

必要モータ電圧の予測に基づくマニピュレータのセンサレス衝突検出

Sensorless Collision Detection for Manipulators Based on Prediction of Moter Voltage

○ 山田 晃士 (立命館大) 正 白井 良明 (立命館大)
島田 伸敬 (立命館大)

Koji YAMADA, Ritsumeikan University
Yoshiaki SHIRAI, Ritsumeikan University
Nobutaka SHIMADA, Ritsumeikan University

This paper proposes a tactile-sensor-less method of detecting collision to any body part of a moving manipulator. Considering the kinematic model for a PD-controlled 6DOF manipulator the method predicts the ideal controlling signals (voltage) required for the desired motion by estimating the driving motor torque and the current angular velocity for each motor. When the predicted signal and the actually measured one has a certain magnitude of difference it is decided that the collision occurs.

Key Words: Motion control, multi-joint robot, Collision detection

1 はじめに

近年, 人間と同じ生活空間で生活の支援を行うサポートロボットが活動しつつある. 生活空間でロボットが活動する際に, 物体との接触事故が起きることが予想される. ロボットの安全な動作のためには接触センサやカメラなどを用いた方法がある. しかし, 死角や外乱等の問題があるため, 外界のセンサを用いない方法も研究されている. マニピュレータの電圧値の変化により, マニピュレータの手先の位置と姿勢を柔軟に動作させるセンサレス力制御 [1] があるが, これらは主に手先にかかる外力の検知および制御の方法である. 本研究では, サポートロボットが周囲の人や物体に接触したことを検知するために, マニピュレータが位置制御するために必要な指令値を予測し, マニピュレータと物体が衝突したことによる実指令値と予測指令値の差から衝突を検出する. 実際に衝突検出と停止動作を行い, 外部によるダメージの軽減度合を確かめる. し, 衝突時に周囲に危害を加えない動作を作成しその効果を確かめる.

2 6軸マニピュレータの構成

本研究では, RPRPRP 型 6 軸マニピュレータを使用する. マニピュレータは RT-Linux で PD 位置制御されており, 関節角度を出力し, 実指令値 (指令電圧値) をにより稼働している. マニピュレータの先端には 3 軸の指が 3 本取り付けられたハンドがあり, その指先には 3 軸力センサが取り付けられている. 図 1 に全体の実験システムの構成を示す.

3 動力学に基づくマニピュレータの実指令値の予測

3.1 動力学による関節トルク

マニピュレータの通常動作時にかかる各関節が出力するトルクを求める. マニピュレータの各リンク長 L や重量 m などは既知とする. ラグランジュの運動方程式により, マニピュレータの各関節のトルクを式 (1) に示す.

$$\tau = M(q)\dot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) \quad (1)$$

τ は関節のトルクベクトル, M は慣性行列, q は関節角度ベクトル, h はコリオリ力などの非線形ベクトル, g は重力ベクトルである. マニピュレータが実際に動作するときはモータやギアの粘性摩擦によりエネルギーが散逸するするため, 粘性摩擦を考慮

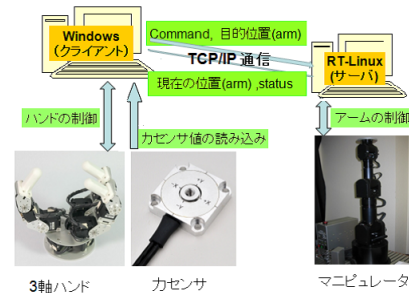


Fig. 1: Manipulators system

した運動方程式を (2) に示す [2].

$$\tau_a = M(q)\dot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + d(\dot{q}) \quad (2)$$

$$d(\dot{q}) = \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} D_i \dot{q}_i^2 \right) \quad (3)$$

τ_a は粘性摩擦を考慮した関節のトルクベクトル, d は摩擦トルクベクトル, D_i は粘性摩擦係数である.

3.2 関節トルクに基づく実指令値の予測

マニピュレータの関節に使われているモータは DC モータであり, モータの駆動トルクと実指令値の間に線形関係が成立し予測指令値 V_e は式 (5) で求めることができる.

$$V_e = a\tau_d + c \quad (4)$$

$$= a\tau + b\dot{q}_i + c \quad (5)$$

$$b = aD_i \quad (6)$$

a, b, c は関節のトルクベクトルから予測指令値を求めるためのパラメータである. a, b, c を決めるためにマニピュレータが様々な姿勢, 関節角速度で回転している時の関節トルク τ , 関節角速度 τ_d , 関節の回転方向, 実指令値を 10 万組以上取得し, 最小二乗法を用いて求める.

3.3 実指令値の予測の実装

動力学で求めた各関節の予測指令値を, マニピュレータに実装し第 4 関節が地面に対し垂直方向と水平方向に回転したときの第 4 関節の実指令値と予測指令値を図 2 に示す.

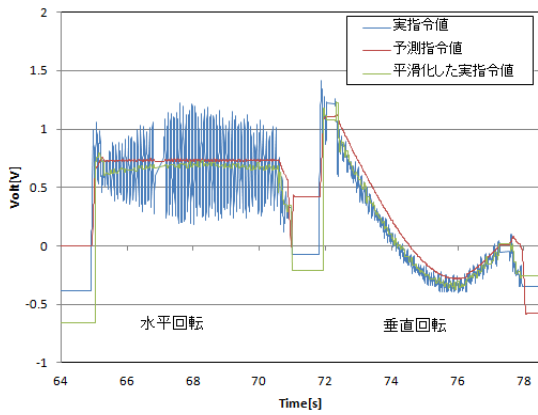


Fig. 2: Predicted control inputs and actual ones for 4th joint

Tab. 1: Distribution of difference between predicted control inputs and actual ones

差分 (以下)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
データ数	13972	722	266	46	27	4

4 センサレス衝突検出

4.1 実指令値と予測指令値の差によるセンサレス衝突検出

外界センサを使用せずに関節角度と実指令値により衝突検出を行う。衝突により関節に負荷がかかると実指令値が変化し、関節角度から算出した予測指令値との差が生じる。実指令値と予測指令値の差がしきい値を越えた時に衝突したと検出する。図3に示す、実指令値の振幅が回転軸の向きによって大きく異なっているため、衝突を検出するためのしきい値が大きくなり衝突検出の感度が悪くなる。そこで、実指令値を平滑化して実効的なしきい値を小さくすることで、衝突検出の感度を向上させる。

4.2 実指令値の平滑化

実指令値に対してピーク検出を行い、凸と凹のピークの間点を衝突検出に使用するための実指令値とする。図3より、実指令値は平滑化することにより水平回転の振幅は最大で1/5以下になる。

4.3 衝突検出のためのしきい値の決定

マニピュレータの姿勢と関節速度を変えながら動かした時、平滑化した実指令値と予測指令値の差の分布を表1に示す。実指令値と予測指令値の差が0.4[V]以上になるのは関節が回転始める時と停止する時である。よって、衝突検出のしきい値が通常動作時は0.3で、回転開始時と停止前は倍の0.6とする。

4.4 センサレス衝突検出の評価実験

実験内容 動作中に最も衝突を起こしやすいマニピュレータの先端に静止物体を衝突させる実験を行う。静止物体には力センサが付いており衝突時の力を取得する。実指令値と予測指令値の差がしきい値を超えた場合にマニピュレータは現在の関節角度で停止する。衝突実験は各関節ごとに10回ずつ行う。

衝突実験結果 マニピュレータの第4関節でのセンサレス衝突検出実験の結果を図3に示す。衝突から検出までにかかる時間が約0.25[s]であり、衝突検出後からマニピュレータが完全停止するまで0.2[s]である。力センサ値は衝突時に9[N]で、停止までに最大で10.5[N]になった。衝突検出した時の

Tab. 2: Impact force magnitude in collision detections

関節番号	2	3	4	5	6
衝突時の力 [N]	20	16	9	8	20
最大の力 [N]	28	21	14	13	26

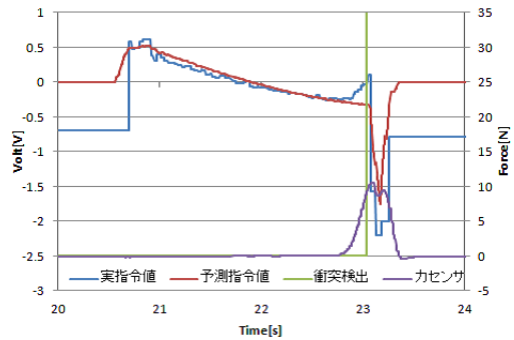


Fig. 3: Control inputs in collision detection

力センサ値の平均と停止までの最大値を各関節ごとに示したのが表2である。第1関節は減速比が非常に大きいため外力が実指令値にほとんど影響されず、衝突検出を行うことができなかった。

衝突検出の性能評価 ロボットと人の事故による傷害を最小限に抑えるために人間の痛覚に関する研究が山田らにより行われている。φ10[mm]の円柱を人間の各部位に接触させ、痛覚が発生する時点の接触力を痛覚耐性値として、複数人の被験者に対して行った結果、人体の痛覚耐性値の平均値は65~146[N]であった[3]。表2より、衝突時の最大の力は28[N]であり、人体の痛覚耐性値をの半分以下であるため、人に危害を加えない条件でのマニピュレータのセンサレス衝突検出が実現できた。ただし、モータの回転開始時と停止前の0.2[ms]間はしきい値が0.6であり、衝突時の力が約60[N]になるため注意が必要である。

5 おわりに

本研究では、外界センサを使わずに動力学に基づいたマニピュレータの衝突検知する方法を提案し、実際に6軸マニピュレータに実装し、実指令値と予測指令値の差から衝突を検出できることを確認した。

- 粘性摩擦を考慮した運動学に基づいて、関節角度からマニピュレータの位置制御を行うために必要な各関節の実指令値を予測した。
- 実指令値を平滑化することにより各関節の姿勢に関係な1つのしきい値により衝突検出を可能にした。
- 人体の痛覚耐性以下の衝突力でマニピュレータの衝突検出、停止動作を実装した。

文献

- [1] 大賀淳一郎, 西原泰宜, 大明準治: “産業用ロボットアームの動力学モデルに基づいたセンサレス力制御”, 東芝レビュー, Vol.66, No.5, 2011 pp.38-41
- [2] 小川鑣一, 加藤了三: “基礎ロボット工学”, 東京電機大学出版局, 1998, pp.155-166
- [3] 山田, 吹田, 池田, 杉本, 三浦, 中村: “ヒト・ロボット共存のための人間工学実験に基づく痛覚レベルの人体耐性値の解明”, 日本機械学会論文集 (C 編), 1997, 63 巻, pp.238-243