

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24年 6月 5日現在

機関番号：25301
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22760191
 研究課題名（和文） 遅れの多いヒトの運動制御メカニズムを規範とする視触覚統合制御手法の提案
 研究課題名（英文） An integrated control strategy for visual and tactile mechanisms of human motor control with large time delay
 研究代表者
 井上 貴浩（INOUE TAKAHIRO）
 岡山県立大学・情報工学部・准教授
 研究者番号：60453205

研究成果の概要（和文）：ヒトの運動制御機構とロボットのそれとでは動作に至る過程における視触覚に起因する神経パルス信号の遅れにおいて大きく異なる。生体規範モデルとそれに適した制御手法の提案という目標の下、本研究ではロボット制御ループに意図的に時間遅れを導入し、ハンドの把持・操り動作や上肢冗長ロボットのリーチング運動を行った。その結果、100ms程度の大きな制御遅れが存在しても、把持・操りタスクを実現することができた。また、上肢ロボットにおいては、与える目標軌道を逆運動学による従来手法ではなく、積分コントローラによって任意に整形することによって、特異姿勢や不良設定問題を解消することができた。

研究成果の概要（英文）：It is extremely different between the human motor control and conventional robot control systems. Especially, the large time delay due to the transmission of a nerve impulse influences the movements of the robot and the human. It is clearly indicated that the reaching movement of a redundant upper-limb robot in gravity converges successfully with resolving the singular configuration of the robot and the so-called ill-posed problem.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：バイオメカトロニクス

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：リーチング運動、上肢、ヤコビ行列、冗長関節、腱駆動、非線形ばね

1. 研究開始当初の背景

介助や介護の現場のみならず通常生活において今後、ロボットが人間と接する機会が急速に増え、人間機械協調システムとして相応しいロボットの設計や制御の必要性が超高齢化社会において日増しに高まっている。そのような環境の中でロボットに不可欠な要素として、人間がロボットと違和感なく協

調作業できること（親和性）があげられる。このようなコンプライアンス特性を満足するためには、従来からロボットのアクチュエータにバックドライバビリティを設ける必要があると言われている。この要因は、アクチュエータの高減速比による関節剛性の増大と静止摩擦による伝達トルクの不連続性にある。これらのことにより人を持ちあげる

ような高負荷作業や衝突安全まで考慮した場合、減速比とバックドライバビリティ性能とはトレードオフの関係にあるといえる。つまり、ロボットの関節軸にアクチュエータを配置する従来の設計手法がバックドライバビリティ実現の障壁となっている。

2. 研究の目的

ロボットと比較してヒトの身体運動においては遥かにコンプライアントな動作が可能である。予期しない歩行中の段差や上肢への障害物の接触・衝突があったときでさえも、接触部位や体幹部の瞬時の脱力により容易に傷害を回避することができる。つまり、ヒトの筋骨格構造が高いバックドライバビリティの源泉であると言える。特に上肢に注目すると、屈筋群と伸筋群、上腕二頭筋と上腕三頭筋ペアのような拮抗型の筋配置となっており、ロボットのようにアクチュエータが各関節に直接配置された駆動形態にはなっていない。

このようなことから、本研究では上肢の拮抗筋構造に着目し、その構造を模倣したロボットアームの手先到達運動中のバックドライバビリティ性の評価を行う。また、拮抗型腱駆動機構を採用した場合のロボットアームの手先到達運動を例にとり、本駆動機構に適した簡潔な制御手法の提案を行う。

3. 研究の方法

ヤコビ行列を用いずとも手先到達運動が実現できる制御手法を提案する。また、アーム手先への衝突を想定した外力を加えた数値シミュレーションを通して、提案制御手法の有効性を明らかにする。

4. 研究成果

重力下での拮抗腱駆動ロボットアームのモデリングとリーチング運動を実現するための腱駆動機構に適した簡潔な制御則を提案する。したがって、ロボットに与えるタスクはアーム先端の位置制御となり、3リンクで冗長自由度となる。

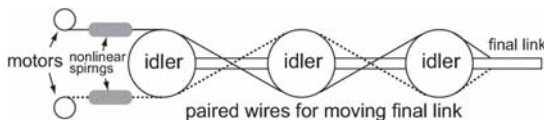
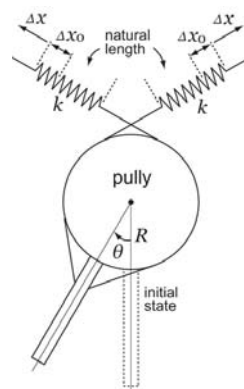


図1. 腱駆動機構

さらに本研究では図1のように、拮抗的に配置した腱とアクチュエータ間に直列に非線形ばねを挿入している。これは腱のたわみを防ぎ、リンクへの衝突や衝撃を吸収できる働きをする。つまり、極めてシンプルな機構によりコンプライアンス性を獲得している。さらに、本機構ではアクチュエータが各関節に直接取り付けられておらず、代わりにアイド

ラ（ベアリングとプーリを組み合わせたもの）を用いることでアクチュエータに由来する減速機の機械的インピーダンスや摩擦トルクを無視することが可能になる。すなわち、制御性能において極めて有効なバックドライバビリティ性を有する構造になっている。ここで、第1リンクや第2リンクの駆動機構も同様であり、それぞれのリンクを起始点として腱が拮抗的に張られている。したがって、例えば図1の中間アイドラには合計4本の腱が通り、根元側のアイドラには合計6本の腱が通る構造になっている。本研究では弾性力が変位の2乗に比例する非線形ばねを用いている。その理由は図2のように、関節回転剛性を関節角に対して独立に変えられるためである。



それに加えて、同様の機構的特徴により、拮抗配置の両アクチュエータに与える指令トルクを均等に増加させることも、節剛性を増大させることができる。

導出した3リンク冗長アームモデルを用いてアームを垂下姿勢から振り上げアーム先端位置(x, y)

図2. 非線形ばねの導入

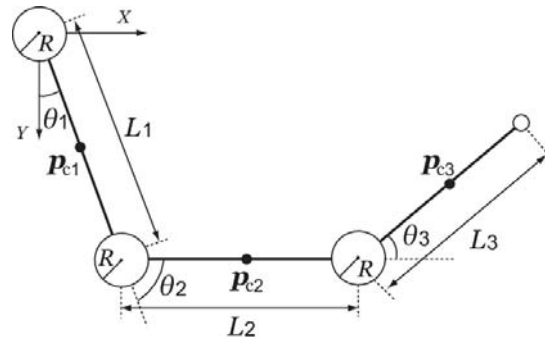


図3. 上肢冗長アームモデル

が (x^d, y^d) に到達するような位置決め制御を行う。つまり、作業空間においてはステップ入力に相当する。各関節を駆動するためのアクチュエータを拮抗的に2個ずつ配置しており、図3の各関節において反時計回りに駆動するアクチュエータトルクを根元から先端にかけて (u_1, u_3, u_5) とし、時計回りを同様に (u_2, u_4, u_6) とする。振り上げ動作を実現するための制御則として、関節角を操作量とする以下のようなPD制御を行う。本制御則の特徴を以下に示すと、

1. 作業空間ではステップ入力による位置決め制御
2. 関節空間では関節角軌道追従制御

3. 目標関節角 θ_id は仮想目標
4. 重力補償項がない
5. ヤコビ行列がない

ロボットに与える振り上げタスクは、垂下姿勢 ($x=0\text{m}$, $y=0.3\text{m}$) から手先位置を $x=0.2\text{m}$, $y=0.0\text{m}$ まで持ち上げる動作である。この目標手先位置はステップ入力である。

まず、 xy 平面上での軌跡を図 4 に示す。結果から滑らかに目標位置に到達していることが分かる。

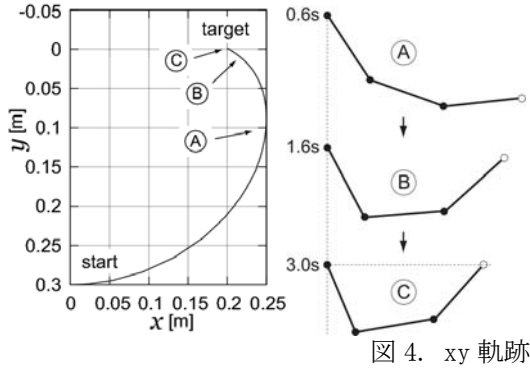


図 4. xy 軌跡

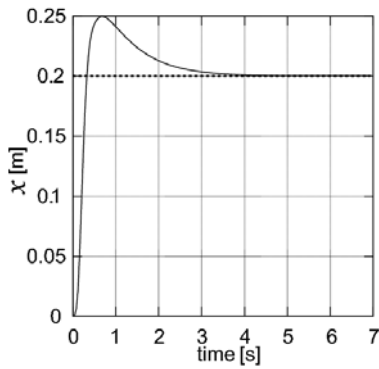


図 5. x 軌道

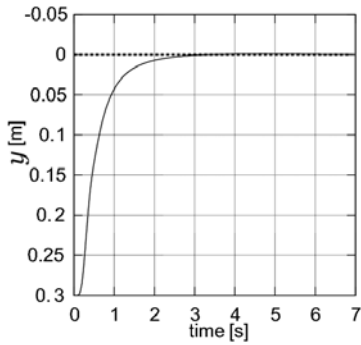


図 6. y 軌道

図 5, 図 6 が手先位置の時間軌道である。このとき、 x 座標に関してはおよそ 3 s で、 y 座標に関してはおよそ 2 s で目標位置に収束していることが見て取れる。代表点における各リンク姿勢が図 4 右図であり、第 1 リンクに大きなオーバーシュートが発生していることが分かる。この傾向は図 7, 図 8 から明

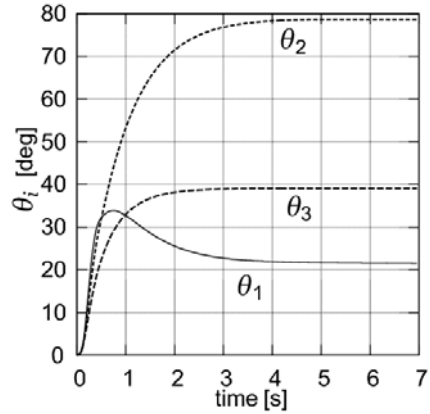


図 7. 関節軌道

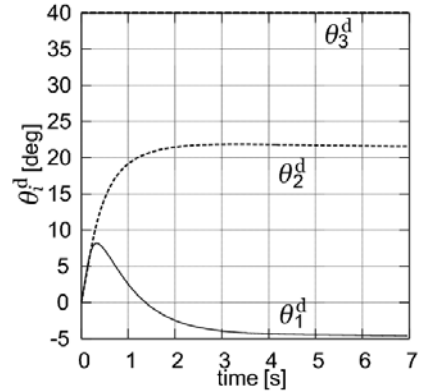


図 8. 関節角仮想目標軌道

らかである。また、図 8 にはリアルタイムで変化する第 1, 第 2 リンクの目標軌道を示しており、両図を比較すると各リンク角度がそれぞれの目標角に収束していないことが分かる。つまり、これらは仮想的な目標軌道であると言える。

ロボット制御の従来理論においては、各リンクへの重力をオンラインで推定可能であると、重力補償（重力の影響を相殺）を施すことで仮想的な水平 2 次元面内での P 制御や PD 制御により所望の挙動を獲得している。積分器を省くことで、アクチュエータの出力飽和時や予期しない外力印加時のウィンドアップ現象で見られるような、急な環境変化に対するシステムの不安定性を取り除くことが可能になる。しかしながら、重力補償にはロボットの各リンクの正確な重心位置を必要とする。ところが、実ロボットの設計においては機構的な制約や幾何学的なデザインの採用により、重心位置が正確に求まるとは限らない。このようなことから、各リンクに加わる重力をリアルタイムで推定することはほとんど不可能であり、産業用ロボットにおいては重力補償のための電流ループによる比例積分制御が主流である。本研究での提案手法においては、関節角目標軌道の生成過程に積分器が使われており、PD 制御則における定常的な角度偏差に起因する残存トルクとバイアストルクによって重力を補償し

ている。

加えて、提案制御則にはヤコビ行列が使われていない。ヤコビ行列に係わる従来からの問題点として、特異姿勢における不安定問題が挙げられる。この原因はヤコビ行列のランク落ちにより逆行列が計算不能 ($\det J=0$) になる点にあり、不安定性はその逆行列を利用する線形化補償や作業座標系における位置制御にしばしば起こり得る。これは関節構造を有するロボットの宿命であり古くから指摘されている。この「制御不能」を回避するために、特異点に近づかない軌道決定手法や特異点およびその近傍における軌道生成手法が提案されている。また、近似ヤコビ行列を用いた転置行列によるロボット制御が試みられているが、共通的な問題として特異点近傍の定義が難しい。加えて、アクチュエータトルクの飽和特性に起因する特異点での停留や歩行ロボットで見受けられる関節の可動範囲の制限があり、根本的な解決策は見当たらない。

一方で、本研究で提案している制御則はセンサベースな制御手法であり、冗長アームの手先位置決め制御にもかかわらず動力学補償や線形化補償を行っていないためヤコビ行列を必要としない。したがって、上記の諸問題を考慮する必要がない。

本研究では、非線形ばねを腱とアクチュエータ間に配した拮抗型腱駆動機構を有する 3 リンクロボットアームのモデル化を行い、上肢の振り上げ運動のような手先位置決め制御において腱駆動機構に適した制御手法の提案を行った。モデル化に際して重力影響下での動作を前提とした上で、重力補償項を付加しない制御則を提案し、重力下において振り上げ到達運動を関節角を操作量とする簡潔な制御則により実現した。また、本制御手法にはヤコビ行列も含まれておらず、冗長自由度のマニピュレータ制御においても容易に手先位置決めが実現できることを明らかにした。

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 8 件)

- [1] 井上貴浩, 加藤亮祐, 平井慎一
拮抗型ばね駆動モデルによる不良設定問題の解消, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012 年 5 月 29 日, 浜松
- [2] 加藤亮祐, 井上貴浩, 平井慎一
多関節冗長アームの重力下でのリーチング運動, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012 年 5 月 29 日, 浜松
- [3] 井上貴浩, 加藤亮祐, 平井慎一

非線形ばね要素を含んだ拮抗筋駆動指のモデリング, 計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2011 年 12 月 25 日, 京都大学

- [4] 井上貴浩, 加藤亮祐,
PWM によるシームレス速度制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2011 年 5 月 28 日, 岡山
- [5] T. Inoue, D. Takizawa, S. Hirai,
Modelless and Grasping-forceless Control by Robotic Fingers Capable of Mechanically Coupled Movement, IEEE/RSJ IROS, 2010 年 10 月 20 日, 台北
- [6] T. Inoue, Shinichi Hirai,
Robotic Manipulation with Large Time Delay on Visual Feedback Systems, IEEE/ASME AIM, 2010 年 7 月 8 日, モントリオール
- [7] 井上貴浩, 滝澤大佑, 平井慎一,
指関節連動運動を備えた 2 指多自由度ロボットハンドによる物体姿勢非ヤコビ制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2010 年 6 月 15 日, 旭川
- [8] Y. Yamazaki, T. Inoue, and S. Hirai,
Two-Phased Controller for a Pair of 2-DOF Soft Fingertips Based on the Qualitative Relationship between Joint Angles and Object Location, IEEE ICRA, 2010 年 5 月 6 日, アンカレッジ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 貴浩 (INOUE TAKAHIRO)
岡山県立大学・情報工学部・准教授
研究者番号: 60453205