



Title	適応フィルタを用いた多輪システム制御器とリアルタイム軌道追従
Author(s)	黒田, 和暉
Citation	平成30年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書. 2019
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/71965
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

平成30年度学部学生による自主研究奨励事業研究成果報告書

ふりがな 氏 名	くろだ かずき 黒田 和暉	学部 学科	基礎工学部	学年	3 年				
ふりがな 共 同 研究者氏名	かつだ みつき 勝田 充希	学部 学科	基礎工学部	学年	3 年				
	にわ ひでと 丹羽 英人		基礎工学部		3 年				
					年				
アドバイザー教員 氏名	うしお としみつ 潮 俊光 教授	所属	大学院基礎工学研究科 システム創成専攻 社会システム数理領域						
研究課題名	適応フィルタを用いた多輪システム制御器とリアルタイム軌道追従								
研究成果の概要	研究目的、研究計画、研究方法、研究経過、研究成果等について記述すること。必要に応じて用紙を追加してもよい。(先行する研究を引用する場合は、「阪大生のためのアカデミックライティング入門」に従い、盗作剽窃にならないように引用部分を明示し文末に参考文献リストをつけること。)								

・研究目的

複数の車輪を備え、平面上の全方向への移動に加え角度の変更も拘束条件なく自由に行える移動ロボットを考える。

自機の台車を制御して、与えられた軌道と速度・加速度条件に従うように駆動することは、上で述べたような用途のロボットには不可欠の要素である。しかし、一般にはこのような軌道追従は位置と速度の両方に制約を課すため、複雑になる。

本研究では、以下に示す実験機器を製作し、車体の加減速や荷重の変化によって変動する車輪の負荷をリアルタイムで推定することによって車輪の速度を安定に制御する方法を探し、どのようにすれば高速で軌道上を移動させられるかを見出すことを目標とした。

・研究方法

図1に示すメカナムホイールを用いると、車輪の回転の制御により前後左右及び回転ができる台車を作ることができることが知られている[2]。今回は、図1に示す4輪メカナムホイール台車とブラシ付きモータ制御用回路を製作し、これを用いて実験を行うこととした。

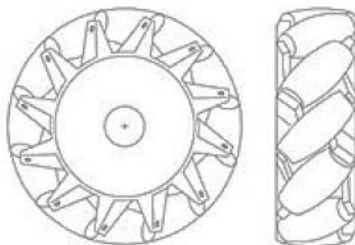


図1 メカナムホイール

予算等の都合上、機体外部からの高精度な観測システムは使用できないため、自機の位置を確認する手段として、ロータリエンコーダ4台(図2)による対地速度の観測とレーザーレンジファインダ(以降

LRF)による地形データとの照合を併用する方式を採用した。粒子フィルタ[4]を用いて LRF の情報からエンコーダによる観測を周期的に修正する。ロータリエンコーダでの観測は「量子化された瞬間の変位」に過ぎず、これを積算して自己位置を推定しようとする、時間の経過に従って誤差が蓄積するからである。

粒子フィルタの実装と基本原理については主たるテーマではないため、本報告では参考書籍[4]を示すのみにとどめる。

短い制御周期が要求されると、リアルタイム性が低い計算機では今回の研究に適しない恐れがあった。また、制御器の操作や軌道生成などの処理を行いつつ単位時間当たりのデータ量が多い LRF を取り扱う必要がある。そのため計算機に NVIDIA Jetson TX2 を採用し、OpenMP, CUDA などの並列化プラットフォームを随所に用い可能な限り演算にかかる時間を短縮することにした。

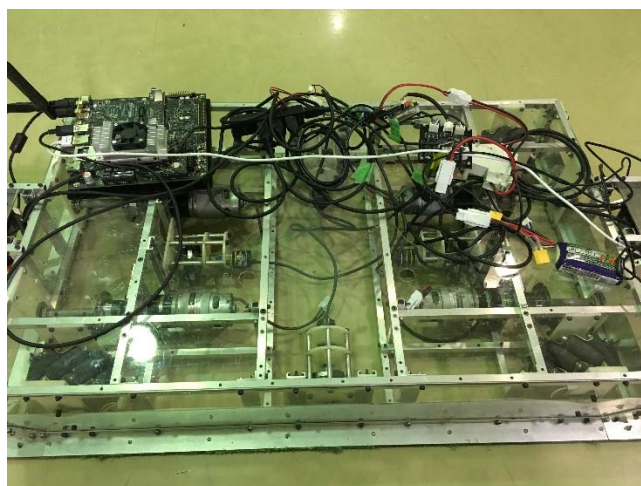


図 2 製作した機体

なお、製作した機体の諸元は以下のとおりである。

表 1 製作機体の詳細

全体寸法	800[mm] × 500[mm] × 130[mm]
モータ	朱雀技研 ギヤードモータ RS-775GM
駆動輪	メカナムホイール 4 輪
位置測定方法	UTM-30LX(北陽電機), オムロン(E6A2-CWZ3C 360P/R 0.5M)

・研究経過

当初はモータ負荷の変動に従ってモータのモデルが変動すると考えていたため、研究課題名にその旨を記し逐次最小二乗法によるシステム同定を中心に調査していた。しかし、以下に示すオブザーバによる方法[1][3]が今回の目的に合致し、より優位であったため、そちらへと方針を切り替えた。

10 月中旬に機体の製作が終わり、車輪単体の制御のシミュレーションが完了した。11 月中旬には、ロータリエンコーダによる位置の推定ができることが確認できた。12 月現在、プログラムはすべて完成し、軌道追従への応用の準備は整っているが、モータ制御回路の耐久性の検証が完了しておらず、実機の動作は 12 月中旬ごろの見込みである。そのため、軌道追従の成果は、追って開催される成果報告会(12/25)にて発表の予定である。

・研究成果

<1>

位置の推定において、オムニホイールを接続したロータリエンコーダ 4 つを用いている。以下の図の通りに配置されている。

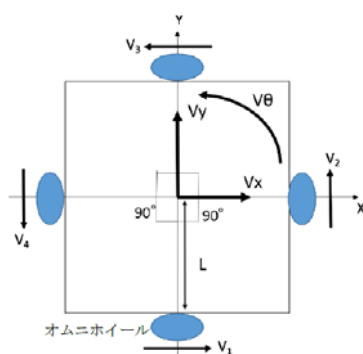


図 3 測定車輪の配置([5]より引用)

測定値は 4 変数であるのに対し、推定する速度・角速度は合計 3 自由度である。この間には次の関係がある。[5]

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & L \\ 0 & 1 & L \\ -1 & 0 & L \\ 0 & -1 & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\theta \end{pmatrix}$$

この 4x3 行列を A とする。 $\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4$ に対して、 $\text{Im}(A)$ の次元は 3 である。このことから、 $\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_\theta \end{pmatrix}$ をど

んな値にしても得られない $\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix}$ の組が存在することが分かる。このような \mathbf{V} の組は、車輪のスリッ

プにより回転数と地面との整合性が取れなくなった時に起こりうる。 \mathbb{R}^4 を $\text{Im}(A)$ とその直交補空間 $\mathbb{R}^4 - \text{Im}(A)$ に直和分解し、後者に属する成分のみを射影行列により取り出し、そのベクトルの長さを求めれば、地面の動きとの逸脱度を表す尺度を得ることができる。全測定輪が正しく動作している場合と浮いている車輪を含む場合とで射影ベクトルの長さを比較したところ、適切な閾値を設定し、射影ベクトルの長さがそれを超えるか否かを確認することで、車輪の浮きを識別できることを確認した。また、測定車輪が 4 つの時には、 $\mathbb{R}^4 - \text{Im}(A)$ の次元が 1 となり、誤差ベクトルの属するベクトル空間がランク 1 となり、誤差ベクトルの 2 ノルムと 1 ノルムが比例の関係になる。そのため、特に 4 輪で測定を行うときには、誤差成分の二乗和ではなく単純総和によって計算したものをを用いれば等価な、少ない計算量で済むことも見出した。これは、移動ロボットの位置測定車輪のスリップの検出などへの応用が期待できる。(*1)

<2>

ブラシ付きモータのマルチレート制御について

昔ながらの線形システムの制御(古典制御・現代制御など)の枠組みは強力であるが、目標値追従問題については「目標値が時変のとき、目標値の特性と同じ特性を持つモデルを内部に持たなければ出力を誤差なく追従させることができない場合がある(*2)」という欠点がある。この欠点を克服する方法として、マルチレート制御が[7][8]などに提案されている。昔ながらの離散時間の制御では、観測や制

御などがすべて同じ周期で同時に行われるのに対し、マルチレート制御では、観測と制御と目標値入力を異なる周期に設定する。

今回の研究で用いる台車は、ブラシ付きモータによって駆動される。軌道制御を達成するには車輪の速度を制御する必要がある。マルチレート制御の適用事例は数多く存在し、ブラシ付きモータに限定しても様々な先行研究([9]など)が存在するが、これらのほとんどは制御の目的が”位置決め”である。本研究ではブラシ付きモータの速度制御を扱い、マルチレート制御の枠組みを用いて負荷トルクを推定しつつブラシ付きモータの回転速度を所望の大きさに追従させられることを、シミュレーションによって示した。

定常偏差なく速度を追従させられるかどうかを保証することは、軌道追従において大きな課題である(*3)。

ブラシ付きモータは、入力を V とし、流れる電流を i 、外部から軸にかかるトルクを T_d 、回転速度を $\dot{\theta}$ とすると

$$\begin{cases} J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = Ki + T_d \\ L\frac{di}{dt} + Ri = V - K\dot{\theta} \end{cases} \dots (1)$$

である。ただし、 $J[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ は回転軸周り慣性モーメント、 $b[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$ は回転軸の粘性定数である。 K, L, R はモータ固有のトルク定数 $[\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}]$ 、インダクタンス $[\text{H}]$ 、抵抗 $[\Omega]$ である。

外部から入力されるトルクを T_d として状態量に込めた場合、ブラシ付きモータのモデルは状態空間法によって以下のような形で表される。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \\ T_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} & \frac{1}{J} \\ -\frac{K}{L} & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V \\ y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \\ T_d \end{bmatrix} \end{cases} \dots (2)$$

式(2)を[10]及び[11]で示される PWM ホールドで小さな制御周期 T_u で離散化したシングルレート系モデルを考える。この時、入力が PWM 信号の Duty 比で状態量が速度と電流となる。さらに[7]に示される方法で、より大きなフレーム周期 T_f を用いてマルチレート化する。すると、 $T_f: T_y: T_r: T_u = 4: 4: 2: 1$ で、回転数と電流値を目標値として受け取る以下の閉ループ系を得る。

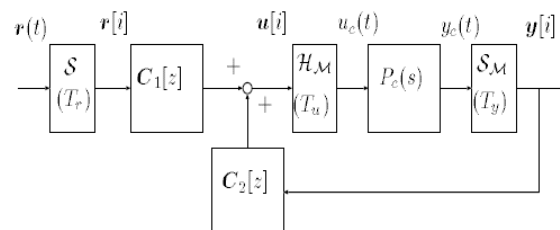


図4 マルチレート系([7]より引用)

C2 をオブザーバと状態フィードバックの併合系として設計すると以下のようなになる。

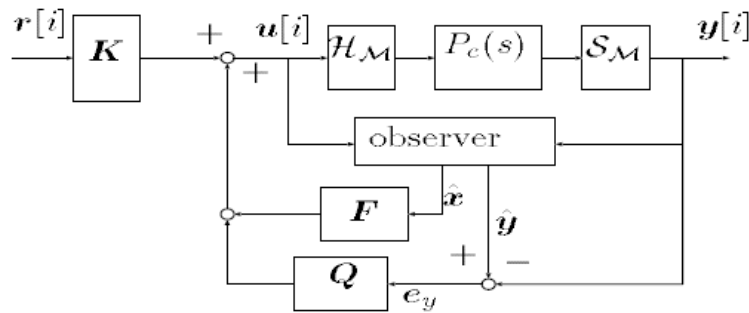


図 5 マルチレート系([7]より引用)

この時点で、(2)に対するオブザーバが適切に設計されていれば、回転数・電流・外乱の3つを推定できるオブザーバを備えたマルチレート系が構成される。これは以下のメリットを持つ。

1. 通常ロータリエンコーダによる速度の測定は、サンプリング周期と値の精度がトレードオフの関係になる。しかしマルチレート制御では、状態量からフレーム周期 T_f 内でのサンプル点間応答を得ることができる([8]式,(2.1)以降)。そのため、この手法で状態推定を行うと、速度をフレーム周期 T_f で読み取ったのち、それより小さな制御周期 T_u へと値を補間し、その値が利用可能になる[7][8]。そのため、モデル化誤差が十分小さいならば、この方法は値の精度を保ちつつ速度の推定周期を上げることに対応することになる。
2. (従来のオブザーバの枠組みでも可能だが)電流を推定することができるため、回路の性能に合わせて警告の発報などの安全機構を組むことが可能になる。
3. (従来の外乱オブザーバ[1][3]の枠組みでも可能だが)トルクを推定できるため、モータの負荷に応じて制御入力を変更するような制御則が可能となる。今回のような4輪の系は、地面との摩擦の大きさが外乱として車輪にかかるため、これを推定して適切な入力指令を出せることで制御性能の改善が期待できる。
4. マルチレート系では、制御したい状態量に対し外部から入力されるトルク T_d が及ぼす影響を有限時間以内に抑圧する制御が原理上は可能になる[7][8]。日本語文献[8]で完全外乱抑圧制御器として提案されている。(*4)

今回用いた[7][8]に基づく方法は、状態量全てに目標軌跡を指定することを求めている。すなわち図 5 中 $r[i]$ は、状態量に対する目標値の信号(ベクトル量)であり、今回の制御対象(1)については流れる電流 i と回転速度 $\dot{\theta}$ の両方に対する目標値である。電流の目標値がなくてはならず単に速度制御を行いたいときには大変扱いにくい。例えば目標値を $\dot{\theta} = 0[\text{rad/s}]$ として $i=1[\text{A}]$ とするような、実現し得ない値を与えても、完全追従制御は適切に動作しないだろう。

ここで、機体を通るべき軌道が時刻 t の関数 $(x(t), y(t), \theta(t))$ の形で与えられている状況を考える。ここから[2]による変換で、各車輪軸の目標角速度・加速度を得ることができる。これを $\dot{\theta}, \ddot{\theta}$ とする。

式(1)に示す状態方程式を取り出し、注目する。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J} & \frac{K}{J} \\ \frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} V$$

いま、この式の $\dot{\theta}, \ddot{\theta}, V$ がすでに与えられているとする。すなわち、未知の変数が電流値とその微分値

となる。行列積を展開すると、これは2本の等式となるため、2つの変数を求めるうえでちょうど条件が揃う形となる。このように、離散化する前の表現を持ち出して、目標角速度・加速度と現在与えている入力を代入することで方程式を作れば、ここから完全追従制御器に与えるのに適当な電流目標値信号を算出することができるのではないかと考え、シミュレーションによって動作を確かめた。この手法を用いたシミュレーションの結果を示す。以下では $K = 0.008[\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}]$, $L = 72.3[\mu\text{H}]$, $R = 0.485[\Omega]$ とし、離散化に用いる入力ホールド周期を $0.3625[\text{ms}]$ 、マルチレート系のフレーム周期は $1.45[\text{ms}]$ としている。モータに取り付ける機構によって変化する J, b を様々に変更し、以下のとおりの結果を得た。

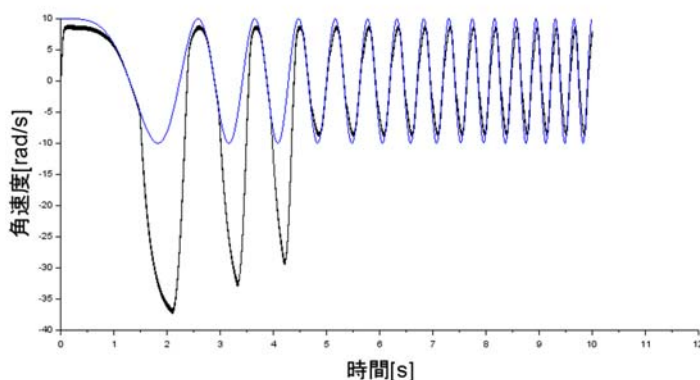


図 6 $J = 0.001[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $b = 0.005[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$

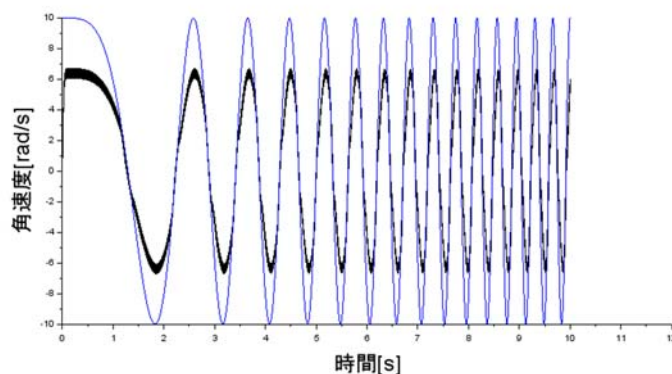


図 7 $J = 0.001[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $b = 0.01[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$

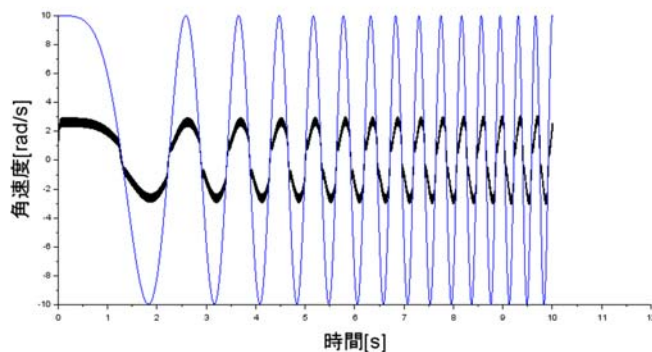


図 8 $J = 0.001[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$, $b = 0.02[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$

このように、粘性抵抗が $0.01[\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}]$ の周辺においては、速度と加速度の指令に追従するように、適切に制御できていることが分かった。一方、軸の粘性が大きい場合は大きく不安定化することが分かった。これは、フレーム周期の境界ごとの完全追従を達成する今回のマルチレート手法がサンプル点

の間の挙動を考慮しないことからくるものである。適切な大きさの粘性抵抗で微分値を抑制することが、サンプル点の間での振動的な挙動を結果的に抑制したのだと考えられる。また、紙面の都合上グラフを省略しているが、電流値に激しいリップルを観測できたので、これもまた振動的性質の一因となっていると考えられる。これに対しても、例えばインダクタンスを調整するなどして電流値の振動を抑えることができれば、全体的な特性に何かしら改善がみられるのではないだろうかと考えられる。

・今後の展望と課題

<1> (軌道追従を実験すること、および軌道追従性能の定量的評価)

上に述べたように、機器を完成させ実機の制御を実験することがまだ完了しておらず、これは第一の課題である。

外界センサによる位置推定で軌道追従性能を測ることは不適切であり、本来は機体の外から動きを観測することで行われるべきである。なぜなら、現状のままでは、単にセンサによる位置観測結果が軌道にどれだけ追従するかしか示すことができないからである。よって、モーションキャプチャなどの設備を用いることで実機の動きを外部から精密に測定し、これによって追従性能を評価する方が妥当である。これはこの研究の有効性を検証するには欠かせない要素であり、大きな課題であると考えられる。

<2> (カルマンフィルタとマルチレート完全追従制御の併用について)

カルマンフィルタとは、既知の正規分布ノイズのある観測と観測対象のモデルを用いて、その状態量を推定するために用いられる手法である。ノイズを含むセンサを用いなければならないとき、混入するノイズが正規分布でありその平均と分散が既知ならば、この方法はきわめて強力な観測手段である。

オブザーバの枠組みでは、カルマンフィルタは「ゲインの変化する状態観測器」としてとらえることができる。今回用いたマルチレート制御[7]の枠組みでは、フィードフォワード制御器 C1 の表現はフィードバック制御器 C2 によって決定される([7],式(2.20))。観測器のゲインが変更されると、出力フィードバック制御器 C2 の表現が変わるため、自動的に C1 も再設計されなければならない。しかし、制御器 C1 が内部に持つ状態量を何らかの形で引き継がなければ、制御性能はおそらく損なわれるであろうと考えられる。

したがって、カルマンフィルタとマルチレート完全追従制御法を組み合わせる際には、時々刻々と変化していく制御器について、その持つ状態量を保存していく手法を新たに考案する必要があると分かる。モータの回転速度の観測値に正規分布ノイズが乗る場合などを想定するならば、これは 1 つの課題となりうる。

・注釈

(*1) $\text{Im}(A)$ に並行である滑り成分は抽出されない。

(*2) 内部モデル原理による。サーボ制御において定常偏差のない追従を実現するには、目標値軌道のダイナミクスと同じものを開ループ系が保持している必要がある。

(*3) 方式によってはその限りではないと考えられる。今回想定している「軌道」は、直交座標系で時間の媒介変数 $t[s]$ で表される関数 $(x(t), y(t), \theta(t))$ の形で書けるものである。

(*4) 完全外乱抑圧制御器は、外乱の大きさに対してフレーム周期 T_f が短すぎる場合に不安定化しうる。目標値との差に対して鋭敏に反応するため、bang bang 制御器のような特性になってしまうと考

えられる。一般に、「有限整定」を謳うコントローラの多くは上記の問題をはらみ、そのハイゲイン特性ゆえに制御性能を悪化させることがある。

・参考文献・リンク

- [1] Ichiro Yamada, 最近の制御技術－外乱オブザーバ, pp. 196-200.
- [2] H. Taheri, B. Qiao, N. Ghaeminezhad, "Kinematic Model of a four mecanum wheeled mobile robot", International journal of computer applications, 2015.
- [3] ヨーンヤイチャイサモーンほか. カルマンフィルタ型外乱オブザーバと外乱推定値の利用に関する一考察. 第 51 回自動制御連合講演会. pp.1226-1231. 2003-11-22.
- [4] Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D., 確率ロボティクス (上田隆一 訳), 毎日コミュニケーションズ (2007)
- [5] 東 正登. オムニホイールを用いた全方向移動ロボットの製作. 近畿職業能力開発大学校紀要 (23), pp.55-58, 2015,
- [6] Toru Tamaki, "CUDA-based implementations of Softassign and EM-ICP"
https://home.hiroshima-u.ac.jp/tamaki/study/cuda_softassign_emicp/
- [7] H. Fujimoto: "General Framework of Multirate Sampling Control and Applications to Motion Control Systems", PhD thesis, The University of Tokyo (2000).
- [8] H. Fujimoto and Y. Hori, "Visual servoing based on intersample disturbance rejection by multirate sampling control," in Proc. IEEE Conf. Decis. and Control, 2001, pp. 334-339.
- [9] HH, Fujimoto & Yao, Bin. (2005). Multirate Adaptive Robust Control for Discrete-Time Non-Minimum Phase Systems and Application to Linear Motors. Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on. 10. 371 - 377. 10.1109/TMECH.2005.852398.
- [10] K. P. Gokhale, A. Kawamura and R. G. Hoft, "Dead Beat Microprocessor Control of PWM Inverter for Sinusoidal Output Waveform Synthesis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-23, no. 5, pp. 901-910, Sept. 1987.
- [11] K. Sakata and H. Fujimoto: " Perfect Tracking Control of Servo Motor Based on PWM Hold Model" , IIC-06-62, pp99-104(2006)(in Japanese)
坂田晃一・藤本博志: 「PWM ホールドモデルに基づくサーボモータの完全追従制御法」, 産業計測制御研究会, IIC-06-62, pp99-104 (2006)
- [12] http://www.yamamo10.jp/yamamoto/lecture/2006/5E/interpolation/interpolation_html/node3.html(参照 2018-11-27)
- [13] <http://www.cityfujisawa.ne.jp/~huzinami/maple/ftp/spline.pdf>(参照 2018-11-27)
- [14] https://www.algorithm-archive.org/contents/thomas_algorithm/thomas_algorithm.html(参照 2018-11-27)
- [15] https://github.com/tttamaki/cuda_emicp_softassign(参照 2018-11-27)
- [16] 蘭 豊礼, 玉井 博文, 牧野 洋, 三連クロソイドによる自由点列補間, 精密工学会誌, 76 巻, 10 号, p. 1194-1199, 2010