

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700202

研究課題名(和文)人間の手による非把持型の滑りを伴う器用な操作の解析

研究課題名(英文)Analysis of Nonprehensile Dexterous Sliding Manipulation with Human Hand

研究代表者

佐々木 智典(Sasaki, Akinori)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・ロボット事業推進部ロボット開発セクター・副主任研究員

研究者番号：30587126

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人間の手は操作対象を滑らせながらも、その安定を保つような器用な操作を行うことができる。このような器用な操作を実現するための力学的条件を見出すことは、道具の形状設計やロボットハンドの改善に寄与するものと考えられる。

手と操作対象の物体の間に働く複数の接触点・接触力を観測することは、実物では実施困難である。このため、計算機上での手のモデルの動力学シミュレーションと同時に被験者の手動作を計測し、これをシミュレーションに反映させる方法を考え、これによる観測、解析を行った。このような操作において、手の皮膚が重要であると考えられたため、動力学シミュレーションには皮膚に対応する柔軟要素を取り込んだ。

研究成果の概要(英文)：Human hand is able to perform dexterous manipulation keeping the object stable while it is sliding on the hand. Discovering dynamical criteria to achieve such manipulation would contribute to improving designs of tool shapes or robotic hands.

It is hard to perform observations of contact points and forces between the actual hand and manipulated object. We hence implemented a method to perform dynamics simulation of a hand model along with measurement of hand motions by a subject, and feed the data to the simulation, based on which we performed observations and analysis. Soft body elements corresponding to hand skin is incorporated into the dynamics simulation because the skin would have important roles in such manipulation.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：手 測 デジタルヒューマンモデル デジタルハンドモデル モデリング シミュレーション 画像計

1. 研究開始当初の背景

従来のロボットハンドあるいはデジタルハンドモデルによる物体操作の研究においては、操作対象の物体をハンドの把持によってしっかりと固定することに注目することが多かった。一方、実際に人間が手によって行う操作には、対象物を固定する把持を伴わずに、滑らせるようにして行う操作がみられる。このような把持を伴わない物体操作は、たとえば、ペン回しやジャグリングのような事例に見られる。このような操作の解析を行うに当たって、従来のロボットハンドあるいはデジタルハンドモデルに対する手法をそのまま流用したのでは、十分に解析を行えない。

このような把持を伴わない物体操作を対象として、手と物体との接触を考慮して操作の解析を行い、その機序を明らかにすることは、ロボットハンドやデジタルヒューマンモデルの新たな展開に重要と考え、そのための計測方法の開発やデータ解析に取り組むことを企図した。

2. 研究の目的

(1) 手による物体操作における接触の観測・解析: 人間が手によって行う物体操作を阻害せず手動作や物体との接触点・接触力の計測を行うためには、非接触計測が望ましいので、これを実現する方法を検討・構築する。実物の手に、接触点・接触力を検出するようなセンサを多数配置して、計測を行うことは、手の形状の複雑さやセンサの寸法、配線の制約、センサの取り付けによって手の運動が阻害されうること等を含めて考慮すると実現困難である。このため、別の方法として計算機上のデジタルハンドモデルの動力学シミュレーションと同時に被験者の手動作を計測し、シミュレーションに取り込む。これらの観測・解析を通して、把持を伴わない器用な操作を実現するための力学的条件を明らかにすることを図る。

(2) デジタルハンドモデルの構築・調整: 動力学シミュレーションにおいて動作するデジタルハンドモデルを、実物の手の骨格や、皮膚の構造についての解剖学の知見を考慮して、構築する。デジタルハンドモデルは人間の手と同様に5本の指が独立して動作する構造とする。また、デジタルハンドモデルの表層は、人間の手の皮膚を模擬するように柔軟な構造にする。

3. 研究の方法

手によって行う物体操作のデータ(手の関節運動、手と操作対象物体の複数の接触点・接触力)を計測するには、操作を阻害しないことを考慮すると、非接触計測が望ましい。このような非接触計測を近似的に実現する

方法として計算機上での動力学シミュレーションを利用する。動力学シミュレーションにおいて、人間の手動作に実時間で連動するデジタルハンドモデルによって物体モデルの操作を行い、デジタルハンドモデルの表面上に生じる接触点・接触力を検出・記録する。動力学シミュレーションにおいては、計算上の時間進行に応じて、物体モデル間の接触検出計算が逐次行われているので、この結果のデータを利用できる。また、被験者の実際の手動作に連動してデジタルハンドモデルが動作するので、多様な手動作を実現可能である。

また、人間の実際の手動作を観測し、その特性をデジタルハンドモデルに取り込むため、高速度カメラによる手動作の撮影映像を利用する(図1)。高速度撮影映像については、目視による観察に加えて、デジタル画像相関法を適用することによって、手の表面における変形の観測を行い、実物の手の柔軟性を考慮するためのデータの収集にも利用する。

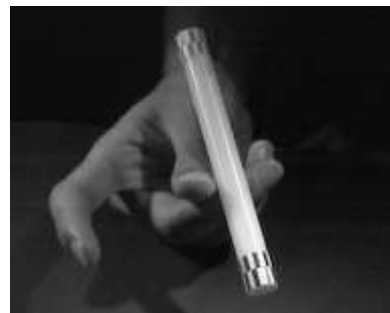


図1 高速度撮影(ペン回し)

4. 研究成果

(1) 手による物体操作の計測システム: 人間の手動作入力に連動する、動力学シミュレーション中のデジタルハンドモデルによって3次元形状物体モデルを操作するシステムを構築した(図2)。本システムでは、動力学シミュレーションと同時に手の関節運動(各関節角度の時系列データ)が手袋型の計測装置によって計測される。この計測データ



図2 手による物体操作の計測システム

に基づいて、デジタルハンドモデルの関節運動の制御が行われ、被験者の手との連動が実現される。また、同時に、デジタルハンドモデルと物体モデルとの接触点・接触力の検出・記録が行われる。

本システムを使用する被験者は、ディスプレイ上に3次元コンピュータグラフィクスによって提示される動力学シミュレーションの状況（デジタルハンドモデルおよび物体モデルの運動）を見ながら、物体モデルの操作を行う。本システムにおける物体モデルの操作は、被験者の触覚へのフィードバックがないことなど、厳密には実物の操作と異なる。しかしながら、被験者自身が操作に習熟し、結果として操作が成立しているならば、観測される力学量は、操作の達成のために妥当な量となると考えられる。

なお、動力学シミュレーションの計算自体には既存のソフトウェア・ライブラリ（Bullet Physics Library）を利用している。また、厳密な物理現象の再現よりも、近似であっても、妥当な物体操作が行えることを重視している。操作対象の物体モデルの形状には、予め他の3次元設計ソフトウェア等で設計した形状データを利用できるように、ファイルから形状データをロードする機能を実装している。

(2) デジタルハンドモデルにおける接触点・接触力の計測：上記(1)の物体操作の計測システムにおいて、操作対象物体モデルとデジタルハンドモデルとの間に生じる複数の接触点、接触力を検出、可視化、記録できる機能を構築した（図3, 4）。図3では、デジタルハンドモデルの一部を切り出した円筒形状の部品に、別の剛体の円筒が接触している様子を示している。また、図4においては同様に剛体円筒がデジタルハンドに接触している様子を示している。図において、緑色の中空円筒部分が皮膚に相当する柔軟構造であり、その内側の円筒が骨格に相当する剛体となっている。黄色の各線分は接触点・接触力を可視化した結果であり、デジタルハンドモデル上の端点が接触点に、線分の長さ・方向が、それぞれ、接触力の大きさ・方向に対応している。

動力学シミュレーションの内部処理では、

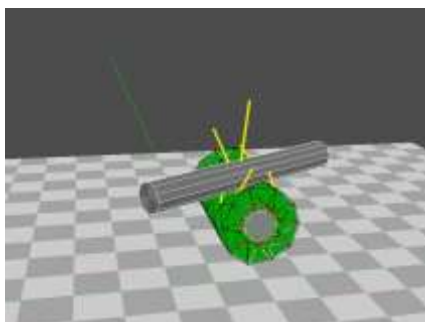


図3 接触の検出・可視化

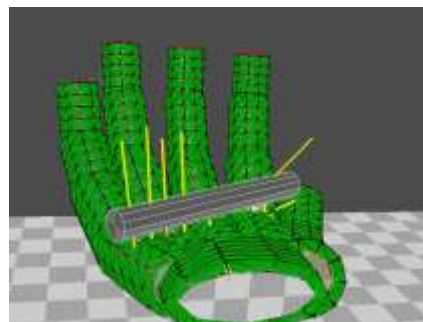


図4 デジタルハンドモデルとの接触

計算上の時間の進行に則して、物体モデル間の接触の検出が逐次行われており、この処理を一部改変して、接触点・接触力の可視化・記録を行えるようにしている。検出された複数の接触点・接触力は時系列として記録される。

(3) 皮膚を模擬する柔軟構造を含むデジタルハンドモデル：実際の手の皮膚の柔軟性や、内部の骨格構造を考慮して、動力学シミュレーションにおけるデジタルハンドモデルを構築した（図5）。図5の上段は、デジタルハンドモデルの剛体骨格構造を示し、色が異なる各円筒部分は、それぞれ独立した剛体リンクとなっている。この剛体骨格構造において、実際の手と同様に、手掌内部は、一枚の板でなく、根元（手根）から、各指列に連なるそれぞれの骨（中手骨）が独立している。

1本の指を構成する一連の剛体骨格リンクは隣接する剛体骨格リンクと接続されている。この拘束によって、隣接する剛体骨格リンクは、相互に関節中心まわりに回転運動するが、分離しないようになっている。動力学シミュレーション上の近似として、物体操作の解析に不要な衝突の発生を回避できるように、接続された剛体骨格リンクどうしは衝突しないように設定する（外観上、剛体骨格リンクどうしが重なっても、計算上は衝突が発生しないように扱う）。

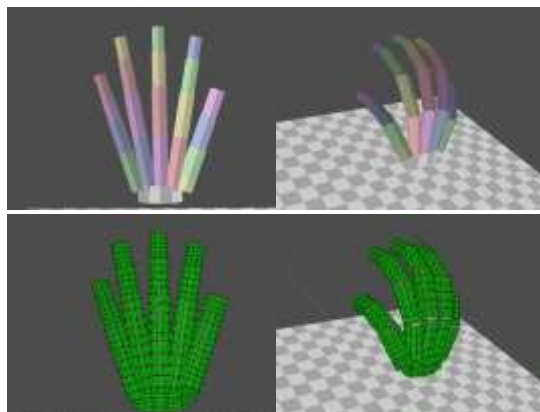


図5 柔軟構造による剛体骨格の被覆

図5の下段は、上段に示すデジタルハンドモデルの剛体骨格構造を被覆するように、柔軟構造が配置されていることを示す。柔軟構造は弾性を持ち、衝突やデジタルハンドモデル自体の運動により変形しうる。柔軟構造の内側（剛体骨格に接する面）は剛体骨格リンクの表面に拘束され、変形はしても分離しないようになっている。操作の解析上は不要な衝突を回避できるように、隣り合う柔軟構造どうし、あるいは一連の柔軟構造が変形して、その領域が重なったとしても、動力学シミュレーション上は、衝突が発生しないように扱う。

デジタルハンドモデルに柔軟構造を取り込んだ場合には、その変形を扱う計算量が増加するために、動力学シミュレーション計算の速度向上が課題として残る。これについては、柔軟構造の一部を簡略化し、計算量を減らすことにより対処している。今後、さらにGPU (Graphical Processing Unit) による並列計算により高速化することを図っている。

(4) 手の皮膚の変形の観測：実際の人間の手の皮膚の柔軟性について考慮するため、デジタル画像相関法による皮膚の変形の計測を試行した。図6は手を撮影したときの時間的に連続した2画像に対してデジタル画像相関法を適用した結果の例を示す。デジタル画像相関法において、部分画像のマッチングを取りやすくするため、撮影対象の手には黒色の塗料を吹き付け、ランダムなパターンを形成している。

図6において、手の上の各点に重畳描画されている色が青に近いほど変形が少なく、黄～赤に近いほど変形が大きいことを表す（処理の都合上、手動設定した注目部分のみを処理対象としている）。これにより観測されている手の皮膚の変形量は相対的な量であるが、各種の動作の進行において、他の部分と比較して変形が大きい部分が可視化される。このデジタル画像相関法による計測結果をデジタルハンドモデルの柔軟構造に取り込む、定量的な方法論については今後の課題となっている。

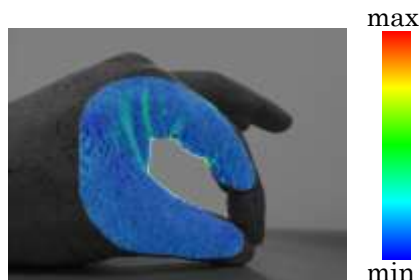


図6 皮膚の変形の観測

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 5 件)

- ① 佐々木 智典, 橋本 洋志, 「器用な操作を行う手動作と皮膚の変形の計測」, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2012), 2012年12月19日, 福岡国際会議場 (福岡県福岡市)
- ② Akinori Sasaki, Hiroshi Hashimoto, "Measurement of Hand Skin Deformation in Dexterous Manipulation", 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2013), Nov. 11, 2013, Vienna (Austria), (査読付き), DOI: 10.1109/IECON.2013.6700524
- ③ 佐々木 智典, 橋本 洋志, 「手動作解析のための柔軟な構造を有する手モデルの構築」, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), 2013年12月20日, 神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)
- ④ Akinori Sasaki, Hiroshi Hashimoto, "Hand Model with Soft Skin for Evaluation of Human Hand Motion", 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014), Nov. 1, 2014, Dallas (Texas, USA), (査読付き), DOI: 10.1109/IECON.2014.7049102
- ⑤ 佐々木 智典, 橋本 洋志, 「器用な操作を行う手モデルにおける接触の観測」, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014), 2014年12月15日, 東京国際展示場 (東京都江東区)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 智典 (SASAKI, Akinori)

地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター・ロボット事業推進部ロボット開発セクター・副主任研究員

研究者番号： 30587126