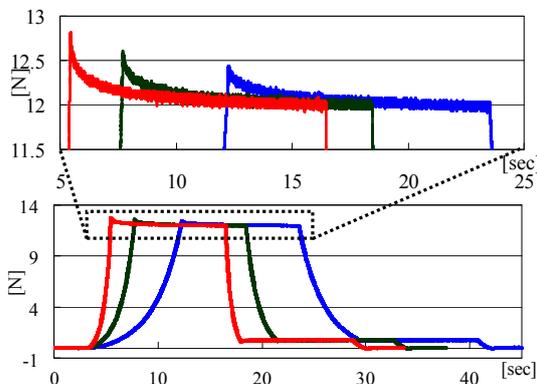


Fig.5 Dynamic force of soft fingertip

存在していることが分かる。また、変形量が0に戻す工程でも変位を停止させているが、こちらでも同様の現象が確認できた。この力の生じる原因が非線形な粘性に起因しているのか変形速度を減速させるために発生した慣性力であるのかを断定することは困難であり、使用するロボットハンドの最大指先力が5[N]であることを考慮して、弾性モデルは既存のモデルを用い、非線形な粘性項と慣性項を加えたモデルを提案した(学会発表①)。柔軟指先を半球形状であると仮定することにより、圧縮されるに従って変形可能な体積が小さくなり、圧縮されるほど非線形な粘性項と慣性項が大きくなるモデルとした。これは、Fig. 5の力を減少させた工程で発生した力が小さいことを考慮してのことである。

##### (2) 位置決め制御則

柔軟指先変形モデルの検討結果から、慣性項を含むモデルを提案した。また、既に提案されている位置決め制御則からは連続軌道への拡張が困難であったため、連続軌道による把持・操りの適応制御の設計を考慮して柔軟指先変形モデルを用いた位置決め制御則を提案し、Lyapunov-like lemmaを用いた安定解析を行った(学会発表③)。提案した制御則は連続軌道への拡張を考慮して、柔軟指先変形モデルを制御則内に組み込みこんだ。その有効性を検証するため、Fig. 2に示す柔軟指先を有する多指ロボットハンドによる実験を行った(学会発表②)。実験はFig. 2の画像で左から右方向へ20[mm]の位置を目標値としてステップ状に与えた。その実験結果をFig. 6に示す。Fig. 6から対象物位置誤差が指数的に減少していることが確認でき、定常偏差も十分に小さい。この時の把持方向の接触力をFig. 7に示す。接触力もまた誤差が減少し、定常偏差は十分に小さい。これらの結果から、提案した位置決め制御則の有効性を確認できた。

しかしながら、提案した制御則に連続軌道を与えた場合に追従遅れが生じ、十分な性能が得られなかった。故に、モデルに基づくフィードフォワード入力を加えることにより、より巧緻な操りが可能であると考えた。その際、把持物体の質量、重心位置、及び慣性テンソルの推定可能な適応制御則を構築し、把持・操りの適応能力の向上を目指した。

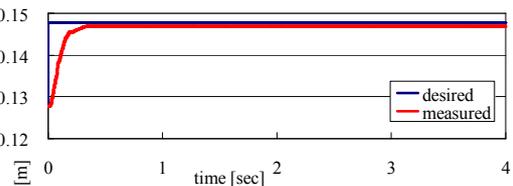


Fig. 6 Object position of z axis

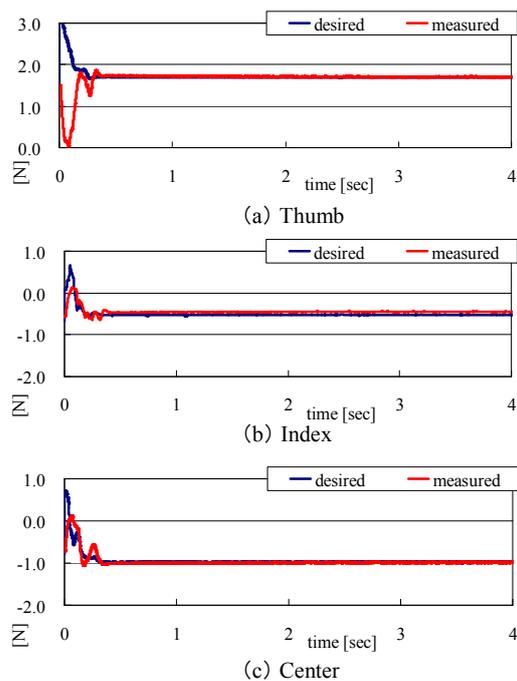


Fig. 7 Contact force of z axis

(3) 把持・操りの適応制御則

提案した位置決め制御則を拡張する形で、モデルベース適応制御を応用して、把持・操りの適応制御則を構築し、Lyapunov-like lemma を用いて安定性の証明を行った。提案した適応制御則は対象物の質量・重心位置・慣性テンソル、ロボットの動力学パラメータ、及び柔軟指先のヤング率・質量密度・減衰係数を個々に推定する推定則を備えており、連続軌道時における対象物軌道と接触力が目標軌道に漸近的に収束することが証明されている。また、対象物位置誤差には飽和関数を用いて把持・操り性能の向上を図り、対象

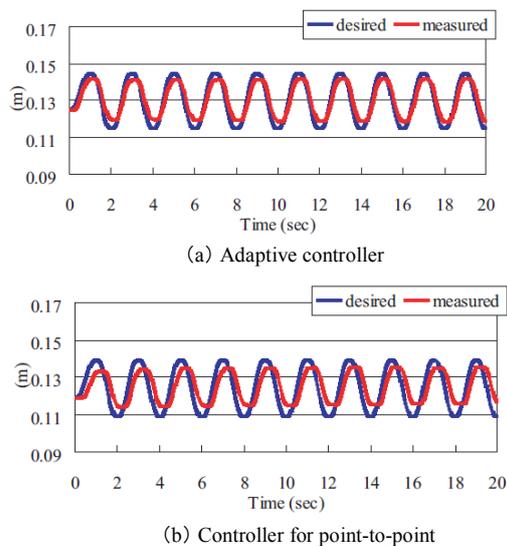


Fig. 8 Object position of z axis

物姿勢誤差はクォータニオンを用いて制御性能の向上を図った。構築した制御器の正しさを確認するために、数値シミュレーションにより、確認を行った(学会発表④)。また、実験は Fig. 2 の画像で左右へ 30[mm] の往復軌道を与え、適応制御と位置決め制御の比較を行った (IROS2010 へ投稿中)。その実験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 より、追従遅れの改善と誤差の減少が確認でき、接触力誤差も同実験で適応制御則を用いた場合に低く抑えることができた。また、適応制御の効果により繰り返し運動の誤差が減少し、適応制御の効果を確認できた。

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 4 件)

① 上木諭, 川崎晴久, 毛利哲也, “多指ハンドによる物体操作のための半球型柔軟指の動的モデル”, 第 9 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2008.

② 上木諭, 川崎晴久, 毛利哲也, “半球型柔軟指先を有する多指ハンドによる把持物体操りの実験”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 2009.

③ Satoshi Ueki, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, “An Object Manipulation by Multi-fingered Robot Hand with Hemispherical Soft Fingertips”, 9th IFAC Symposium on Robot Control, 2009.

④ 上木諭, 川崎晴久, 毛利哲也, “半球型柔軟指先を有する多指ハンドの適応制御”, 第 10 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2009.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上木 諭 ( UEKI SATOSHI )

岐阜大学・産官学融合本部・産官学融合本部  
講師 (中核的研究機関研究員)

研究者番号: 5 0 4 6 7 2 1 3