

人間と共存・協調するロボットアームの動作生成手法の開発

—Development of Motion Control Method for Manipulators Cooperating with Humans—

1081015

研究者代表 千葉工業大学未来ロボット技術研究センター 研究員 瀬戸 文美
共同研究者 九州大学高等研究機構 SSP学術研究員 (特任准教授) 杉原 知道

[研究の目的]

本研究は人間と作業空間を同じくし、人間と共存・協調するロボットアームのための動作生成手法の開発・提案を目的としている。

人間の生活空間内において人間と共存・協調するマニピュレータの制御においては、人間や障害物との接触などで発生する外力への柔軟性、人間との協調作業への適応、人間に脅威を与えない動作生成などが必要とされる。

本研究ではこのような目的のもと、研究開発テーマを下記2つに分け、それぞれ研究を進めた。

(a) 拘束力に基づく7自由度マニピュレータの冗長性制御

人間共存・協調型ロボットシステムでは、生活空間内における複雑な作業に適応し、人間と同様の動作を実現するために冗長性を有する7自由度マニピュレータがよく用いられる。しかし7自由度マニピュレータは有する冗長性のため、逆運動学の解が一意に定まらないという問題がある。その問題に対し図1に示すようなパラメータArm Angle ϕ を導入し、逆運動学の解析解

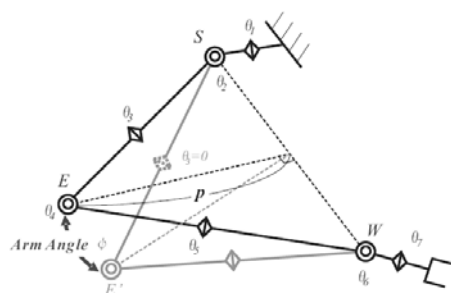


図1 Arm Angle ϕ

を求める手法が提案されている¹⁾。

ここで人間の動作を見てみると、人間は作業に応じて自然にArm Angleを変化させている。よって、本研究では発生する拘束力や人間から加えられる操作力に基づいて適したArm Angleを自然に決定し、協調作業中にArm Angleの値を最適値へと滑らかに収束させる手法を提案する。

(b) オンライン非線形目標位置整形

ロボットアームにおいて外力に対する柔軟性を実現するには、従来の軌道計画に基づく手法とは異なり、制御系に時刻を陽に含むことなく状態フィードバックのみで動作生成を行う必要がある。この問題に対し有本らは、仮想的なバネ・ダンパ系によって発生する引力に基づいてマニピュレータの手先を制御する仮想バネ・ダンパ仮説を提案している²⁾。しかしながらこの手法では動作開始時の手先加速度が最大となり、人間の動作のような滑らかな手先速度プロファイルが得られない。

本研究では仮想バネ・ダンパ系に与える目標手先位置を実時間で整形することで、滑らかな手先速度プロファイルを実現し、加えられる外力へならうことを可能とする手法を提案する。

[研究の内容、成果]

(a) 拘束力に基づく7自由度マニピュレータの冗長性制御

ロボットアームの手先にインピーダンス特性を持たせ、人間から加えられる操作力に基づいて手先の位置姿勢を変化させることで、人間との協調

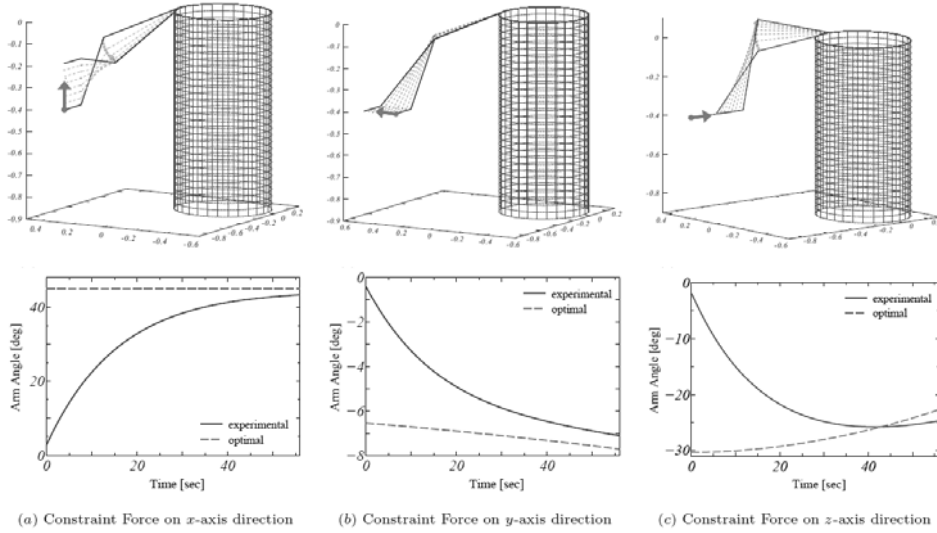


図2 Simulation Results of Redundancy Resolution Based on Constraint Force

作業を実現することができる。また、加えられる力によって各関節に発生するトルクを計算し、その重みづけ自乗和が最小となるArm Angle ϕ を最適化アルゴリズムを用いて求めることで、加えられる力に対して最適なArm Angleの値 ϕ_{opt} が求められる。求められた ϕ_{opt} を平衡点として ϕ にインピーダンス特性を持たせることにより、 ϕ を ϕ_{opt} へと滑らかに収束させることができる。

本手法により、人間との協調作業において行う作業に応じてArm Angleを適切に決定し、冗長性を効率的に利用することができる。また、モータのトルク容量に応じて、各関節にトルクを振り分けることが可能である。さらにマニピュレータを設計する際に、行う作業を考慮したアクチュエータの選択が行える。

提案した手法を7自由度マニピュレータモデルに適用し、計算機シミュレーションを行った結果を図2に示す。上段はロボットの手先 x , y , z 方向にそれぞれ操作力を加えた際の手先の運動および ϕ の変化の様子であり、下段はそれぞれの際に求められた ϕ_{opt} と ϕ の変化の様子をプロットしたものである。これらの結果より、加えられる力に基

づいてロボットアームが手先位置を変化させつつ、 ϕ_{opt} へと ϕ が滑らかに収束していることが分かる。

(b) オンライン非線形目標位置整形

本研究では仮想バネ・ダンパ系の平衡点として与える目標位置 x_g を、従来の仮想バネ・ダンパ仮説のように最終的な目標位置 x_d に固定したり、時刻の関数として設計したりせず、次の伝達関数を用いて実時間で整形する。

$$x_d = \frac{1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \{ r x_g + (1 - r) x \}$$

これは、もともとの目標位置 x_g を現在の手先位置 x と $r: (1-r)$ に内分する点へ置き換え、さらに2次遅れフィルタによって運動を鈍らせるものと解釈できる。2次遅れフィルタによって動作開始時の手先の加速度及び速度が0となり、滑らかな動き出しが実現される。また、手先位置をフィードバックすることにより、外力によって x の変化が阻害された場合においても x_d は x から大きく離れず過度の押し付け力や急加速は発生しない。かつ、外力解消後にはマニピュレータ

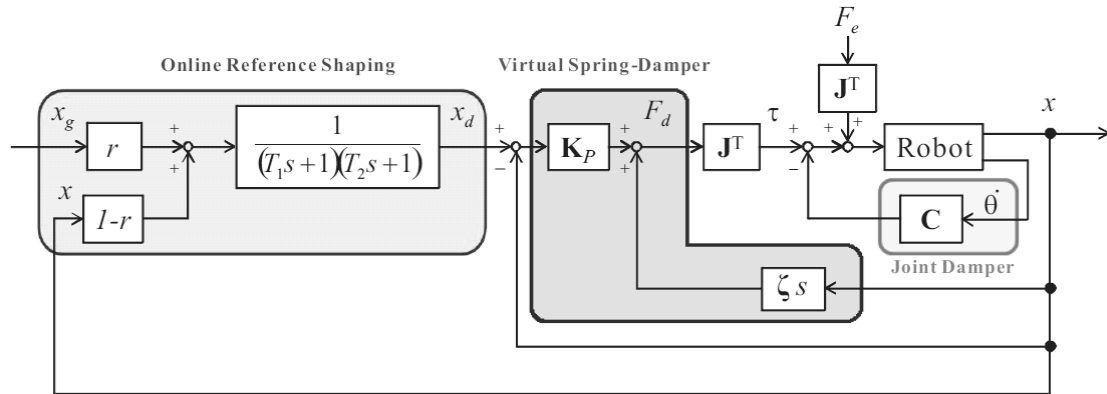


図3 Proposed Online Reference Shaping Control

の手先は目標位置へと緩やかに収束する。さらに、加えられる外力に対してある程度柔軟にならうことが可能である。

提案方法を平面4自由度マニピュレータモデルに適用し、計算機シミュレーションを行った。動作の最中に一定時間外力を加えた際の手先軌道を図4に示す。提案手法を用いることで加えられた外力に対して柔軟に手先位置を変化させ、かつ外力解消後には目標位置へと収束していることが分かる。

また、中間目標位置生成に用いる内分比 r の値を一定にせず、手先の初期位置 x_0 と最終的な目標位置 x_g に基づいて動的に変化させることで、動作開始時には手先速度変化を緩やかに、動き終わりには目標位置への収束を早くすることができる。

r の値を変とした場合の計算機シミュレーションの結果を図5及び図6に示す。図5は通常のリーチング動作における手先速度プロファイルを示したものである。図5より、提案手法を用いることでほぼベル型の滑らかな手先速度プロファイルが実現されていることが分かる。また、図6は動作開始時に約3.0秒間手先の運動を拘束し、その後拘束を解いた際の手先速度プロファイルを示したものである。図6より、手先が外力によって拘束されるような場合でも、提案手法を用いること

で速度の急変動を起こすことなく、滑らかな手先速度プロファイルが実現されていることが分かる。

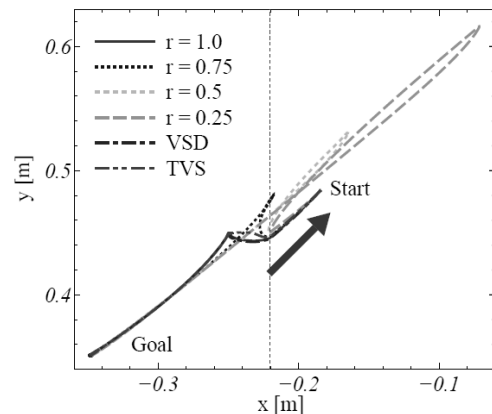


図4 Endpoint Trajectory with External Force

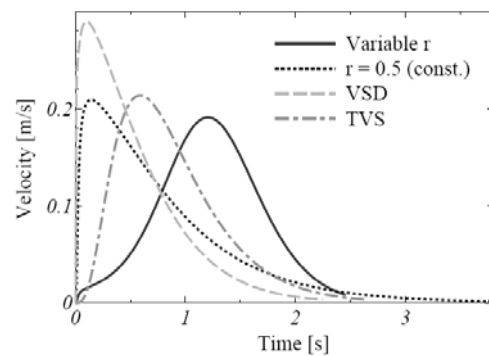


図5 Hand Velocity Profile of a Reaching Motion

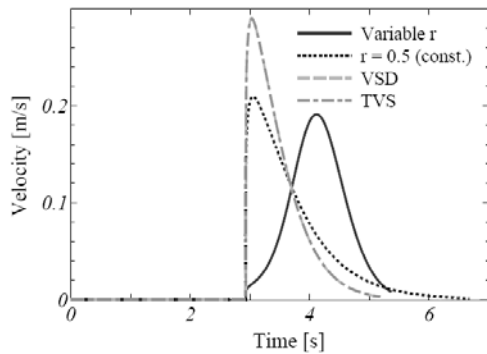


図6 Tangential Hand Velocity Profile with Hand Position Temporarily Constrained

[今後の研究の方向、課題]

それぞれのテーマについて、下記に述べる方針に基づき課題解決を行い、引き続き研究を進める予定である。

(a) 拘束力に基づく7自由度マニピュレータの冗長性制御

提案手法では、アームの有する冗長性をArm Angleを変化させることに限定して利用している。これを人間から加えられる操作力のみならず、ロボットアームの力学パラメータや関節の機構的な干渉、各関節の可動範囲や重力の影響などを考慮することで、アーム全体として冗長自由度を自然に利用することを考える。

(b) オンライン非線形目標位置整形

これまで得られた結果より、仮想バネ・ダンパ仮説において、線形なダンパ特性のまま2次の非線形バネ特性とすることで、人間に近い特性を持った動作となることが示唆された。今後はその知見を裏付けるため、外力が加えられる際に人間はどのように手先位置を変化させているのかを解析する。そして、得られた知見をもとに、外力印加時にロボットアームがどのような運動を生成するべきか検討する。

[参考文献]

- 1) 清水昌幸他. 関節の可動範囲を考慮に入れた7自由度冗長マニピュレータの解析的逆運動学解法. 日本ロボット学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 606–617, 2007.
- 2) S. Arimoto and M. Sekimoto. Human-Like Movements of Robotic Arms with Redundant DOFs: Virtual Spring-Damper Hypothesis to Tackle the Bernstein Problem. Proc. of the 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1860–1866, 2006.

[成果の発表、論文等]

- 1) 瀬戸文美, 小菅一弘. 拘束力に基づく7自由度マニピュレータの冗長性制御手法とその人間-ロボット協調システムへの適用. 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集CD-ROM, 2008.
- 2) 瀬戸文美, 杉原知道. マニピュレータ制御における速度急変動防止のためのオンライン目標位置整形. 第14回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 29–34, 2009.
- 3) 瀬戸文美, 平田泰久, 小菅一弘. 作業拘束・環境拘束に適応可能な人間協調型ロボットの協調動作生成手法. 日本ロボット学会誌, Vol. 27, No. 2, pp. 99–107, 2009.
- 4) 瀬戸文美, 杉原知道. 滑らかなリーチング動作のための手先位置フィードバックによる非線形目標位置整形. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2009 (ROBOMEC 2009), 2009. (発表予定)
- 5) F. Seto and T. Sugihara. Online Reference Shaping with End-point Position Feedback for Large Acceleration Avoidance on Manipulator Control. The 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2009. (submitted)