

平成 21 年 6 月 26 日現在

研究種目： 若手研究（スタートアップ）

研究期間： 2007～2008

課題番号： 19800054

研究課題名（和文） 柔軟要素による可動結合がもたらす人指運動の巧みさの解明

研究課題名（英文） Investigation of Human Dexterity Generated by Loose Joints via Soft Elements

研究代表者

柴田 瑞穂（SHIBATA MIZUHO）

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：70454519

研究成果の概要：

柔軟要素による可動結合機構を実現するために、関節角度計測技術を確立した。長さセンサを関節に複数配置することで、三次元運動の射影角の計測が可能になった。本機構では、複数のアクチュエータを使用した場合、その物理特性のばらつきが制御性能に影響を与えることが分かった。そこで、これを統計的に考慮した静力学解析を行い、アクチュエータの数が十分大きい場合には、ばらつきの影響が無視できることを明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,360,000	0	1,360,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
総計	2,710,000	405,000	3,115,000

研究分野： 総合領域

科研費の分科・細目： 情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード： 知能ロボティクス、機械力学・制御、制御工学

1. 研究開始当初の背景

ロボットハンドの研究は、従来から米国と日本が世界をリードしてきたが、近年、柔軟構造を内包するロボットハンドを用いた把持操作の理論的解析が、日本人研究者によって目覚ましい発展を遂げた。有本らや井上らは、指先に柔軟構造を持つハンドによる物体の操り動作の解析を行なった。これらの研究により、物質の持つ柔軟構造そのものが把持操作の安定性に寄与していることが示唆された。また国外の動向として、2007年4月にはIEEE ICRAのワークショップにて、Contact Interface in Robotic Manipulation: Modeling and Applicationが開催された。ワークショップでは、ロボットマニピュレーション

におけるロボットと作業環境との接触について議論され、物質の柔軟性を制御に取り入れる重要性が指摘された。人間の関節は、軟骨および関節包により二つの骨が柔軟に結合されており、柔軟な軟骨部を有する。また、拮抗型に配置された多数の筋繊維によって駆動している。すなわち全体として柔軟要素を介して運動している。モータで関節機構を構成した場合、制御則やゲインを注意深く選定しなければ、安定に動かすことはできない。しかしながら、人間の関節の運動は制御則やゲイン設定に未知の部分が多いにも関わらず、非常にロバストに動かすことができる。したがって、柔軟要素による結合そのものが系の安定性に深く寄与していると考え

られるが、その理論的背景には未開拓の部分が多い。本研究では、人間の拇指に代表される三次元的に回転する柔軟関節機構を、人間の構造に倣い、柔軟な軟骨部と多数の直動型柔軟アクチュエータを用いて剛体リンクを結合することで実現する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人間の拇指に代表される三次元的に回転する柔軟関節機構を、柔軟な軟骨部と多数の柔軟アクチュエータを用いて剛体リンクを結合することで実現し、その運動解析を通して、柔軟要素による可動結合がもたらす人指運動の巧みさを明らかにすることである。人間の関節は、軟骨および関節包により二つの骨を柔軟に結合している。また関節は、拮抗型に配置された多数の筋繊維によって駆動しており、全体として柔軟要素を介して運動している。人間の関節の運動は、制御則やゲイン設定に未知の部分が多いにも関わらず、非常にロバストであることから、柔軟要素による可動結合そのものが運動および系の安定性に寄与していると考えられるが、その理論的背景には未開拓の部分が多い。本研究では、これを実験・解析の両面から検証する。

3. 研究の方法

本研究で提案する関節機構は、人間の関節機構に倣い、剛体のリンクの間に人間の軟骨部に相当する粘弾性体を配置する。また、筋肉に相当する柔軟な直動アクチュエータを拮抗型に配置することで回転運動を実現する。軟骨部には発泡体、防振ゲルなどの粘弾性体を、アクチュエータには形状記憶合金を用いる。本機構では、リンクが柔軟体を介して結合しているため運動中に回転中心が移動する。このため、従来のモータ制御で用いられているポテンショメータやエンコーダではリンクの回転角度を計測することができない。そこで、直動の移動距離を計測できる長さセンサを関節に複数配置することで、柔軟結合関節の回転角度検出技術を確認する。リンクの回転角度をCCDカメラにより計測し、そのとき計測される長さセンサの値とマッピングする手法を用いて角度を計測する。関節機構の大きさは人間の拇指程度の大きさを目指す。したがって、新規購入の長さセンサは小型軽量タイプを特注する。二次元平面内を運動する柔軟関節機構については、この方策が有効であることを実験的に確認している。二次元平面内を運動する柔軟関節機構においては、一つの回転角を制御するためには、一つの長さセンサを用いた角度計測で十分であることを確認している。したがっ

て、三次元内を運動する柔軟関節機構で回転角度を計測するためには、少なくとも三個の長さセンサが必要であると推測されるが、さらなる精度向上も視野に入れて、四個以上の長さセンサを用いることを検討する。また、人間の筋肉に倣い、アクチュエータを束にすることにより、関節機構を駆動する。二次元平面内を運動する柔軟関節機構にこの手法を適用することにより、リンク全体の出力が配置したアクチュエータ数に比例することを実験的に確認している。複数のアクチュエータを用いることにより本質的には多入力多出力系の制御となるが、本研究ではこれを一入力一出力系の制御の集合であると考え、制御則を構築する。アクチュエータ束による関節駆動を実現するとともにリンク機構をモデル化し、解析を通してその静力学特性を明らかにする。複数のアクチュエータを扱うため、アクチュエータの物理特性のばらつきがリンクの運動に影響を与える可能性がある。例えば、アクチュエータとして市販のSMAコイルを使用する場合、適当な長さに切り出す必要がある。したがって、同一の試料であっても、切り出す長さによって物理特性が変化する。この影響を明らかにするために、時間分解能1000HzのCMOSカメラを用いてアクチュエータ束で駆動するリンク機構の運動を計測する。本機構では、リンクの結合部に粘弾性体を配置しているため、ヒンジ機構のように運動方向が拘束されておらず、三次元的にねじれる可能性がある。そこで、物理特性のばらつきを統計的に考慮した静力学解析を行う。アクチュエータはばねで近似し、剛性係数にばらつきがある複数のばねで剛体の棒を支えているとして解析を行う。また、解析の妥当性を、形状記憶合金の動特性およびそのばらつきを考慮したシミュレーションを用いて検証する。これらの過程を経て、軟骨部が人指運動に与える影響の解明およびアクチュエータ束による関節駆動の動力学的解析を行い、柔軟要素による可動結合がもたらす人指運動の巧みさを明らかにする。

4. 研究成果

柔軟要素による三次元的な可動結合を実現するための基盤技術の確認を目標に、長さセンサによる三次元関節角度計測、アクチュエータ束による関節駆動および関節機構の運動シミュレーションを行った。図1に製作した三次元駆動型可動結合機構を示す。長さセンサによる三次元関節角度計測では、直動の距離を計測できる長さセンサを関節に複数配置することで、柔軟結合関節の回転角度検出技術を確認した。リンクの回転角度をCCDカメラにより計測し、そのとき計測され

た値と長さセンサにて計測された値を多項式にてマッピングする手法を用いて角度を計測した．図2に本手法を適用した際の角度の計測結果を示す．図に示すグラフにおいて、誤差が最小となるグラフの結果を適宜使用することで誤差をより小さなものに行うことができる．本研究で提案する関節機構は、人間の軟骨に相当する部分に柔軟体を配置しているため、従来のモータ制御で用いられているポテンショメータやエンコーダではリンクの回転角度を計測することができないが、この技術の開発により、三次元運動の射影角の計測が可能になった．アクチュエータ束による関節駆動では、多入力多出力系の制御を一入力出力系の制御の集合と考える手法を用いて制御を行った．ここでは、複数のアクチュエータを拮抗するアクチュエータの組に分けた．その結果、二次元関節だけでなく三次元関節において運動の射影角を制御することが可能となった．

アクチュエータ束による関節駆動を行う基盤技術の確立を目指し、アクチュエータ束を考慮したモデル化および解析を試みた．単駆動のアクチュエータを束にして使用することで、大きな発生力が得られることを実験的に確認した．しかしながら、複数のアクチュエータを扱うため、アクチュエータの物理特性のばらつきがリンクの運動に影響を与える可能性がある．例えば、アクチュエータとして市販のSMAコイルを使用する場合、適当な長さに切り出す必要があるが、同一の試料であっても、切り出す長さによって物理特性が変化する．この影響を明らかにするために、時間分解能1000HzのCMOSカメラを用いてアクチュエータ束で駆動するリンク機構の運動を計測した．この計測結果より、アクチュエータ束の物理特性のばらつきによって角度制御の精度が悪くなる可能性が示唆された．本機構では、リンクの結合部に粘弾性体を配置し

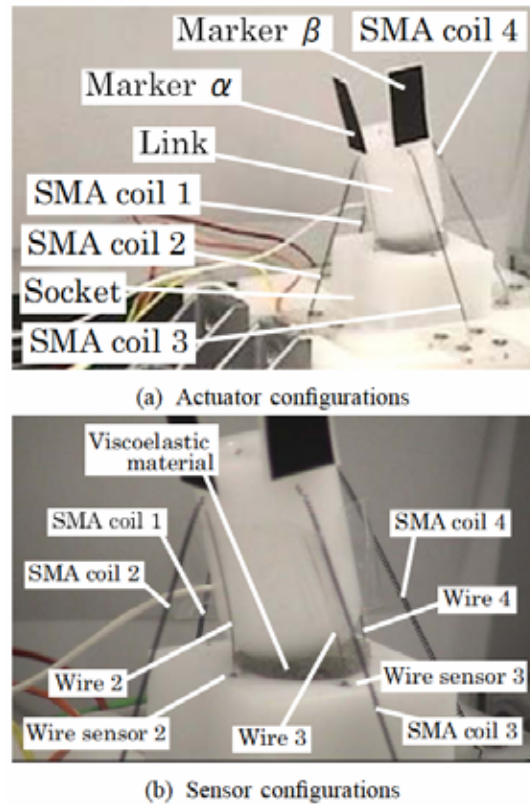


図1 三次元駆動型可動結合機構

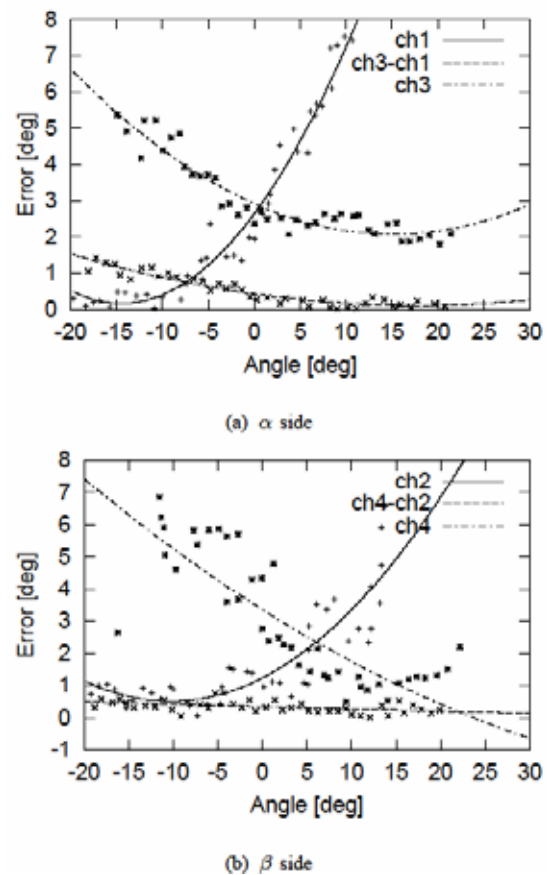


図2 長さセンサによる角度計測

ているため、ヒンジ機構のように運動方向が拘束されておらず、三次元的にねじれる可能性がある。そこで、物理特性のばらつきを統計的に考慮した静力学解析を行った。アクチュエータはばねで近似し、剛性係数にばらつきがある複数のばねで剛体の棒を支えているとして解析を行った。図4にアクチュエータ数を変更した際のリンク角度の確率密度関数を示す。図に示すように、アクチュエータの数が十分大きい場合には、ばらつきの影響が無視できることを明らかにした。解析の妥当性を、形状記憶合金の動特性およびそのばらつきを考慮したシミュレーションを用いて検証した。これらの結果より、結合部に柔軟要素を含む関節機構を制御する場合、アクチュエータの数を十分大きくすれば、そのばらつきを軽減し、制御できることが明らかになった。

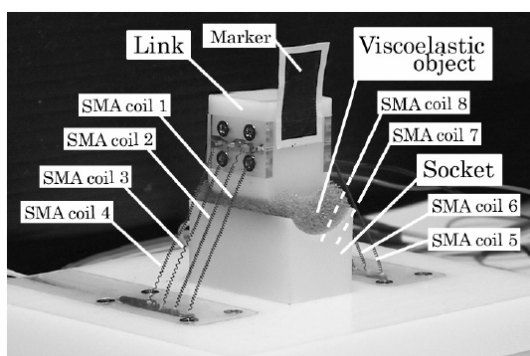


図3 複数のアクチュエータで駆動する可動関節機構

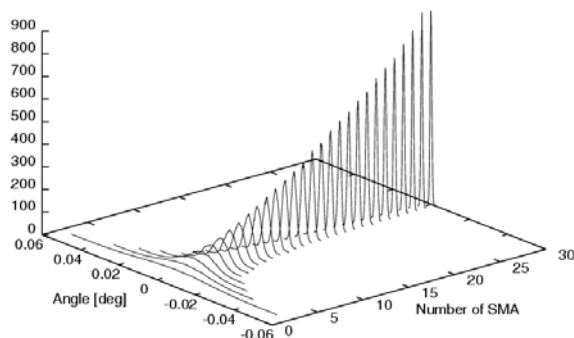


図4 アクチュエータ数を変更した際のリンク角度に対する確率密度関数

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)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 6 件)

Mizuho Shibata, Takahiro Yoshimura, Shinichi Hirai, "Angle Control of Loosely Coupled Mechanism in 3D Space Using Length Sensors", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1178-1183, 2007、査読有り

Mizuho Shibata, Shinichi Hirai, "Control of Loosely Coupled Joint by Soft Actuators via Deformable Cartilage", IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, CD-ROM, 2007、査読有り

Mizuho Shibata, Takahiro Yoshimura, Shinichi Hirai, "Loosely Coupled Joint Driven by SMA Coil Actuators", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4460-4465, 2007、査読有り

吉村尚洋、柴田瑞穂、平井慎一、"アクチュエータ束により駆動される Loosely Coupled Mechanism の運動解析", 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、2007、CD-ROM、査読無し

吉村尚洋、柴田瑞穂、平井慎一、"アクチュエータ束により駆動される Loosely Coupled Mechanism の角度制御", ロボティクス・メカトロニクス講演会'07、CD-ROM、2007

吉村尚洋、柴田瑞穂、平井慎一、"アクチュエータ特性のばらつきを考慮した Loosely Coupled Mechanism の静力学解析", 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、2008、CD-ROM、査読無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴田瑞穂 (SHIBATA MIZUHO)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号 70454519