

ロボットシステムの微分特性評価に関する基本的考察

東京工業大学 ○ 倉爪 亮 広瀬 茂男

Fundamental Analysis for Differential Properties in Robotics

Tokyo Institute of Technology : Ryo Kurazume, Shigeo Hirose

Abstract - This paper gives a fundamental analysis of differential properties in robotics, such as evaluation of positioning errors for mobile robot systems. Conventional analyses for these properties have been dealt with under some assumptions such as probability distributions with variances, but it does not always give a fundamental property correctly especially for a complex system with multi degrees of freedoms. In this paper, we propose a new analysis of differential properties using Linear Programming (LP) methods.

1 はじめに

ロボットシステムの特性を評価する場合、アームについては微小運動の伝達特性、また移動ロボットについては位置計測誤差の伝搬などの微分特性が多く用いられる。従来、これらの特性の解析には、個々の微小変動の出現確率がある確率分布に従うという仮定のもとに解析が行なわれていた。しかし著者らはこのような考え方には根本的な誤りのあることに気付いた。そしてこの手法では現象の生起回数が増加すると、その結果は実際の変動とは異なったものとなることがわかった。本報告ではこの問題点を明確化し、微分特性評価に対する新たな解析法を示す。

2 従来の誤差解析法の問題点

ここでは簡単のため、移動ロボットの位置同定の例を用いて説明する。このような計測では、測定誤差をガウス分布等の確率分布で与え、各測定毎の誤差分散を積算することで累積誤差を評価する手法がこれまで提案されている [1],[2]。ところがこの方法は測定回数が増えると、実際に発生する誤差と異なるという重大な問題を生じる。例えば、初期位置 0 から一定速度 v で直進するロボットを考え、 n サンプル後のロボットの推定位置を x_n とする。ただしロボットの位置は次式のようにデッドレコニング計測されているとする。

$$x_n = x_{n-1} + v\tau \quad (1)$$

ここで速度の測定誤差が平均 0、分散 σ_v^2 の確率分布に従うとすると、(1) 式を全微分しその二乗平均値を計算すると、 n サンプル後の推定位置の誤差分散が、

$$\sigma_{x_n}^2 = \sigma_{x_{n-1}}^2 + \sigma_v^2 \tau^2 = \sigma_{x_0}^2 + n\sigma_v^2 \tau^2 \quad (2)$$

と与えられる。ところがこのロボットは n サンプル時間内に距離 $nv\tau$ だけ移動するから、移動距離に対する誤差分散の平方根 (標準偏差) の割合は、初期分散 $\sigma_{x_0}^2$ を 0 とすると

$$\frac{\sqrt{\sigma_{x_n}^2}}{nv\tau} = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\sqrt{\sigma_v^2}}{v} \quad (3)$$

となる。これは無限大の距離を進むと相対的に標準偏差がゼロになることを示している。しかし実際の移動誤差は移動距離の一乗あるいはそれ以上の率で増加することは明らかである。(3) 式はその事実と合わない。

3 誤差の性質

測定に関わる誤差には、Fig.1 に示すように、測定のたびに平均 0 のある確率分布に従ってばらつく「偶然誤差」と、測定装置の目盛のずれなどその測定固有の値を有する「系統誤差」が同時に存在すると考えられる [3]。しかし従来の議論では偶然誤差しか考慮していない。前項で指摘した問題が生じたのはこれが原因と思われる。

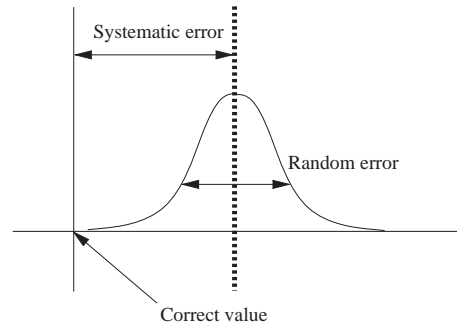


Figure 1: Random and systematic errors

一般に少ない回数の測定で測定量が得られる場合などは、測定開始前により正確な別の手段を用いて測定システムを校正することにより、系統誤差の影響を無視することができる。ところがデッドレコニング法のように同じ測定を数多く繰り返す場合、系統誤差こそが本質的な誤差を形成し、その大きさは測定回数に比例して増加する。それに対して偶然誤差は測定回数の平方根に比例する。つまり Fig.2 に示すように測定回数が増えると、従来無視されていた系統誤差の割合が相対的に大きくなり、その影響が支配的になるため、従来からの誤差論とは別の全く新しい考え方の導入が必要と考えられる。

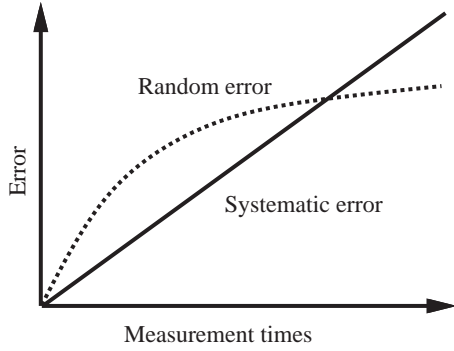


Figure 2: Comparison between random and systematic errors

4 新たな誤差解析法の提案

系統誤差を定量的に評価する新しい解析法として、系統誤差の領域を最大値、最小値で与え、線形計画法を利用して測定量の誤差を計算する手法を提案する。これは鄭ら [4] の手法をさらに発展させたものである。例としてここではロボットの位置同定を考え、 n 回目の測定でのロボットの直進速度、回転速度をまとめて v_n とし、その時のロボットの推定位置 x_n の微分特性を次式で与える。

$$dx_n = Adx_{n-1} + Bdv_{n-1} \quad (4)$$

具体的に n 回目の測定時の位置同定誤差は以下のように計算される。まず、ロボットの自由度を m 、測定変数の数を l 、速度測定誤差の領域を $l_v \leq dv_n \leq u_v$ とする。

1. dx_{n-1}, dv_{n-1} をパラメータと考え、(4) 式中の m 個の方程式から $m-1$ 個のパラメータを消去し、 $l+mC_{m-1}$ 個の方程式を作る。

$$f_i(dx_n) = g_i(dx_{n-1}, dv_{n-1}) \quad i = 1 \sim l+m C_{m-1} \quad (5)$$

2. 次に dx_{n-1}, dv_{n-1} の様々な組合せに対して、 $n-1$ 回目の測定で得られた dx_{n-1} の頂点座標や速度測定誤差の領域を考慮して、(5) 式右辺の $g_i(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ に対する最大値 $g_{i,max}(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ 、最小値 $g_{i,min}(dx_{n-1}, dv_{n-1})$ を計算する。

3. $n-1$ 回目の測定で使用した拘束条件リスト

$$l_j \leq h_j(dx_{n-1}) \leq u_j \quad j = 1 \sim s \quad (6)$$

と (4) 式を用い、次式を計算する。

$$\tilde{h}_j(dx_n) = h_j(A^{-1}dx_n) \quad (7)$$

$$\tilde{l}_j = l_j + \min(h_j(A^{-1}Bdv_{n-1})) \quad (8)$$

$$\tilde{u}_j = u_j + \max(h_j(A^{-1}Bdv_{n-1})) \quad (9)$$

4. 新たな拘束条件リストを作成する。

$$l_k \leq h_k(dx_n) \leq u_k \quad k = 1 \sim s \quad (10)$$

ただし

$$l_k^T = (g_{i,min}(dx_{n-1}^T, dv_{n-1}^T), \tilde{l}_j^T)^T \quad (11)$$

$$u_k^T = (g_{i,max}(dx_{n-1}^T, dv_{n-1}^T), \tilde{u}_j^T)^T \quad (12)$$

$$h_k(dx_n)^T = (f_i(dx_n)^T, h'_j(dx_n)^T)^T \quad (13)$$

$$s \leftarrow s + l+m C_{m-1} \quad (14)$$

である。これにより位置同定誤差 dx_n の存在領域は m 次元空間で (10) 式で規定される凸多面体の内部となる。

5. 拘束条件リストが無限に増加するのを防ぐため、step 4 で領域の境界を決定するのに用いられなかった拘束条件や、領域の境界を規定する平面の面積を評価基準として優先度の低い拘束条件を決定し、拘束条件リストから削除する。

6. step 1 へ戻る。

これらのアルゴリズムは線形計画法を用いることにより高速に計算することができる。Fig.3 に y 軸方向へ直線移動する移動ロボットの誤差計算例を示す。

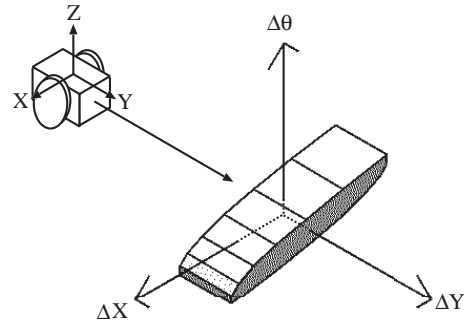


Figure 3: Example of positioning errors

参考文献

- [1] 渡部, 油田: “車輪型移動ロボットのデッドレコニングシステムにおける位置データ誤差”, 日本ロボット学会第6回学術講演会予稿集, pp.347-350, 1988.
- [2] 登内, 坪内, 有本: “移動ロボットにおける空間有限性を考慮した位置推定-内界センサ情報と作業領域に関する知識のベイズの融合-”, 日本ロボット学会誌, Vol.12, No.5, pp.695-699, 1994.
- [3] 吉沢: “新しい誤差論 実験データ解析法”, 共立出版, 1989.

- [4] 鄭, 友近, 吉川: “複数のロボット機構による協調的操り時の動的可操作性”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.892-900, 1993.
- [5] V. フォータル: “線形計画法”, 啓学出版, 1988.