

2020年10月1日
MATLAB EXPO Japan 2020

これからのモータ制御システム構築

～ 産学連携の開発事例 ～

静岡理工科大学 総合技術研究所

客員教授 高橋 久

takahashi.hisashi.yr@sist.ac.jp

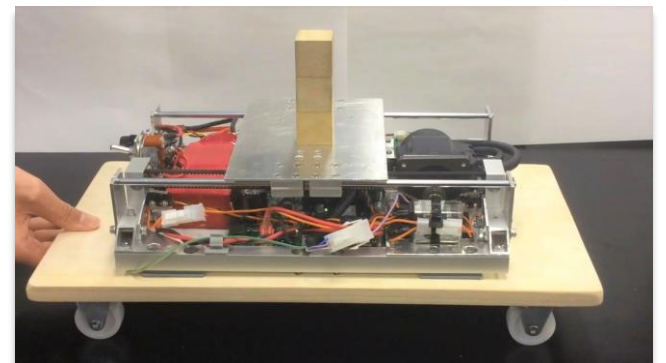
研究室の取り組み

知的電子制御システム研究室では、コンピュータや電子回路を用いた、新しい制御技術の研究開発を企業と共に進めています。

センサを用いない物理量等の推定方法、制御アルゴリズムの開発、制御システムの構築に関する研究を基に、ICの開発、医療用機器、産業機器、サービスロボットから自動車の制御まで、社会に役立つ製品の開発を企業との共同研究を通して進めています。最近では、医療機器、振動抑制、自動車をはじめとする移動体の自動運転に関する研究が多くなっています。

安全な自動運転と楽しいドライブの両立

自動運転技術は、今後さらに進化し、実用化が進むでしょう。一方、「運転をするという楽しみがなくなるのでは」と心配する声も聞かれます。研究室では、通常の走行は、従来通り人が操作し、誤った操作や操作不能になったときに、自動運転に切り替わり、安全性を保つ車両の開発も進めています。



シミュレーションとの出会い

初めての経験 1977年にイリノイ大学 B.C. Kuo 教授の研究室にて研究室には、パソコンがネットワークに接続され、その日のスケジュールが配信されていた。

このパソコンで、**制御のシミュレーション**を見た。そのあと、台上に転がした**ナット**をカメラで捉えて、ロボットハンドで拾い上げて、**ボルトにねじ入れる装置**を見て、**衝撃**を受けた。

小生の研究室でも、シミュレーションを始めた

最初に出会ったシミュレータは、大学で使用されていたFACOMのコンピュータ。

ADSL (Analog to Digital Simulation Language) で、**モータ制御のシミュレーション**を実施した。

その後、コンピュータが更新され、UNIVAC (現UNISYS) の**CSSL** (Continuous System Simulation Languages) を利用した。

1990年頃から、**MATLAB®**を導入し、利用を始める。

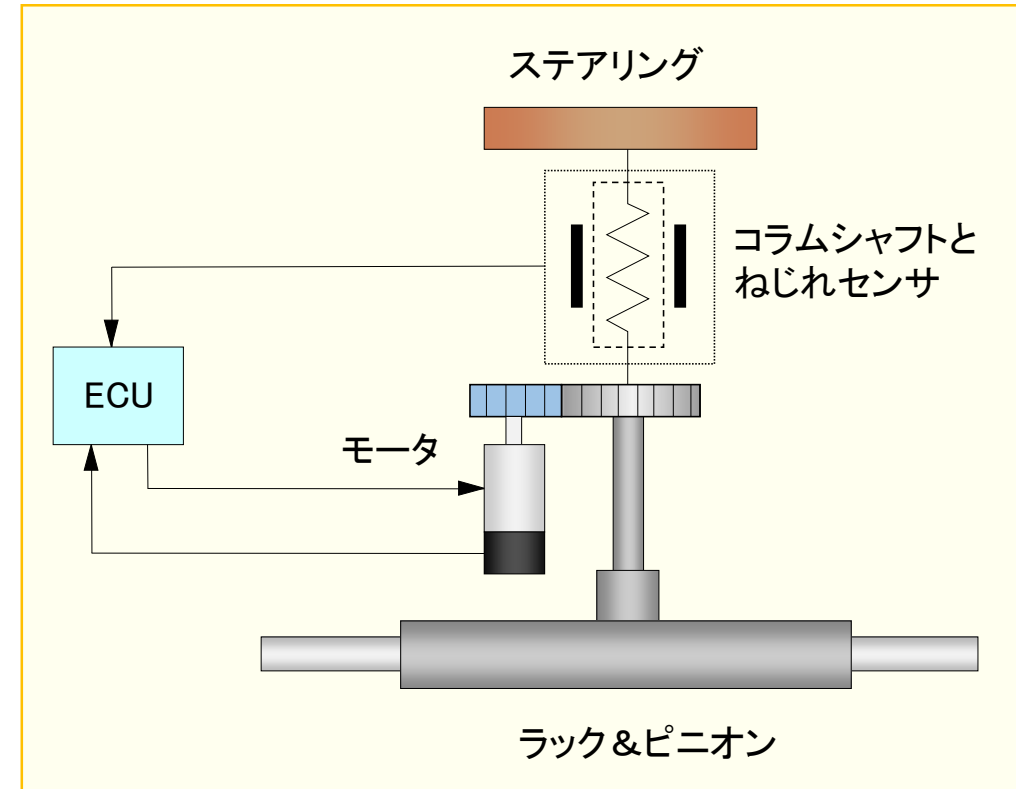


富士通ホームページより

MATLABの製品への活用の始まり

1990年頃、自動車の全電気式ステアリングシステム（FEPS, 現在はEPSと呼ばれる）の開発に利用。開発は、車両のモデル化、制御手法の開発、シミュレーションによる検証を通して実施した。

- (1) 自動車のステアリング機構のモデル化
- (2) シミュレーションによるモデルの動作確認
- (3) モータを用いた制御手法の開発
- (4) シミュレーションによる制御システムの動特性検証
- (5) 機構部と制御部をリンクし、シミュレーションで検証
- (6) 製品化に向けたシステム構築とハードウェア設計
- (7) 実車両に搭載し、テストドライバーによる検証



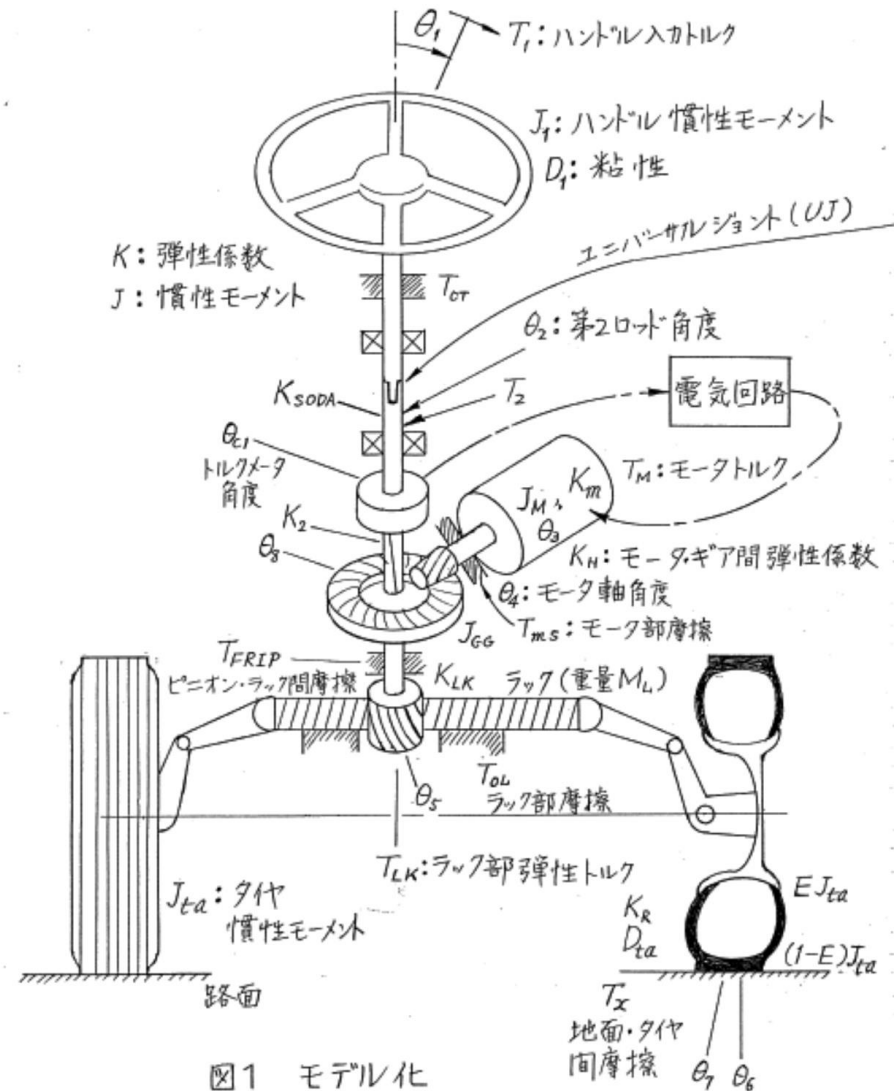
機構部のモデル化

全電気式パワーステアリングシステム (FEPS) の機構部のモデルは、図のような機構構成から、**多慣性モデル**として構築。

最初にアシスト用のモータがついてない状態でハンドルにトルクを与えたときの**タイヤの挙動**をシミュレーションにより確認。

実機実験と同等の結果が得られたとき、モータを結合して、**シミュレーションと実動作**を実験を実施。

実車両に組み込み、テストドライバーによる走行実験と評価を実施。



システムをどこまで記述するか

シミュレーションは、制御アルゴリズムの確認やシステムを構築・評価するのに、大変有用なツールである。

シミュレーションを実施に当たって、システムをどこまで記述するか、特にシステムを構築・評価する場合は、制御対象をどこまで正確にモデル化し、記述できるかが重要である。

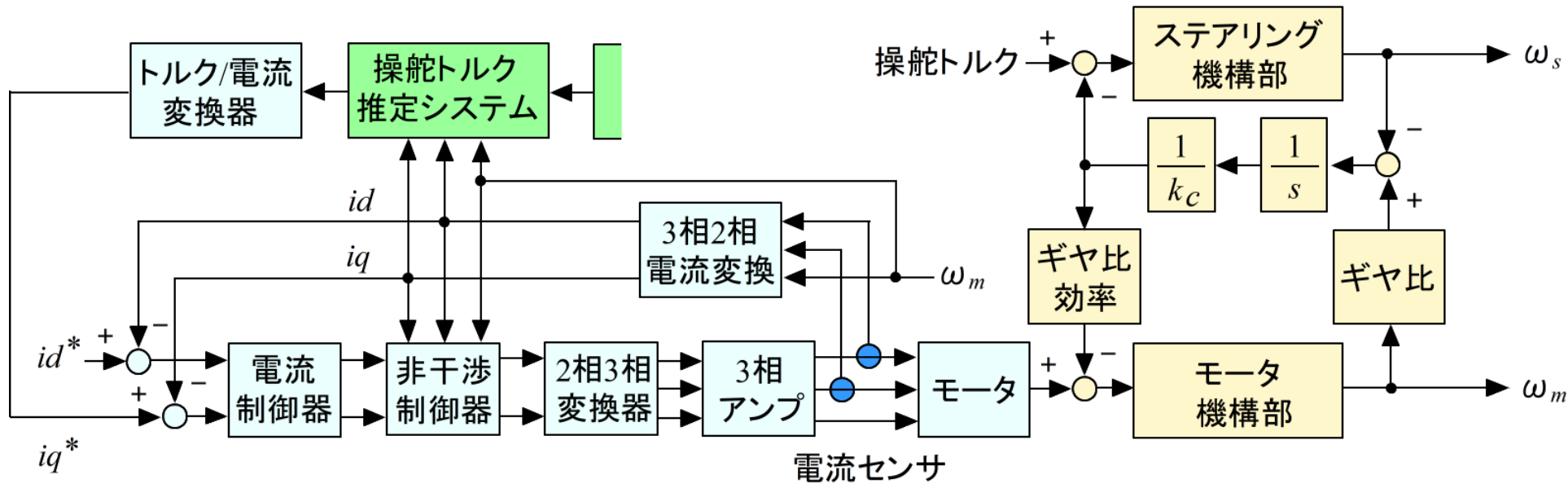
機構部を含めたシステムとして評価を行う場合、シミュレーション時間やシミュレーションの効果を考慮して、インバータや制御システムなどの電気回路部は、機構部の動作と比較して、時定数が短いので、実時間上の計算として扱い、シミュレータの負担を低減することも重要である。

一方、機構部は、現実の動作に直接関係するとともに、時定数が電氣的時定数と比較して長いので、正確にモデル化する必要がある。

しかし、現実のシステムでは、たとえばモータは、トルクリップルや磁気飽和による影響があり、使用条件や環境によるパラメータ変動がある。これらは、モデルに組み込みにくく、実機による確認も必要である。

シミュレーションによる確認は、製作や実験を行う前に行うことで、実験回数を減らし、開発時間の短縮に大いに貢献する。

機構部を含むシステムの記載例



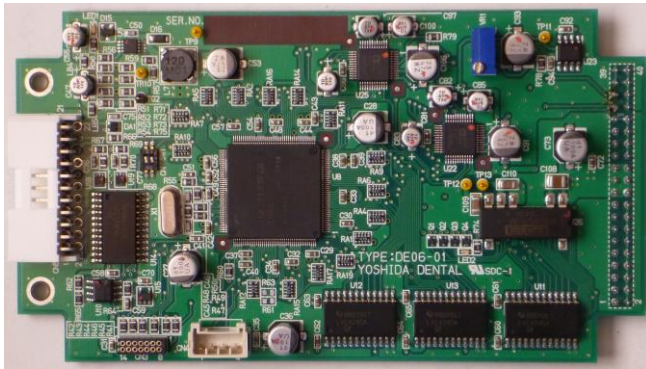
シミュレーションを実施するとき、青色で示すブロックは、電氣的処理を行っている。黄色の部分は、機械系の動作を表しており、緑色は推定システムである。

シミュレーションの実施に当たっては、青色で示す部分は、機械的時定数と比較して、電氣的時定数は小さいので、実時間の計算で対応できる。一方、黄色や緑で示すブロックは、制御システムの特性を表す部分であり、詳細な記述とシミュレーションが要求される。

最近の開発事例(歯科用)

圧縮空気を用いたエアタービンでは、動力源としてのエアコンプレッサが必要である。

開発した電動タービンシステムは、オートクレーブ(高温, 高圧蒸気)による滅菌が可能であり、家庭用電源や電池を用いて駆動ができる。このため、在宅治療や施設へ移動しての歯科治療が可能になった。

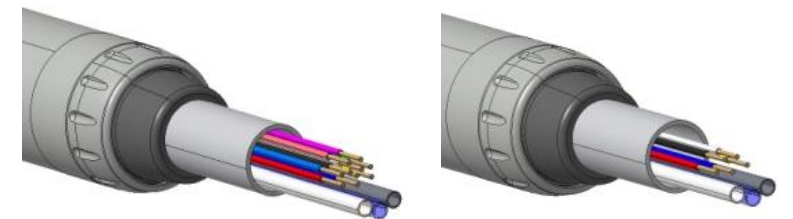


制御基板とパワー制御基板



開発したモータ, ハンドピース

右: 提案の配線
左: 従来の配線



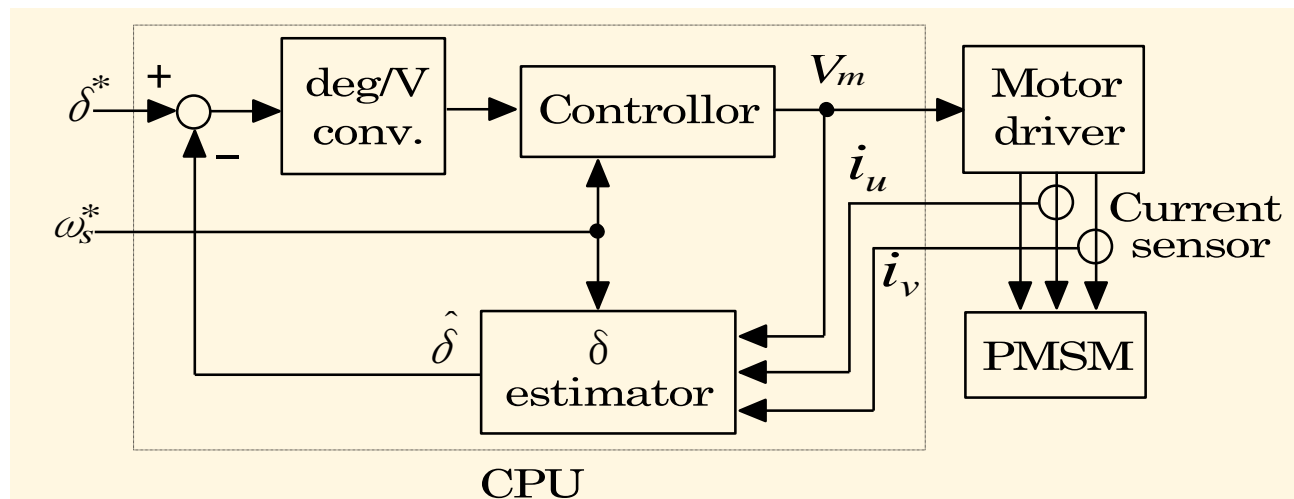
制御アルゴリズムの開発

数 $10\text{min}^{-1} \sim 40,000\text{min}^{-1}$ まで、トルク脈動が少なく、高効率駆動できる磁極位置

センサレスの歯科治療用タービンモータの制御システムの開発を実施した。

モータおよび機構部のモデル化を行い、磁極位置センサを用いずに全速度範囲でトルク脈動が少なく、高効率制御システムを構築した。

動作確認と検証をMATLAB/Simulink®を用いて実施した。パラメータ変動や負荷変動など、サンプリング間隔や電流検出のADコンバータの分解能などに対して、問題ないことを確認した後、製品化を実施した。



負荷角 δ を駆動周波數位相，起電圧，駆動電圧，U相，V相の電流から推定する。

$$\phi = \omega_s t + \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3} i_u}{2 i_v + i_u} \right)$$

$$\hat{\delta} = \sin^{-1} \left(\frac{V_m \tan \phi \mp \tan \phi \sqrt{E_m^2 \tan^2 \phi + E_m^2 - V_m^2 \tan^2 \phi}}{E_m (1 + \tan^2 \phi)} \right)$$

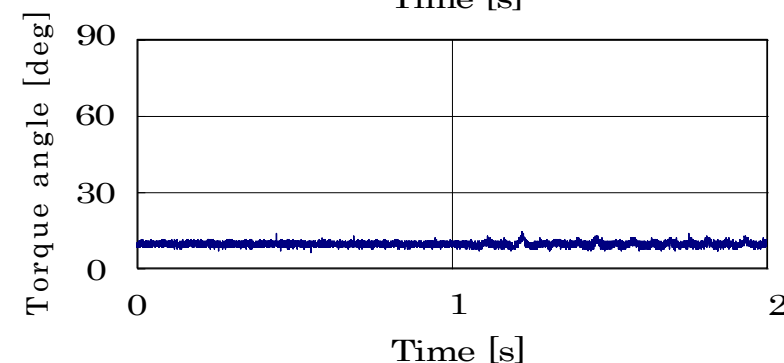
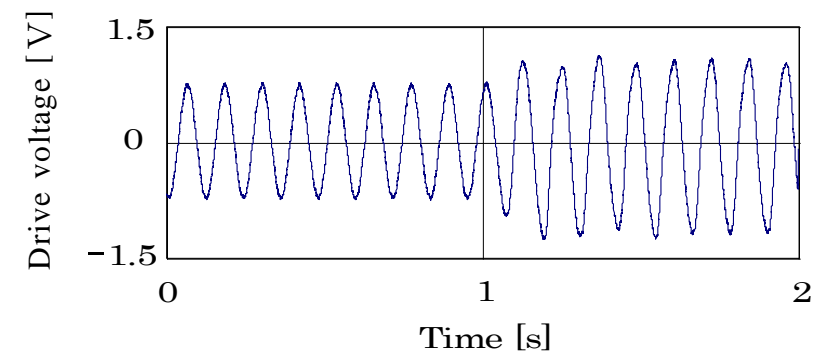
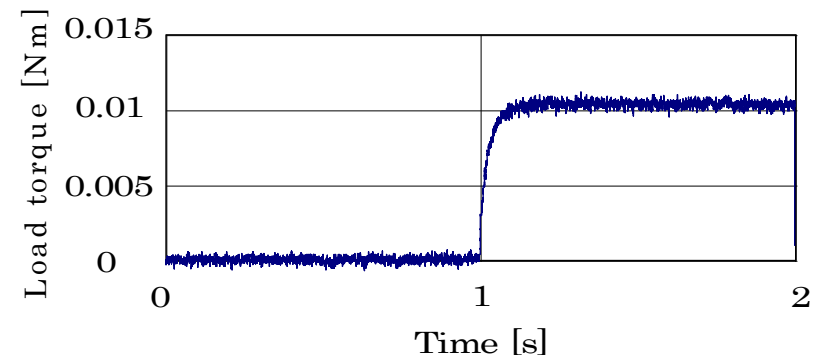
実験結果

シミュレーションでは、制御アルゴリズムの検証、ADCの分解能、サンプリング時間など、実システムを実現するためのハードウェア設計を確認した。

右側図は、負荷を印加したときの、駆動電圧と負荷角の実験結果を示している。表は、非制御時・制御時の電力を計測した結果である。

いずれも、期待した結果と大きな違いはなく、製品化ができた。

	No Control	Controlled		
		$\delta = 30^\circ$	$\delta = 20^\circ$	$\delta = 10^\circ$
No Load	5.97W	1.60W	1.01W	0.62W
5m Nm	5.86W	2.01W	1.26W	0.73W
7m Nm	5.73W	2.16W	1.33W	0.87W
10m Nm	5.56W	2.90W	2.12W	1.78W



自動走行の研究開発

近年、自動走行車両の開発が進んでいる。

研究室では、LiDARやステレオカメラを用いた障害物回避アルゴリズムの開発も実施している。

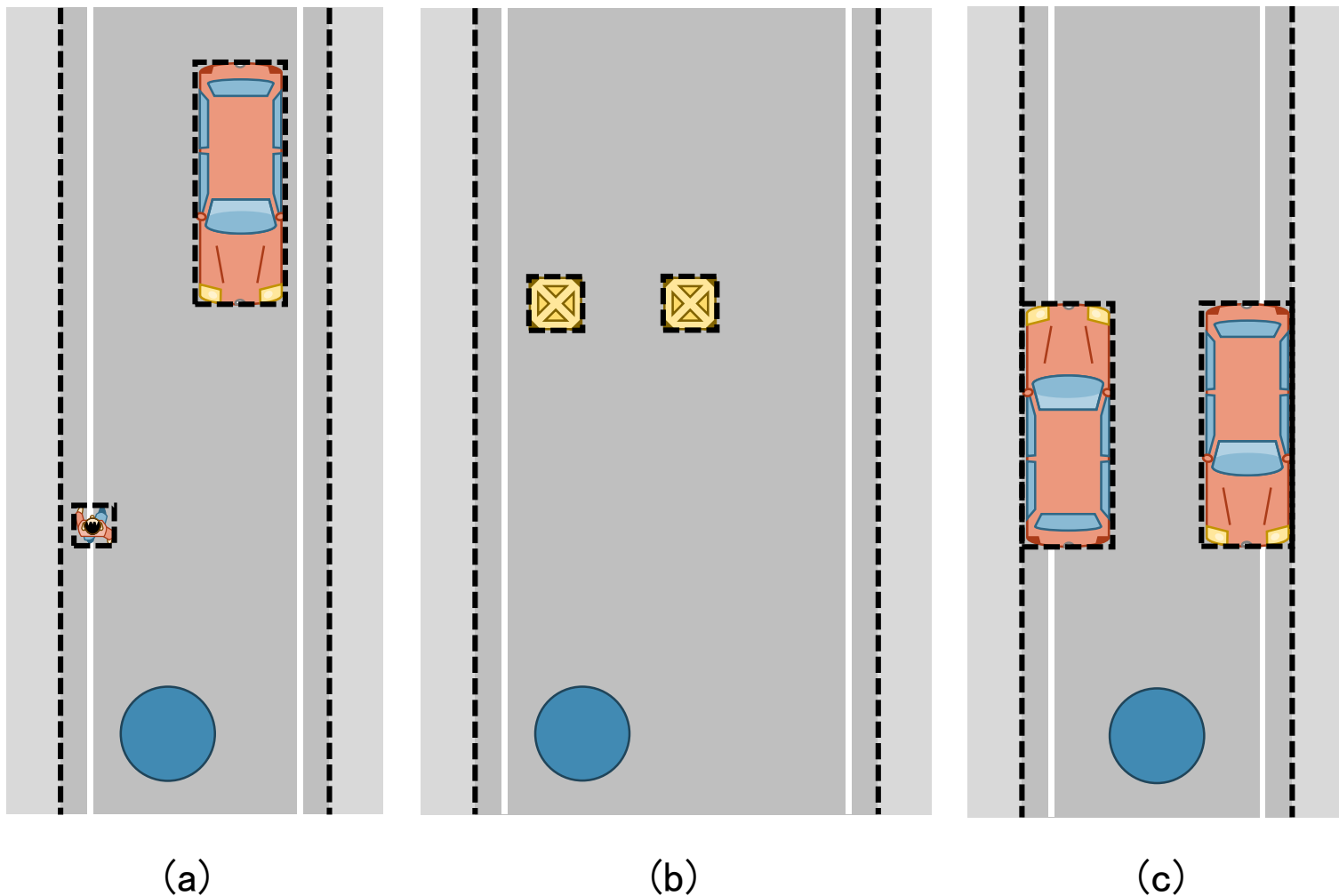
ここでは、3種の場合について、シミュレーションによる検証を実施した。

(a)は、左前方に歩行者、右前方に駐車車両がある場合。

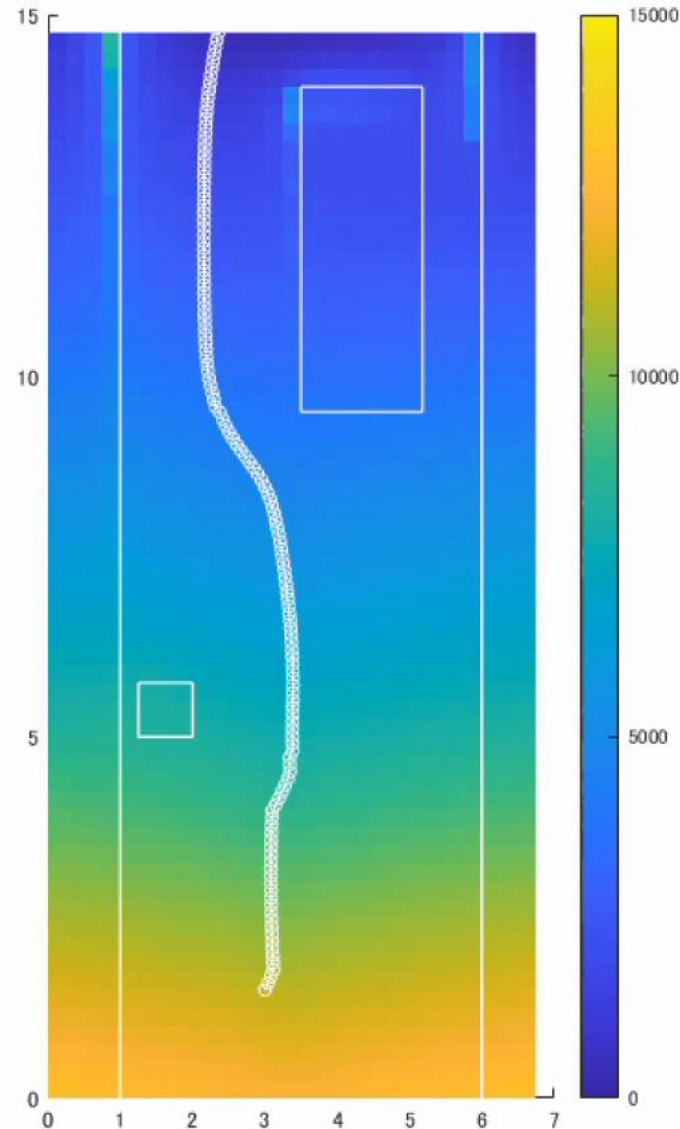
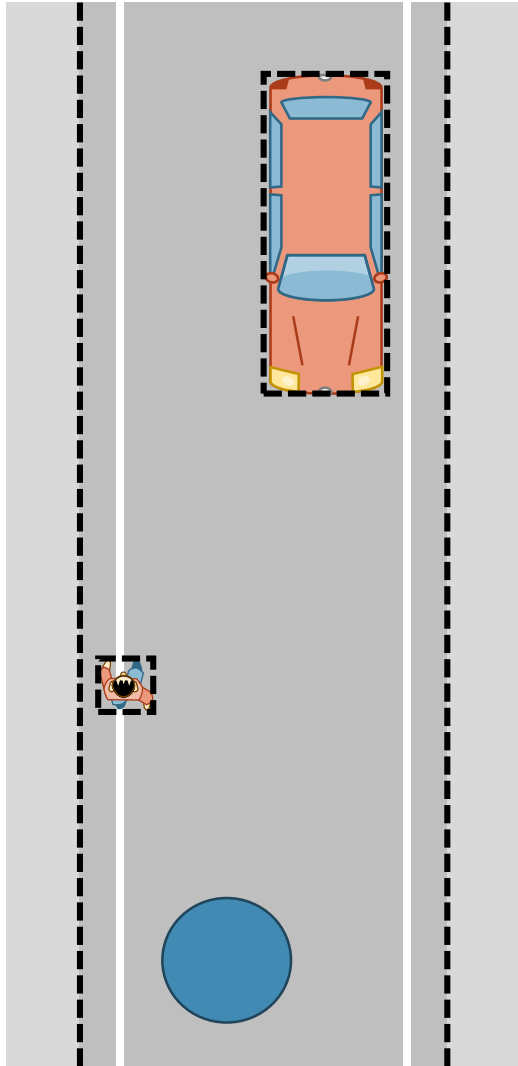
(b)は、路上に2個の障害物がある場合。

(c)は、2台の車両が駐車している場合である。

● は、研究室で開発中の車両



歩行者と駐車車両の場合

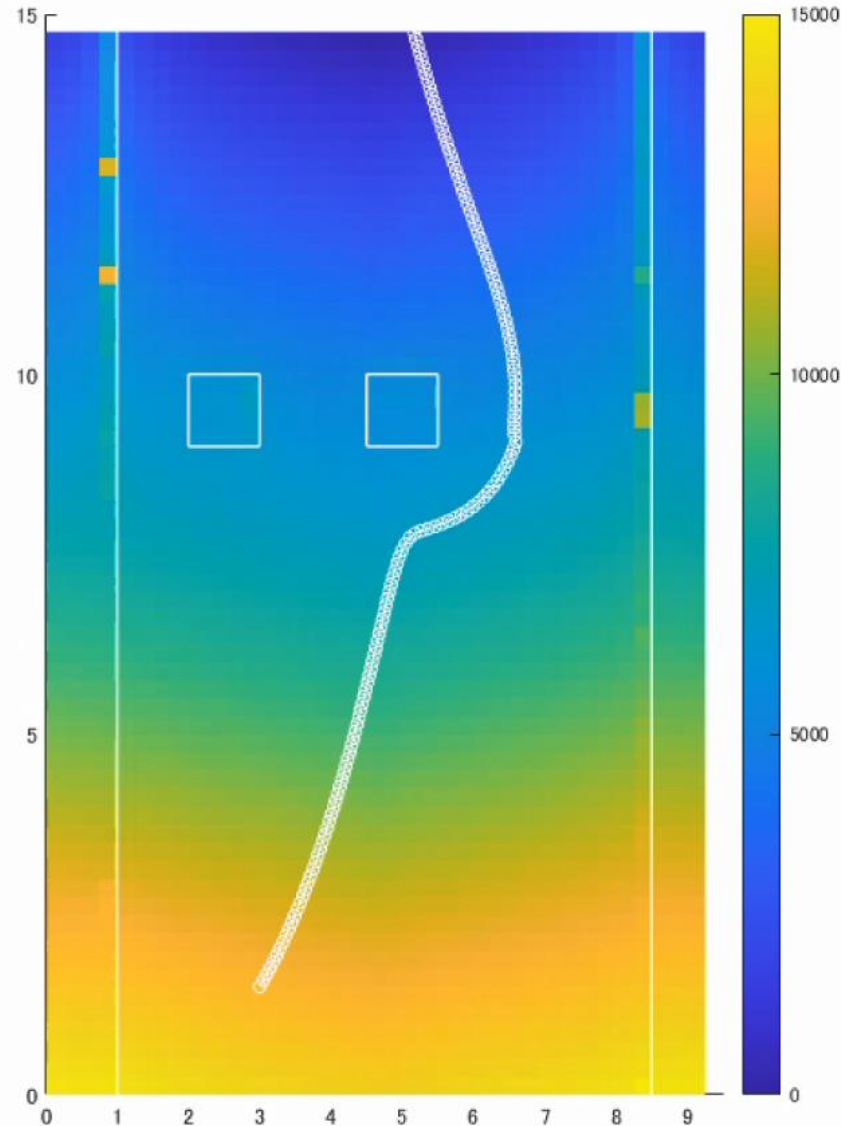
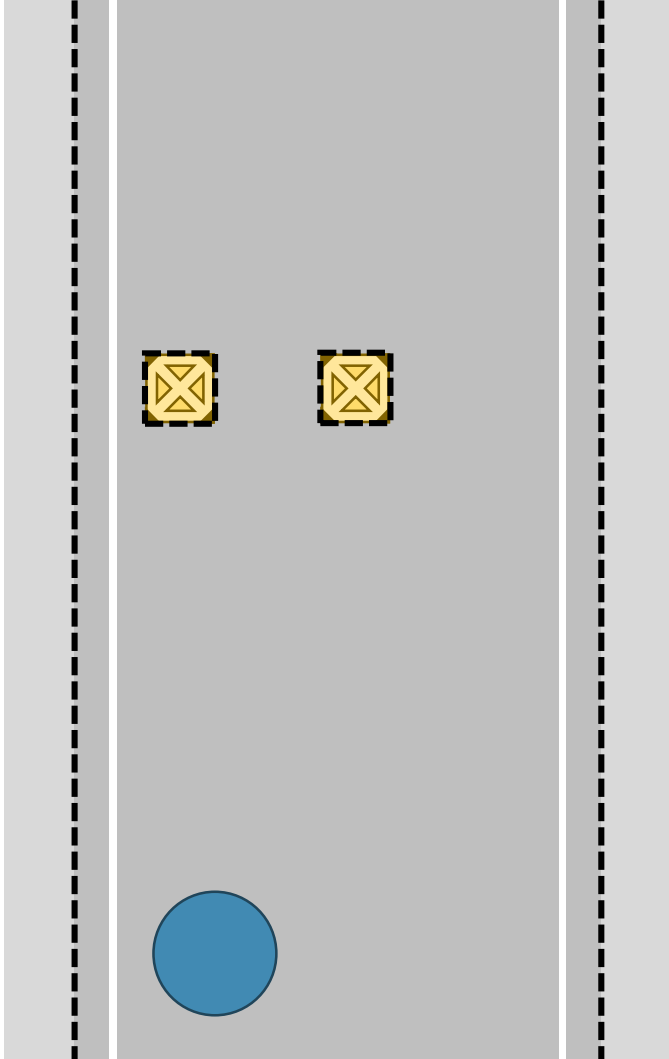


周囲の障害物の検知に、全方位の距離測定ができるセンサとしてLiDARを用い、その情報に基づいて、幅員推定とポテンシャル法を用いて障害物回避経路を生成する、

移動体は移動しながら、周囲の障害物を検出し、さらに幅員推定を行って、衝突しないよう障害物回避経路を生成して進んでいく。

図中オレンジ色が濃くなっているところが障害物が近いところである。

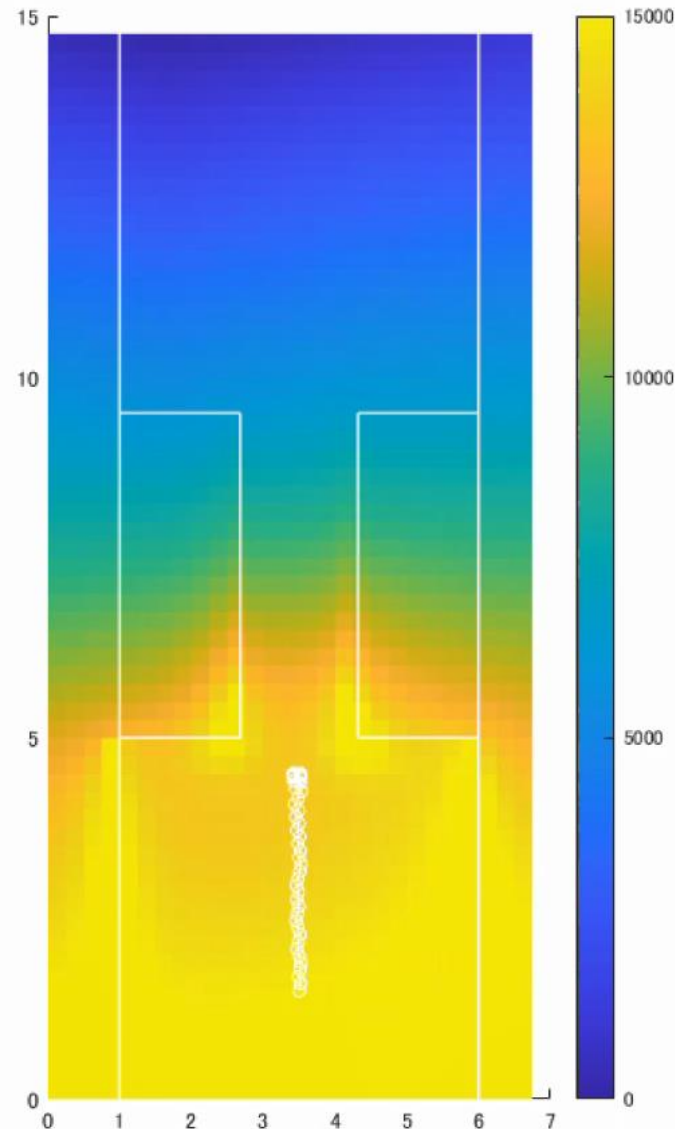
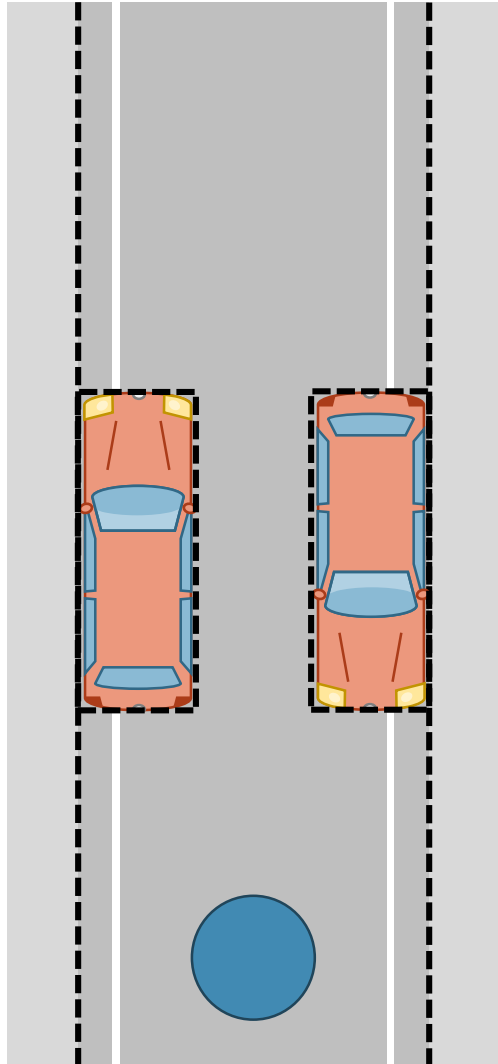
路上に障害物がある場合



路上に2個の障害物がある。移動体は、障害物を検出し、さらに移動体が通り抜けられるか、幅員推定を行い、通過できる経路を生成して移動している。

通路は3カ所(左端, 障害物の間, 右端)検出されるが、左端と障害物の間は、狭いため通過できないと判断し、右端を通過している。

2台の車両が駐車している場合

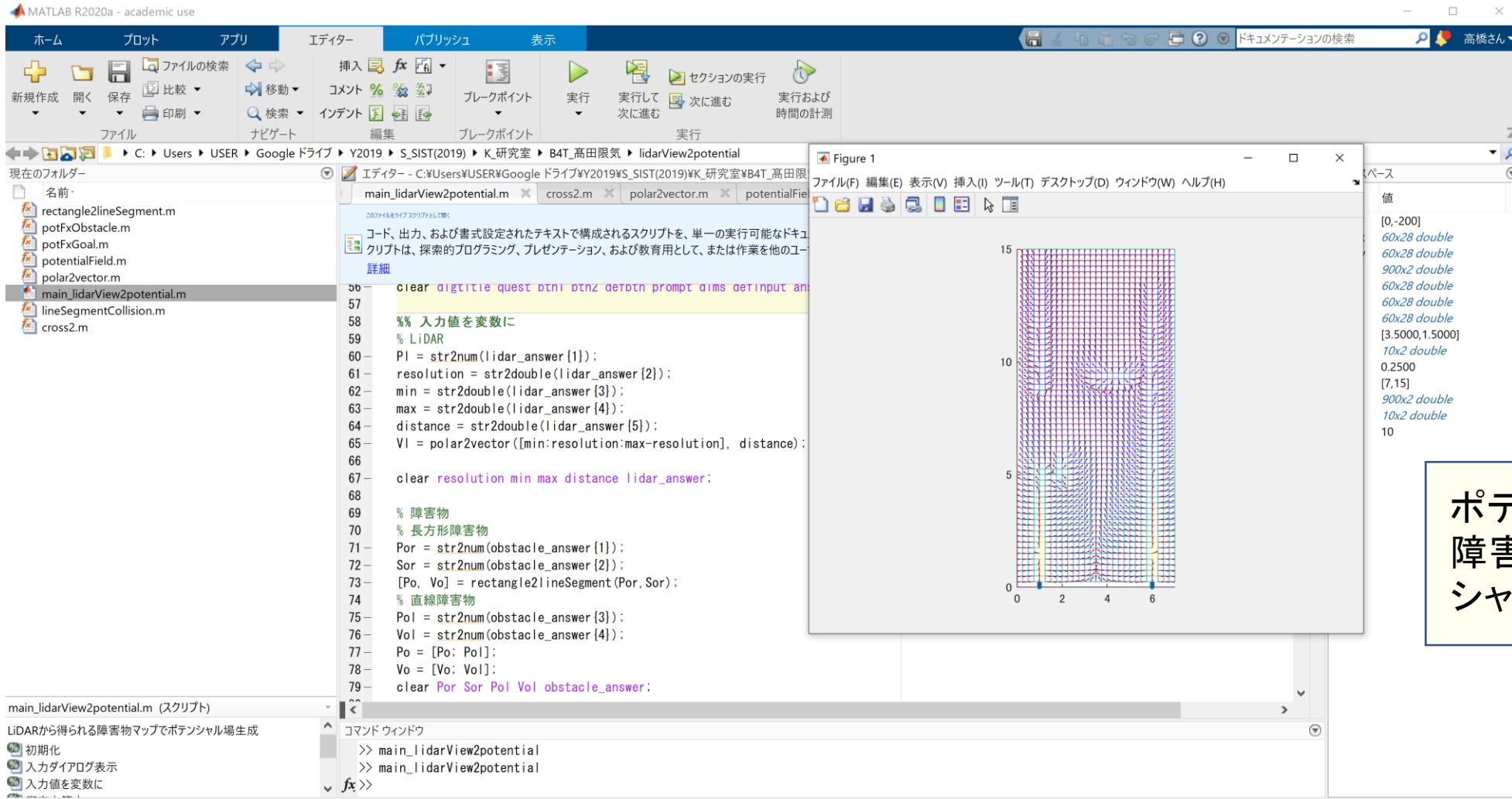


前方に2台の車両が駐車している。
移動体は、前進するものの、幅員推定によつて、移動体が通過できるだけの幅がないことが推定でき、進めない状態になっている。

このような状況になったときは、人が対応したり、遠隔監視システムからの指令を待つことになる。

最近の開発事例(自動走行)

MATLABを用いた自動走行経路および幅員検出のためのプログラム例



The image displays the MATLAB R2020a environment. The main window shows a script named 'main_lidarView2potential.m' with the following code:

```
56 clear digitlle QUEST DTNI DTNZ DETDTN PROMPT DIMS DETINPUT AN
57
58 %% 入力値を変数に
59 % LIDAR
60 Pl = str2num(lidar_answer [1]);
61 resolution = str2double(lidar_answer [2]);
62 min = str2double(lidar_answer [3]);
63 max = str2double(lidar_answer [4]);
64 distance = str2double(lidar_answer [5]);
65 Vl = polar2vector ([min:resolution:max-resolution], distance);
66
67 clear resolution min max distance lidar_answer;
68
69 % 障害物
70 % 長方形障害物
71 Por = str2num(obstacle_answer [1]);
72 Sor = str2num(obstacle_answer [2]);
73 [Po, Vo] = rectangle2lineSegment (Por, Sor);
74 % 直線障害物
75 Pol = str2num(obstacle_answer [3]);
76 Vol = str2num(obstacle_answer [4]);
77 Po = [Po; Pol];
78 Vo = [Vo; Vol];
79 clear Por Sor Pol Vol obstacle_answer;
```

The 'Figure 1' window displays a 2D plot of a potential field. The x-axis ranges from 0 to 6, and the y-axis ranges from 0 to 15. The plot shows a grid of blue lines representing the potential field, with a red path indicating the calculated trajectory. The path starts at the bottom center and moves upwards, avoiding a rectangular obstacle in the center.

The Command Window shows the following output:

```
>> main_lidarView2potential
>> main_lidarView2potential
fx>>
```

The Command Window also displays the following values:

```
値
[0,-200]
60x28 double
60x28 double
900x2 double
60x28 double
60x28 double
60x28 double
[3.5000,1.5000]
10x2 double
0.2500
[7,15]
900x2 double
10x2 double
10
```

ポテンシャル法を用いて、障害物を検出してポテンシャルマップを生成。

人材育成が重要

最近のロボット，電気自動車，自動運転車両などは，高度な制御アルゴリズムと，高度なシステム制御，マイクロコンピュータを中心とした電子制御回路などによって制御システムが構成されている。

このようなシステムは，高度で複雑な制御アルゴリズムが利用され，高機能化，多機能化に伴い，制御システムが大きくなってきている。

高等教育では，制御に関する理論的な扱いについては，かなり高いレベルの教育がなされ，学習効果を上げていると思われる。

しかし，現実の製品（機器）や半導体デバイスなどの動特性を理解して，制御システム全体のデザインができる技術者が不足している。新しい時代の技術に対応するために，早急に制御理論と製品の特性を理解し，制御システムがデザインできる技術者の育成が望まれる。

このため，効率よく，技術者を育成することが重要である。

人材育成が重要

制御システムの構築には、機構部や制御部の動作をよく理解し、システムデザインができる能力が要求される。

制御システムを正しく動作させるには、制御理論に基づいて設計することが大変重要である。制御対象の物理的特性などを理解せず、システムを構築した場合、制御対象のパラメータ変動や経時・経年変化により、特性が変化した場合には、希望する動作ができなくなる可能性がある。



制御対象を含むシステムのモデルを用いて、制御システムの設計ができたとき、パラメータ変動など、外乱に対する応答性や即応性、ロバスト性をシミュレーションで評価することが良い。

最近では、これらの作業ができる人材が求められ、これらに対応できる人材育成が求められている。

MATLAB/Simulinkなどのデファクトスタンダードのシミュレータを用いることで、第3者に対しても、制御アルゴリズムを伝達することができ、将来の改善や新しいシステムの開発を促進可能になる。

人材育成の実施例

制御システムの設計ができる技術者を養成するために、企業の技術者と学生向けの講座を実施した。

- ① 企業のエンジニア向けの勉強会を実施
- ② 学生向けの実験の実施

移動体などの設計や制御システムの考え方が理解できるエンジニアを育成するために、両者ともに、同じ内容で実験を実施した。

実験は、数名でグループを作り、物理的動作や評価がわかりやすい電動バイクの設計を実施した。実施時間は、12時間である。

設計にあたっては、タイヤと路面の転がり摩擦や風損など、実際に起きる現象を正しく取り入れ、可能な限り、実車走行に近い環境をつくり、シミュレーションを実施した。



共通設計条件(8項目) (1/2)

課題 500Whのエネルギーで、航続距離が長いバイクを設計せよ。

(1) バッテリー容量

電圧50V, 700Whを使用する。重量は7kg。

バッテリー電圧は、エネルギー容量に比例し、残容量が700Whのとき50V, 残容量が200Whのとき40Vになる。

残容量が200Whになったら、走行を停止し、シミュレーションを終了する。

(2) 登坂角度

平地および斜路(+5度から-5度)

上りは+5度, 平地は0度, 下りは-5度とする。

(3) 各係数

空気抵抗係数は 0.6, タイヤの転がり摩擦係数は 0.015とする。

(4) 車体重量および搭乗者重量

バッテリー, モータ, 搭乗者の各重量を除く, 車体本体の重量は, 50kgとする。

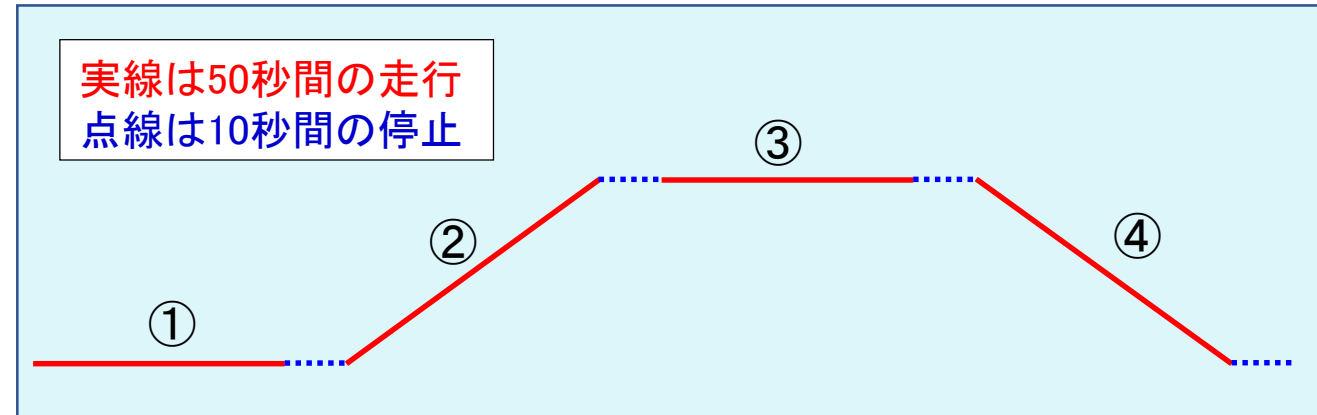
搭乗者は, 60kgとする。

全重量は, 車体本体重量に, バッテリー重量, モータ重量, 搭乗者重量が加算される。

共通設計条件(8項目) (2/2)

(5) 走行条件

図に**走行パターン**を示す。赤線は加速・定速・減速を含む50秒の走行時間、青点線は10秒間の停止時間を示している。①は平地、②は5度の上り坂、③は平地、④は5度の下り坂を示している。**このパターンを繰り返す。**



(6) タイヤの直径

10, 11, 12, 13, 14, 15インチから選択する。

(7) モータ定数

起電力定数 $K_E = 0.14$ Vs/rad, トルク定数 $K_T = 0.14$ Nm/A, 巻線抵抗 $R_a = 0.05 \Omega$, 巻線インダクタンス $L_a = 0.001$ H, 出力1kWのモータの慣性モーメント $J = 0.0005$ kgm², 粘性係数 $D = 0.001$ Nms/rad
ただし、モータの**慣性モーメント J** は、**モータの出力によって決まり、 $J = 0.0005 \times \text{出力}[\text{KW}]$ [kgm²]**。

(8) ギヤの伝達効率

ギヤの伝達効率は、0.9(90%)とする。

設計項目と表示項目

(1) 設計項目

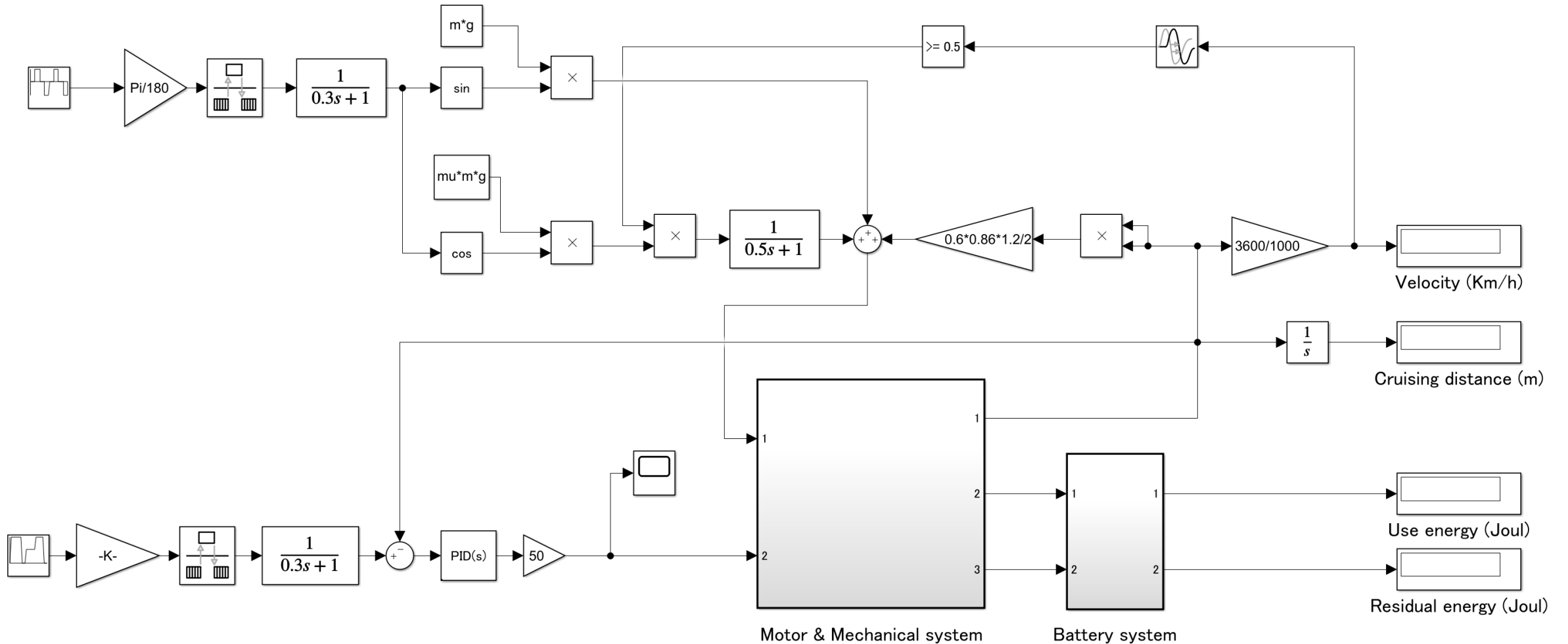
- ① 最高速度, 加速度の設定
最高速度, 加速度ともに設定条件はなし。
- ② タイヤの直径を決定する
- ③ ギヤ比 gr の設定
最高速度を実現するための, ギヤ比 gr を決定する。
- ④ モータ出力の設定
上り坂を仕様で定めた加速度や最高速度が実現できるようにモータ出力を計算し決定する。
モータ出力1kW当たりのモータ重量は5kgとする。
5kWのモータを使用する場合は, モータ重量は25kgになる。
- ⑤ モータの慣性モーメントをモータ出力より計算し求める。

(2) 表示項目

- ① 車速 [km/h], ② 航続距離, ③ バッテリ電圧と残容量, ④ モータ電流 など

未完成のブロック図

未完成のブロック図を提示し、各グループがカスタマイズして、制御システムを完成させ、シミュレーションによって評価を行う。

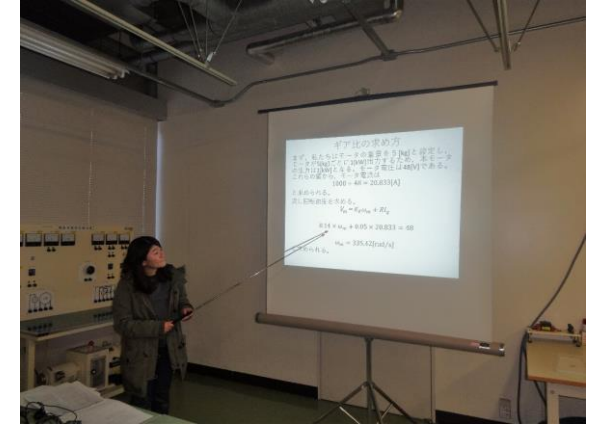


発表とコメント

発表内容

- (1) 設計コンセプト
- (2) 設計値
- (3) シミュレーション結果
- (4) 考察

企業の技術者および学生に対して、授業を実施したところ、



技術者からは、具体的な設計を行うことで、理論の重要性、理論と実際の機器の関係が理解でき、シミュレーションの有用性が理解できた、というコメントがあった。

学生からは、問題の解決法がわかり、数学や物理学の必要性、制御理論の重要性がわかり、さらにグループで問題解決法を議論でき、それをシミュレーションで確認できたので大変有意義な実験だった、というコメントがあった。

最後に 高い安定性とコストの低減へ

これまでに、数10社の企業と共同研究を実施して、数多くの製品を開発してきた。開発段階におけるシミュレータは、開発した**制御アルゴリズムの有用性の確認**や**制御システムの動特性の評価**に大変有用なツールであり、**必要不可欠な存在**になっている。

- ① 負荷変動や慣性モーメントの変動、機器の経時変化や経年変化などによる**システムの動特性への影響(ロバスト性)**を**シミュレーション**することで確かめられ、これらの変動に対して、**高い安定性を有する制御システムを構築**できる。
- ② 制御を行うために、速度や電流などのアナログ量を読み込み、計算することがある。このとき、CPUなどにデータを取り込むときの**分解能の評価**、**サンプリング間隔の評価**なども、シミュレーションによって実施でき、**最小の制御システムが構築**でき、**開発時間の短縮と製品コストを低減**することができる。
- ③ 制御システムを構築でき、評価できる人材の育成が、今後ますます重要である。