

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500250

研究課題名(和文) 把握技能における指の協調関係と機能の解明

研究課題名(英文) Clarify the cooperation of fingers and its functions in grasping tasks

研究代表者

永田 和之 (NAGATA, KAZUYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：10357634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：人の手による把持・操作を力学的・運動学的に計測するシステムを構築した。このシステムを用い、三つのタイプの三本指把持(prismatic precision, circular precision, pivot)を計測し、内力パターンの分析により把持の分類とモデル化を行った。その結果、prismatic precisionとcircular precisionは人差指・中指と親指との対向という把持戦略により行われ、両者の内力パターンの相違は、対象物の形状により受動的に生じるとの知見を得た。これより、三つのタイプの三本指把持は、力学的には二つのタイプに分類でき、それぞれをロボットハンドで表現した。

研究成果の概要(英文)：We developed a grasp measurement system which can measure the fingertip forces and motions of human hands. We measured grasp data in three types of 3-fingered grasps (i.e. prismatic precision, circular precision and pivot) using the system. We analyzed the grip forces in the 3-fingered grasps and found that prismatic precision and circular precision have the same grasp strategy. We modeled the three types of 3-fingered grasps with two types of robot hands.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：知能ロボット ロボットハンド 把持・操作 把持内力

1. 研究開始当初の背景

人の手指の器用さをロボットハンドで実現するためには、把持・操作の中で手指が持つ機能を分析し、その機能と直結したソフトウェア構成とハードウェア仕様を導出する必要がある。手指の機能分析において、人の手の使い方を観察し、それを解釈して中立的に表現することが重要である。これにより、人の手とは異なった形態のロボットハンドによる把持・操作の作業記述が可能になる。これまで、人の手指の観察に基づく把持の分類とモデル化の研究が多数行われている。ところで把持操作では、手指の運動ばかりでなく、把持力も同時に制御する必要がある。しかしながら、従来の把持の分類とモデル化は手指の外観や運動の観察に基づくもので、把持における力の関係は表されていない。そのため、把持において同じ手の外観でも力の入れ方が本質的に異なっていたり、逆に、異なった外観でも力学的には同じ把持であったりする場合について区別することができない。このため、従来の把持の分類とモデル化は必ずしも人の把持戦略を反映したものはなっていない。そこで、本研究は、人の手指の運動ばかりでなく把持力も同時に観察し、把持・操作の分類とモデル化を試みる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人の手指による把持・操作を力学的・運動学的に計測することで、暗黙知と言われる手の技能を可視化し、そのデータを指の協調関係と機能の観点から統計的に分析して機能単位のプリミティブ動作を抽出し、その組み合わせにより把持・操作の体系的な分類とモデル化を行うための基盤技術を開発することである。

3. 研究の方法

(1) 把持・操作計測システムの構築

人の手指による把持・操作を力学的・運動学的に計測する把持計測システムを構築する。ここで、把持・操作は精密把持によるものを対象とし(パワーグラスプを含むものは対象としない)、各指の指先力と指先の運動を計測する。また、把持技能の可視化のため、計測した時系列データを、グラフおよびアニメーションで表示するソフトウェアを開発する。

(2) 把持・操作のプリミティブ動作の解明

被験者に把持・操作を実演してもらい、把持・操作計測システムを用いて計測したデータを、指の協調関係と機能の観点から分析し、人の手の把持戦略を明らかにする。一般に、把持・操作データは多次元となるため、把持データの分析を適切に行うためには、次元圧縮が必要となる。そこで、低次元で把持分析を行うための把持内力パターンおよび運動パターンの表現法について検討する。また、把持分析において、把持内力パターンや指運動パターンの分類を行うための統計処理手



図1 把持・操作計測システム

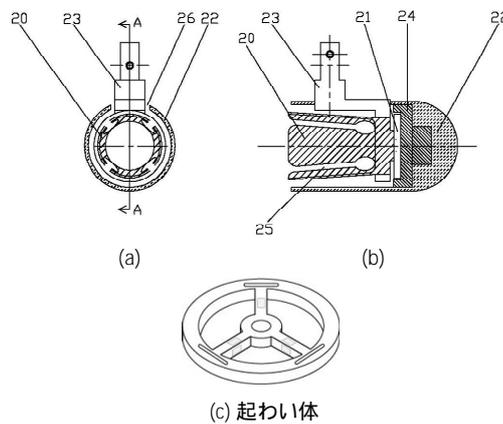


図2 指装着型6軸力覚センサ

法についても検討する。

4. 研究成果

(1) 把持・操作計測システムの構築

把持・操作における指先力と指先の運動が同時に計測できる把持・操作計測システムを開発した(図1)。

本システムにおいて、指先力の計測は、これまでに筆者が開発した指装着型6軸力覚センサを用いた。図2に指装着型6軸力覚センサの構造を示す。力覚センサの装着は、指サックに指先を挿入することで行う。指装着型6軸力覚センサの外形と材質は、我々が実験で使用しているロボットハンドの指先と同じ形状・材質でできており、指と物体との接触はロボットハンドと物理的に同一条件となる。そのため、把持・操作において指に物理的な制約を受けるが、ロボットハンドと同じ物理的制約条件下での人の把持戦略データを得ることができる。

指先の運動計測は、三次元運動動作計測装置(Library社、LB-GV90C-W3D3A)を導入し、指装着型6軸力覚センサ上に取り付けた三つのカラーマーカーを8台のカメラでトラッキングし、指先の位置姿勢を算出した。

指先力と運動の計測は同期信号により同時に開始し、計測周期の違い(1[kHz]と90[Hz])を線形補間により補正して10[msec]

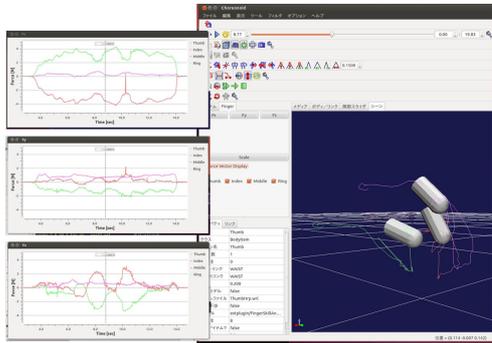


図3 把持データの可視化

毎にデータをファイルに書き出した。力覚センサの重力補償は運動データを用いて行う。本システム構成では、親指・人差指・中指・薬指の4本指について計測可能である。

また、計測した時系列データをグラフおよびアニメーションで表示する choreonoid のプラグインを開発した。アニメーションでは、各指の3Dモデルの他に、指の軌跡と指先力ベクトルを表示することができる。時系列データのグラフとアニメーションは同期しており、スライダーを動かすことで任意の時間のデータを見ることができる。図3にpivot操作を実行した時の把持データの表示例を示す。

(2) 把持・操作のプリミティブ動作の解明

親指、人差指、中指による三本指精密把持を対象に、把持内力パターンに基づく把持の分類とモデル化を行った。三本指精密把持として、図4に示す三つの把持形態について分析を行った。図4の左と中央は、Cutkoskyの分類による circular precision と prismatic precision である。図4の右は、親指と中指で対象物の平行な面を把持し、人差指で対象物を押える把持形態で、pivot操作のときに見られる把持形態である。この把持形態を pivot と呼ぶことにする。

三本指把持の内力

親指、人差指、中指による三本指精密把持の内力は、座標系を適切に設定して記述することで、9次元から2次元に圧縮できる。三

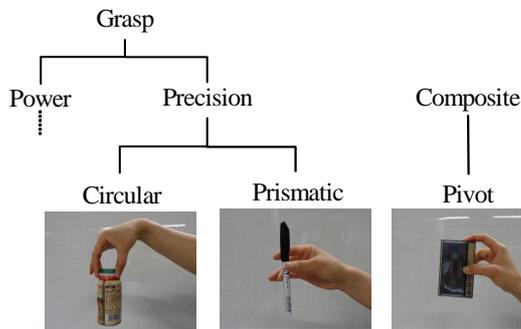


図4 三つの三本指把持形態

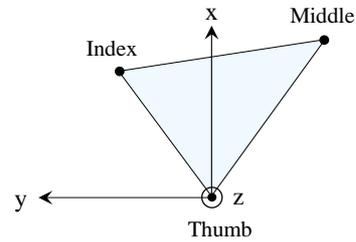


図5 三本指把持内力座標系

本指精密把持の内力は次式で表せる。

$$f_g = (I_9 - G^+G)f / \|f_{g_thumb}\|$$

ここで f , f_g R^9 は、三本指把持の指先力と内力を表し、 G , G^+ は把握マトリクスとその擬似逆行列を、 I_9 は 9×9 単位行列、 f_{g_thumb} は親指の内力を表す。ここでは、把持内力のパターンに注目するため、各指の内力を親指内力の大きさで除して正規化する。内力は各指の接触点で形成される平面上(把持平面と呼ぶ)に存在する。そこで、図5に示すように、把持平面上で親指の内力の方向を x 軸とし、中指から人差指に向かう方向が y 軸+となるように右手座標系を設定し、その座標系で把持内力を記述する。すると各指の内力の z 成分は全て0となり、親指の内力は $(1, 0, 0, 0)^T$ なので、三本指把持の内力は人差指と中指の内力の4次元ベクトルで表現できる。更に、人差指と中指の内力の x 成分の和は親指と釣合うので、その値は-1.0となり、 y 成分は符号が異なり大きさが等しい値となることから、三本指把持の内力は2次元で表現できる。すなわち、人差指または中指の内力で三本指把持の内力を表すことができる。ここで内力の x 成分は親指との対向度を表す。この値の絶対値が大きいほど親指との対向度が大きく、二本指精密把持における親指との対向指としての機能を持つ。また内力の y 成分は、人差指と中指の内力の平行度を表す。この値の絶対値が大きければ両指の内力は平行でない。 y 成分が小さいときは、両指の内力が平行であるか、片方の指の内力が小さい場合であり、二本指による把持と等価になる。

内力パターンの分析に基づく把持の分類とモデル化

被験者実験により計測した三本指精密把持の内力を図6に示す。ここでは、三本指把持の内力として人差指の内力を表示した。尚、被験者実験に先立ち、産総研内に設けられた人間工学実験委員会において実験内容を審議し、承認を受けた。

図6で、把持形態が prismatic precision の場合、内力の y 成分が非常に小さい値となっている。これは人差指と中指の内力が互いに平行であり、親指と釣合う方向のみの力を発生していることを示す。すなわち両指は二

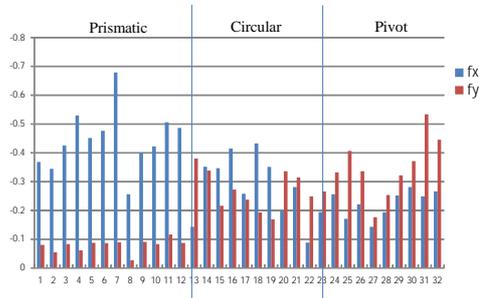


図 6 計測された三本指把持の内力

本指精密把持における親指との対向指としての機能を持ち、一本の仮想指にまとめることができる。次に pivot の内力に注目すると、人差指の x 成分が小さい値となっている(中指の x 成分が大きな値となる)。これは親指と中指の二指で物体を把持しており、人差指は把持物体の姿勢を安定化するために添えているものと解釈できる。中指は、二本指精密把持における親指との対向指としての機能を持つ。このタイプの内力パターンは、把持形態が circular precision の場合(ID=13、17、20、21、22)にも見出せる。すなわち、手の外観は circular precision であるが、力の入れ方は pivot である場合がある。

次に、内力パターンから各指の機能を見るため、人差指と中指の内力成分の絶対値をプロットした結果を図 7 に示す。ここで赤く塗りつぶした点は人差指のデータであり、白抜き点は中指のデータである。また A、B、C、D は、内力パターンの解釈がそれぞれ prismatic precision の指、circular precision の指、pivot の人差指、pivot の中指を表す。ここで、この内力の解釈を検証するため、図 7 の内力分布を KKZ 法により四つのクラスタに分割した。その結果、A と B は統合され、D が二つに分割された。本来、D の内力分布は C と $x=0.5$ の軸に対して対象であり、親指との対向指としての機能をもつことから一つの領域として扱わなければならない。そこで、内力分布を KKZ 法により三つのクラスタに分割した。その結果を図 8 に示す。ここで、A と B が統合されたことの解釈として、人の手の構造上、prismatic precision と circular precision は人差指・中指と親指との対向という把持戦略により行われ、両者の内力パターンの相違は、対象物の形状により受動的に現れるものと思われる。即ち、人差指と中指の間では能動的に握力制御を行っていないという解釈である。典型的な circular precision は、旋盤のチャックのように三本指で均等に物体を把持するものである。このとき、握力は互いの指の間で均等に制御され、人差指と中指の内力は図 7 の(0.5, 0.87) の点にプロットされる。この点を考慮すると、図 7 の circular precision の領域 B は、prismatic precision の領域 A と非常に近い。以上の解釈により、

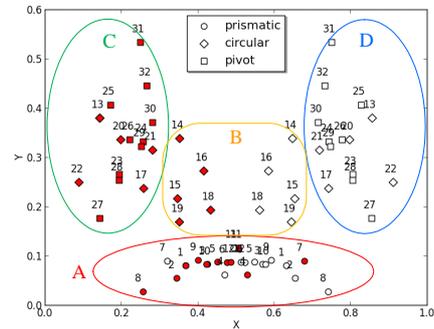


図 7 人差指・中指の内力の分布

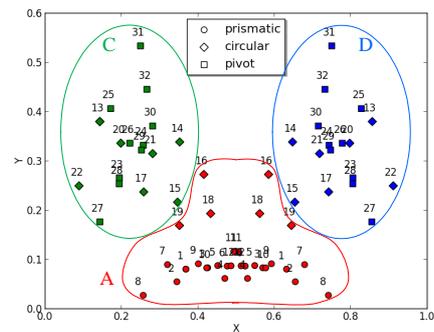


図 8 KKZ 法による指内力分布のクラスタリング

prismatic precision と circular precision の把持は、人差指・中指と親指との対向により実現され、両指は一本の仮想指に統合して考えることができる。この把持をロボットハンドで表現すると、図 9 (a) のようになる。Pivot については、中指は二本指精密把持における親指との対向指であり、人差指は、対象物の姿勢を安定化するために対象物を押えている指である。この把持をロボットハンドで表現すると、図 9 (b) のようになる。

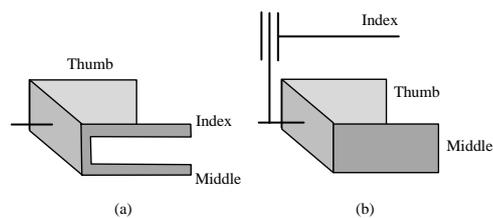


図 9 三本指精密把持を表す二つのタイプのロボットハンド

図 10 は、人差指と中指の内力をまとめた 4 次元ベクトルを KKZ 法により二つのクラスタに分割し、4 次元ベクトルの第一主成分と第二主成分で表示したものである。図中の x 印はクラスタ中心であり、二つのタイプの三本指精密把持のコードブックを表す。このコードブックを利用することで、新たに三本指把持の内力が得られたとき、その把持がどちらのタイプなのかを判別することができる。

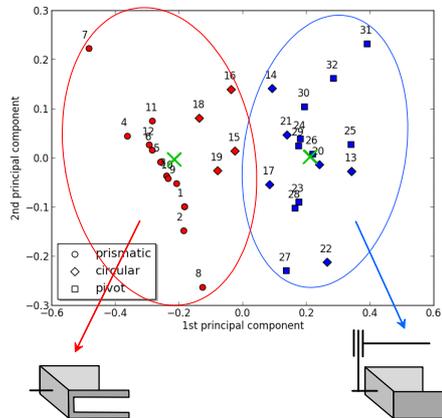


図 10 三本指把持内力の二つのクラスとコードブック

今後の展開として、複雑な持ち替え操作を伴う把持・操作をターゲットとし、指間の相対的運動パターンについても調べていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

永田和之、山野辺夏樹、原田研介、内力の観察に基づく三本指把持のモデル化、第 19 回ロボティクス・シンポジウム論文集、査読有、2014、227-232

〔学会発表〕(計 2 件)

永田和之、山野辺夏樹、原田研介、内力の観察に基づく三本指把持のモデル化、第 19 回ロボティクス・シンポジウム、2014 年 3 月 13 日、兵庫県・有馬

永田和之、山野辺夏樹、原田研介、内力による把持分類、第 31 回日本ロボット学会学術講演会、2013 年 9 月 6 日、東京・南大沢

6. 研究組織

(1) 研究代表者

永田 和之 (NAGATA KAZUYUKI)
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員
研究者番号：10357634

(2) 研究分担者

山野辺 夏樹 (YAMANOBE NATSUKI)
独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員
研究者番号：90455436