

# 国際競技会サイバスロンを通じた移動プラットフォームの 移動性能確認と4位入賞からの知見

中 嶋 秀 朗\*

## Performance of Mobile Platform and Lessons Learned through Cybathlon

Shuro Nakajima\*

Cybathlon is an international competition organized by ETH Zurich and the first cybathlon was held on 8th October, 2016 in Switzerland. The aim of this competition is to provide a platform for the development of novel assistive technologies that are useful for daily life. Pilots who are disabled and use technologies to overcome their disability compete against each other. The pilot of our team won 4th place in the powered wheelchair discipline by using the vehicle that we have developed. In this paper, the performance of the vehicle is evaluated and compared with those of others (gold medal team's vehicle and silver medal team's vehicle). In addition, lessons learned for development of a device for cybathlon are discussed.

**Key Words:** Cybathlon, Competition, Wheelchair, Mobile Platform, Rough Terrain, RT-Mover, Lessons Learned

### 1. はじめに

人口の1~2%が肢体不自由などの移動困難な障害者といわれている [1]. 日本の人口約1.2億人に当てはめると120~240万人となる. また,すでに2015年の時点で,日本では4人に1人以上が65歳以上の高齢者である. 現在,高齢運転者の誤った運転操作による事故の増加が社会問題化し始めてもいる. 上記は移動支援の必要性を示している.

ところで,移動を支援する代表的な機器である自動車の1回の利用距離は,利用の7割以上が10[km]未満である. また,1台の自動車への乗車人員状況は,8割程度が運転者1人だけである [2]. このような社会的背景により,1人乗り用の知的な(運転支援機能のついた)乗り物の実現が望まれている. 海外の動向も同様であり,例えばシンガポール大学とMITの共同で行われている1人乗りスクータの自動運転プロジェクトなどがあ

る [3]. 移動支援も含めた広い障害者支援を国際競技会の枠組みを活用して行おうという取り組みとして,2016年10月8日,スイスのチューリッヒ郊外で第1回サイバスロン(Cybathlon) [4]が開催された. この大会は,ロボティクス技術や生体工学技術を駆使して,障害者を支援し,障害を克服したうえで障害者アスリート



Fig. 1 Cybathlon

同士が競い合う国際大会である. 競技種目は,6種目(パワード(強化型)義足レース,パワード義手レース(Fig. 1(b)),パワード外骨格レース(Fig. 1(a)),パワード車いすレース(Fig. 1(c)),以降,電動車いす部門),機能的電気刺激バイクレース(FES),ブレインコンピュータインタフェースレース(BCI)である.

FESとBCI以外は,障害者が日常生活でバリアになっている場面がタスクとしてコースに設置される [4]. つまり,本競技会で設定されたタスクをクリアできれば,現時点で技術的難易度が高いと認識されている,日常生活に必要な障害者支援技術が

原稿受付 2017年1月24日

\*和歌山大学

\*Wakayama University

■ 本論文は有用性(実証実験分野)で評価されました.

■ J-STAGEでは本論文の電子付録として動画が閲覧できます.

備わっていることを、ある程度客観的に示せることになる。種目に応じてタスクの構成は異なり、タスクの例としては、義手で洗濯物を干す、義足で飛び石を移動する、車いすで階段を上り下りするなどである。各タスクには技術ポイント（以下、ポイント）が設定され、クリアしたタスクの合計ポイントで競い合う。同じ合計ポイント内ではタイム勝負となる。スイス連邦工科大学チューリッヒ（ETH Zurich）が主催である。第1回大会は、世界25ヶ国から66チームが参加した。

近年のロボットに関する国際競技会といえば DARPA Robotics Challenge が有名であるが、サイバスロンがほかの大会と違う点は、以下である。

- 競技者（機械を操縦する人という意味でパイロットとよぶ）は、機械と融合した人（サイボーグ）である。
- 障害者という実ユーザがパイロットになる。
- 人間同士が競い合う。

上記特徴により、現実感が格段に上がり、観客が感情移入でき、そして、感動を共有できるということが第1回大会で示された。サイバスロンは、実際に日常生活でのユーザがパイロットとなり、機器を使いこなしながら競い合う大会のため、主催者の狙いどおり、実ユーザと人間支援技術の隔たりを埋め、技術革新のスピードを上げることは間違いないだろう。筆者自身の参加の意義も、社会に役立つ実用技術への貢献である。

本研究の目的は以下である。

- サイバスロンのタスクをクリアすることで、日常生活に必要で、現時点で技術的難易度が高いと認識されている機能を備えていることを確認すること。
- 国際競技会という同じ土俵で競い合うことで、開発した機体と海外上位チームの機体の性能の違いを確認すること。
- サイバスロン4位という経験を通して得たロボット関連の国際競技会へ出場するための知見をまとめること。

以降では、2章で電動車いす部門の紹介と本論文で比較する機体の紹介を行った後、3章でサイバスロンを通しての移動性能の確認、4章でサイバスロン参加のための準備内容、5章で国際競技会に参加するために必要なことを記載する。ほかのチームの機体との比較は、現時点で他の機体の詳細データを得ることができないため、大会時の動画などによる目視で行う。また、サイバスロンでは予選と決勝の2回という限られた走行回数であるため、必要に応じて練習時の走行データも用いて、できる限り客観的な確認をする。なお、本論文は電動車いす部門を通じて得た知見であり、種目による違いはある程度存在する。

## 2. サイバスロン電動車いす部門

電動車いす部門では、長さ40[m]程度のコースに六つのタスク（内訳：テーブル（Fig. 7）、スラローム（Fig. 8）、ランプ+ドア（Fig. 9）、凹凸路面（Fig. 10）、左右傾斜面（Fig. 11）、階段（Fig. 12））が設置されている。六つのタスクは、車いすユーザが日常生活でバリアとなる代表的な場面である。コース幅は3[m]で、コース外に出ると失格となる。9ヶ国から12人のパイロットが出場した。午前中に予選が行われ、午後、予選1~4位チームがA決勝、5~8位チームがB決勝を戦った。筆者のチームの名称はRT-Moversであり、予選4位となりA

決勝に進んだ。A決勝の結果は、HSR Enhanced（スイス）が1位で金メダル（以降、金メダルチーム）、HKUST wheels（香港）が2位で銀メダル（以降、銀メダルチーム）、Avalanche（スロベニア）が3位で銅メダル、RT-Movers（日本）が4位だった。A決勝では、すべてのチームが、すべてのタスクをクリアし獲得ポイントは660となり、スピード勝負になった。A決勝でのタスクごとの所要時間（1秒程度の誤差含む）をまとめたものがTable 1である。Fig. 2は金メダルチームの機体、Fig. 3は銀メダルのチームの機体である。

Table 1 Time results with  $\pm 1$  [s] error in the final race

	Table	Slalom	Ramp & Door	Rough Terrain	Tilted Path	Stairs	Total
Gold	20 [s]	34 [s]	71 [s]	11 [s]	11 [s]	67 [s]	214 [s]
Silver	20 [s]	18 [s]	37 [s]	11 [s]	13 [s]	120 [s]	219 [s]
Bronze	22 [s]	22 [s]	34 [s]	15 [s]	17 [s]	157 [s]	267 [s]
4th	64 [s]	47 [s]	37 [s]	17 [s]	17 [s]	130 [s]	312 [s]



Fig. 2 Gold medal team's vehicle (photo by ETH Zurich/Alessandro Della Bella)



Fig. 3 Silver medal team's vehicle (photo by ETH Zurich/Alessandro Della Bella)

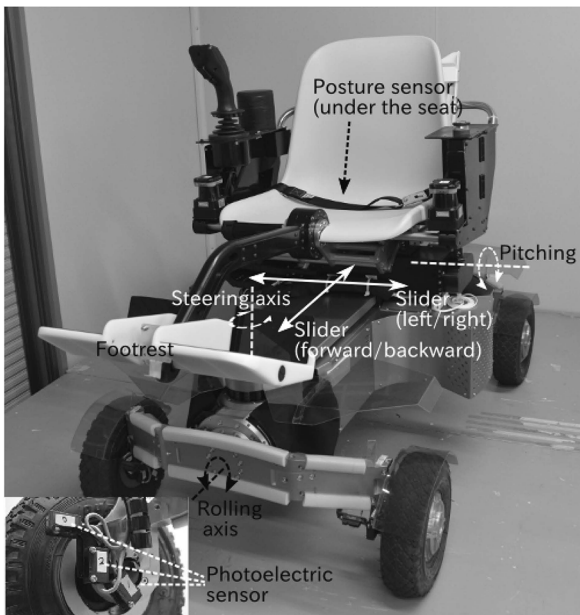
金メダルチームの機体は、個別に方向転換可能な四つの車輪を持つ。パイロットが座るシートは、天板部を前後にスライド可能である。シートを前にスライドすると足先が下がるようになっているため、テーブル下に入る場合には、シートを前に動かす。前後の車体下に、長さ0.15[m]程度のスティック棒が左右2本ついており、リンク+回転機構で、竹馬のように足先で機体を支えて機体を持ち上げる。階段を上る際に、このスティック棒が機体を上げることで左右車輪が一段上がるようになっている。

銀メダルチームの機体は、左右にベルトを持つクローラ型である。シートのピッチ角は可動である。左右ベルト間の後部に支え棒がついており、階段開始点と終点の路面角度が急変するところでの機体転倒防止用に使用する。

上記二つの機器との比較を、次の章で行う。

**Fig. 4**に示すのは筆者が開発したRT-Mover PType WA（以下、P-WA）である。四つの駆動輪を持ち、ステアリング軸とロール軸それぞれを前後に持つ。シートが、ピッチ軸まわりに回転でき、かつ、前後、左右に直線的にスライドできる。フットレストは根元が回転し、上下する。**Fig. 5**にP-WAのコンピュータおよび電気系統システムを示す。制御系と駆動系の電源は、電氣的に絶縁して供給している。駆動系の信号線は、信号線付近に $V_d$ の記載をした。主なセンサとして、シート下部に姿勢角度センサ、各車輪に三つずつ光電センサがついている。姿勢角度センサはシート部分のピッチ角度およびロール角度を計測する。各車輪の光電センサは0, 45, 90[deg]の角度で取り付けられ、車輪付近の障害物判断を行う。光電センサの使い分けは以下である。

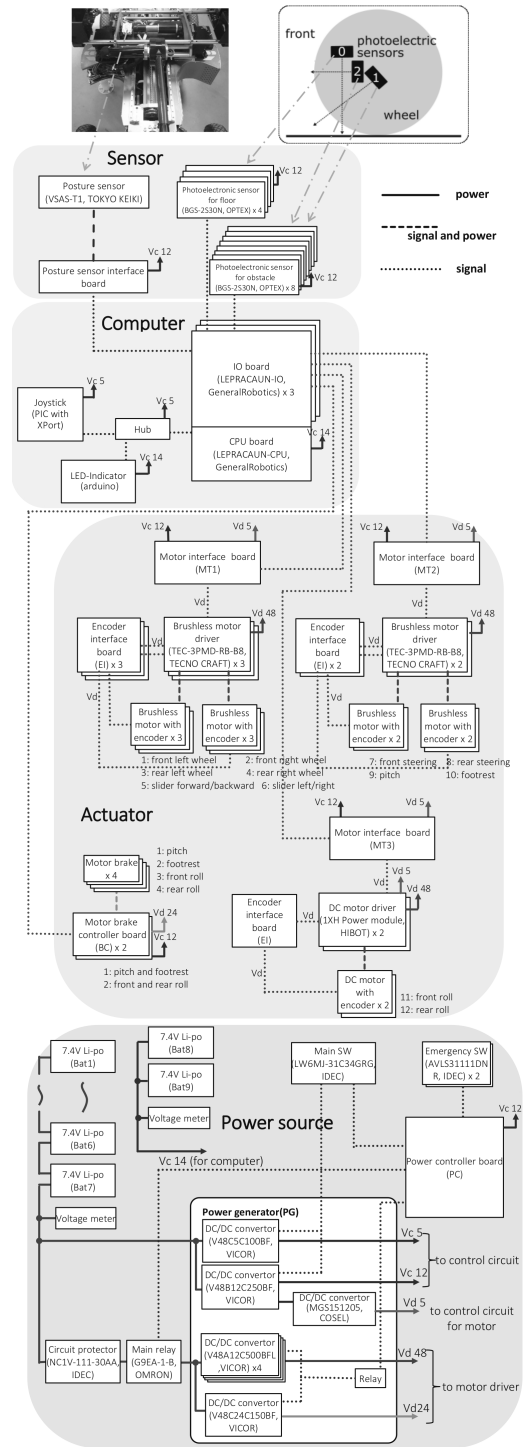
- 胴体が15度以上後傾時 センサ1または2：上り段差検知用、下り段差検知用はなし
- 胴体が15度以上前傾時 センサ1：下り段差検知用、センサ2：上り段差検知用



**Fig. 4** RT-Mover PType WA

それ以外（平面時含む） センサ0：下り段差検知用、センサ2：上り段差検知用

**Table 2**に主要な仕様を示す。移動モードは、車輪移動モード、脚動作モード、シートスライドモードの三つである。車輪移動モードでは、ジョイスティックの前後左右に応じて、機体が移動する。搭乗者の操作は、機体のスピードとステアリングである。この際、ピッチ軸と前後ロール軸をそれぞれ式(1)に



**Fig. 5** Computer and electric system of P-WA

より制御することで、斜面移動時にもシートの姿勢角度を水平に保つ。

$$T_d = K(\theta_d - \theta) + D(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) = -K\theta - D\dot{\theta} \quad (1)$$

ここで  $T_d$ : 目標トルク,  $\theta$ : シートの姿勢角度,  $\theta_d(=0)$ : シートの目標姿勢角度,  $K$ : 角度ゲイン,  $D$ : 角速度ゲインである。

脚動作は、光電センサが障害物を検知すると自動的に始まり、脚動作中に搭乗者の操作は必要ない。脚動作モードでは、脚動作する車輪以外の三つの車輪接地点でつくる支持多角形の中に重心が入るようにシート位置を調整した後に、ステアリング軸の回転により車輪を歩幅分動かし、あるいは、ロール軸の回転により車輪を上げ下げする。段差などの障害物検出の場合は、段差を上る脚動作をし、車輪の前の床がないこと（下り段差）を検出した場合は、段差を下る脚動作をする。

シートスライドモードでは、シートの前後位置を搭乗者がジョイスティックから調整することができ、また、調整後のシート位置のまま機体を前後に移動させることができる。これは、ドアの取手など、通常のシート位置では機体自身が干渉して近づきにくい場合に、搭乗者が近づきやすくするためのモードである。

ここで、不整地移動能力の高い電動車いすの主な研究開発状況を記載する。

**MeBot [5]** 段差や斜面への対応が可能である。実践的な研究が多くなされており、サイバロンにも出場した。結果は階段タスクができず7位だった。

**Stair-climbing wheelchair [6]** 前後に4車輪を持つ台車で構成されたもので、台車の位置や姿勢を調整することで階段への対応が可能である。限られた場面を検証する研究段階である。

**iBot [7]** 15年程度前に開発され市販された（現在は販売終了）。左右の車輪のついた車輪軸が前後にある台車自体が回転することで階段に対応可能である。2輪で車いす自体が立ち上がるようなバランス制御ができ、搭乗者の視線を周囲の人と合わせることができる。階段移動時には手すりに

掴まる必要があるため、サイバロンの階段タスクはできない。

**可変車輪機構 [8]** 平面は車輪移動し、段差がある場合には、段差に引っ掛けられる突起を持つ形状に車輪を変形して対応する。機体が小さく、軽い原理検証機ではよい性能が確認できているが、乗り物の実寸法となり機体質量が大きくなった場合の実現性の検証はこれからである。

サイバロンに出場した機体を含めて、現在研究開発されている機体とP-WAの移動能力における違いは、段差への斜め進入の可否である。従来の機体は、段差や階段の移動能力はあったとしても、正面からの移動のみが可能である。つまり、左右車輪同時に段差を上ることが機構的に想定されている。その一方でP-WAは、一つの車輪ごとに段差に対応することができるため、段差に対して正面からだけでなく、斜め進入することも可能である。段差に対してある程度自由な角度から進入可能であれば機器の使い勝手は向上するため、移動可能な段差数や段差への進入角度などに関して、どこまで対応可能かを今後の研究で明らかにする予定である。

### 3. サイバロンにおける性能検証

P-WAの移動性能の確認を、A決勝での動きを例にとって行う。他チームの機体の詳細なデータを取得することはできないため、目視で可能な範囲で、金と銀メダルチームの機体と比較する。

P-WAのA決勝における姿勢角度の推移をFig. 6上段に示す。図は、スタートしてからゴールするまでの時間[s]に対するシートの姿勢角（ピッチ、ロール）と胴体ピッチ角（Fig. 6左上）の推移である。各タスクに切り替わった時間の目安を時間軸上に縦線で示した。①は、左右傾斜面横断時の路面に応じた胴体ピッチ角度の変化を示す。階段移動時には、②のように一

Table 2 Main specifications of RT-Mover PType WA

Dimensions	Length: 1.1 [m]; Width: 0.7 [m] (not including the footrest)
Wheel	Radius: 0.125 [m]; Width: 0.07 [m]
Weight	79.5 [kg] (including the battery)
Motor	200 [W] (wheels); 150 [W] (front/rear roll axis); 100 [W] (pitch axis, front/rear steering, seat-slide left/right and forward/backward, footrest)
Sensor	Encoder (each motor); Current sensor (each motor); Posture angle sensor (roll and pitch of the seat); Photoelectric sensor ( $\times 3$ , each wheel)
Angle limit	$\pm 30$ [deg] (pitch axis and front/rear steering); $\pm 35$ [deg] (front/rear roll axis)
Slider limit	$\pm 0.2$ [m] (left/right); $-0.15 \sim 0.45$ [m] (backward/forward)
Max speed	7.4 [km/h] (catalog value)
Power supply	48 [V] (lithium polymer battery)

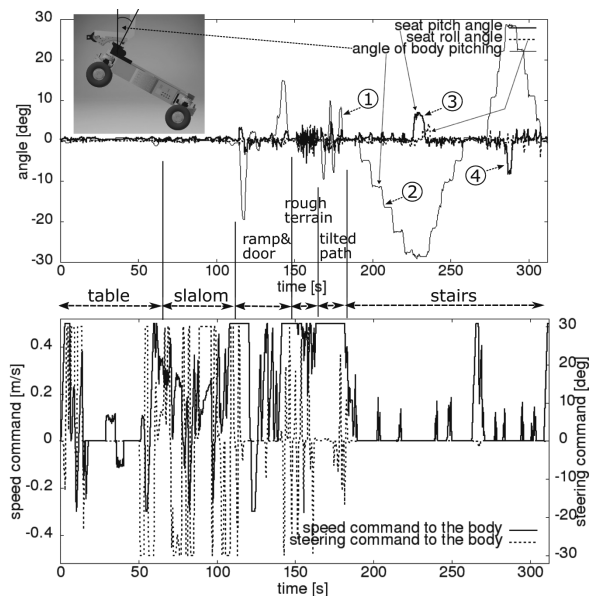


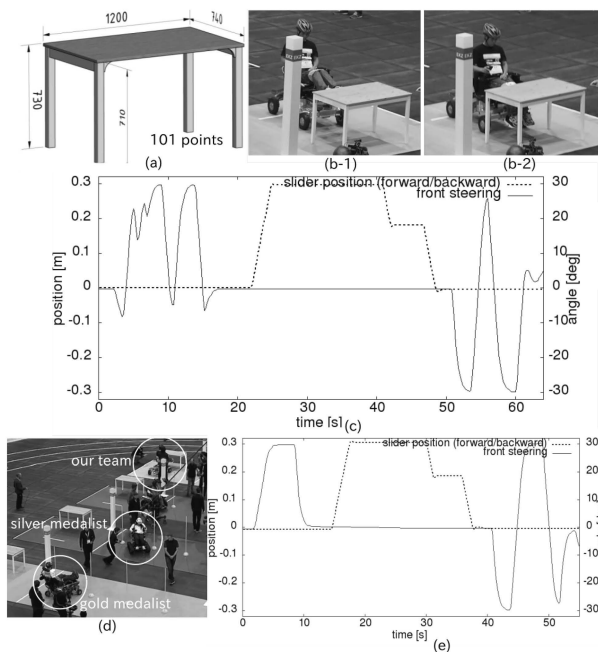
Fig. 6 Seat posture data of P-WA and pilot's commands in the final race

段ずつ上ったり下ったりするごとに胴体ピッチ角度が変化する。胴体ピッチ角度が路面に応じて変化することで、シート姿勢角度はほぼ水平を保っていることが分かる。

Fig. 6 下段はパイロットの操縦（スピードとステアリング）の履歴である。時間軸は上段と合わせてあり、テーブルタスクの20~50 [s] はシートスライドモードであり、テーブルの下に入りするため30~40 [s] で機体を前進、そして後進させている。シートをスライドさせる指令はここには記載していない。この図から、階段タスクでは操縦指令があまりなく、自動動作の割合が多いことが分かる。

Fig. 7 はテーブルタスクの結果である。テーブルの寸法は (a) であり、タスクは、太ももが半分以上、テーブルの下に触れずに入ることである。各タスクのポイントは図中に示した。不整地への対応のためには、機体が大きいほうが相対的に不整地度合いが小さくなり移動しやすくなる一方で、日常生活空間に対しては機体が小さいほうがよい。機体の大きさを抑制するためのタスクである。(b-1) から (b-2) (25 [s] 前後) で、シートスライドモードでシート位置を前方に移動した。シート位置が前になるとフットレストも下がり、乗ったままテーブルの下に入ることができ、タスクをクリアした。

Fig. 7 (d) を見ると分かるが、筆者らのチーム（一番奥）はまだテーブルの前にいる一方で、金（手前）、銀メダルチーム（中）ともスラロームの1本めと2本めを移動している。金、銀メダルチームが Table 1 より20秒でテーブルタスクを終了している一方で、筆者らのチームは64秒もかかった。遅い理由は以下である。

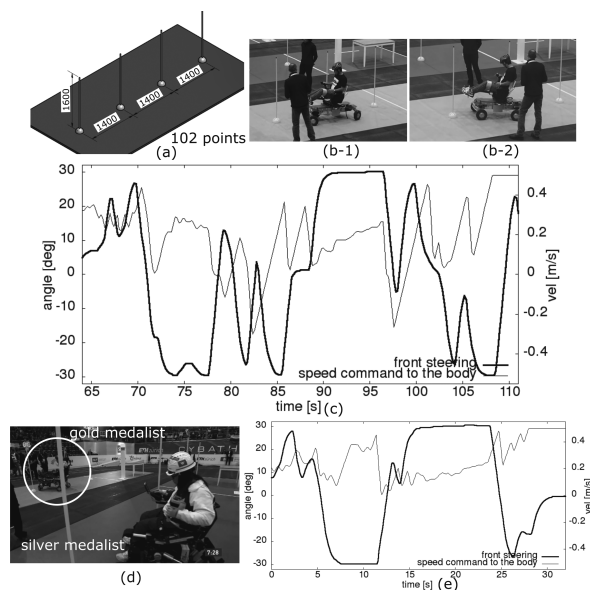


**Fig. 7** Table task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, d) scenes at the table task, (c) data of the front steering and seat's position, (d) the best data before the competition ((a) is from the rule book and (d) is captured from a video by ETH Zurich/SRF)

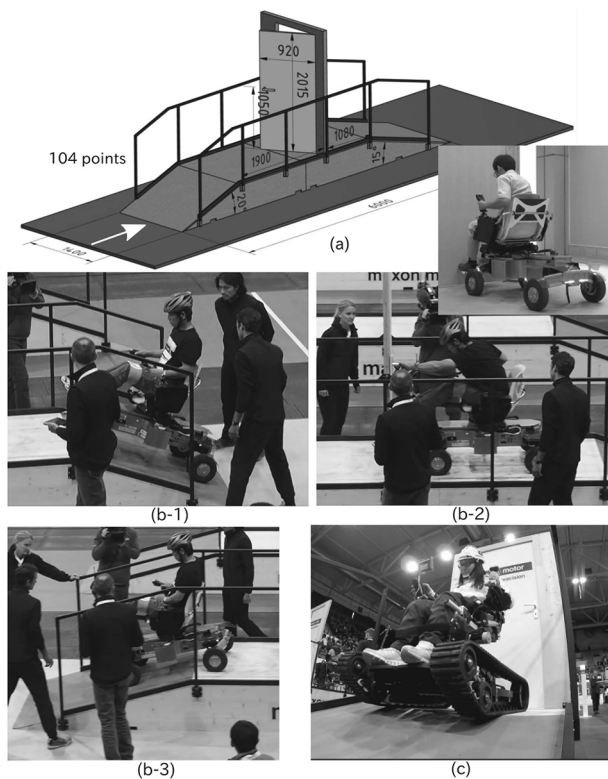
- Fig. 7 (c) が示すように、0~15 [s], 50~65 [s] 付近で複数回、機体の方向修正のためにステアリングのやり直しを行った。
- 機体がテーブルに正体してから、機体とテーブルの干渉を避けるためにシートスライドモードによりシート位置を前方にする必要がある。
- タスク終了後、シートスライドモードによりシート位置を初期位置に戻す必要がある。

Fig. 7 (e) は練習時のデータのうち、一番早くタスクを行ったときののものであり、所要時間は55秒程度だった。このデータと比較すると、初めのやり直しはパイロットの操作ミスによるものである一方で、後半のやり直しは同様であり、小回り性能の向上とシートスライドモードにおける高速化は今後の課題である。なお、金メダルチームもテーブル下に入るためにシートスライドをさせる必要があったが、スタート時点でシートの位置を一番前にしておき時間短縮を図るといった戦略をとっていた。

Fig. 8 はスラロームタスクの結果である。(a) のすべてのボールとボールの間をぬって移動する。日常生活に必要な小回り性能を確認するタスクである。(c) は P-WA の機体前進速度と前ステアリングの推移である。時間目盛はスタートからの経過時間であり、例えば70~87 [s] 前後は1と2本めのボールの間を抜けて、2と3本めのボールの間を移動するところである。78~85 [s] 付近で前ステアリングが-30~-10 [deg] 付近を往復しているが、これは (b-1), (b-2) に示すように2と3本めのボール間に対して曲がり切れず、ステアリングを切り直したところである。この際、機体を後進させ、やり直しを行っていることも (c) から分かる。(c) より95~100 [s] 付近ほかでもステアリングのやり直しを行った。本タスクの所用時間は47秒であった (Table 1)。金、銀メダルチームのそれぞれの所要時間は34秒



**Fig. 8** Slalom task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, d) scenes at the slalom task, (c) data of the front steering and the velocity of the body, (e) the best data before the competition ((a) is from the rule book and (d) is captured from a video by ETH Zurich/SRF)



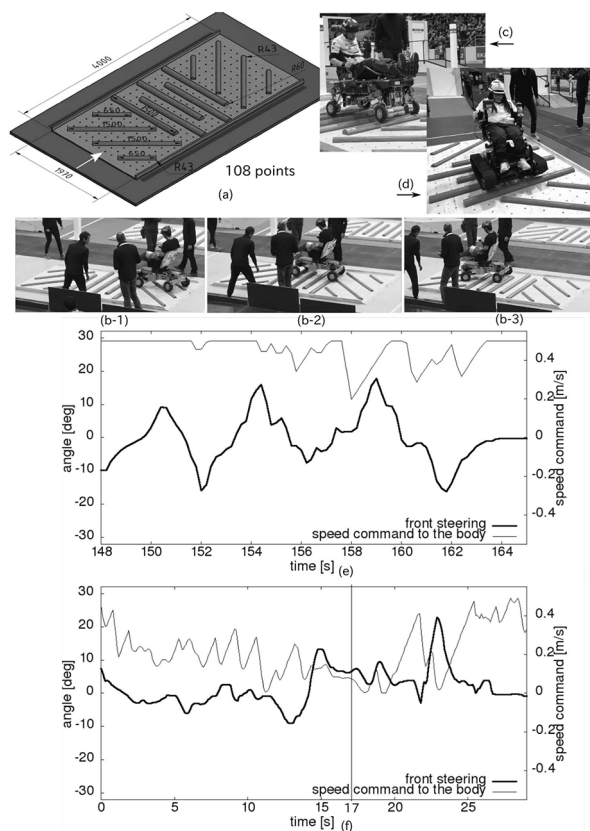
**Fig. 9** Ramp and door task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, b-3, c) scenes at the ramp and door task ((a) is from the rule book and (c) is captured from a video by ETH Zurich/SRF)

と 18 秒であった。金メダルチームは個別に方向転換可能な四つの車輪を持つため旋回半径が小さく、また、銀メダルチームはクローラタイプでその場旋回が可能であり、高い小回り性能を持っていた。その一方で、P-WA の胴体中心の最小旋回半径は 0.774 [m] であり、ポール間が 1.4 [m] であることから操縦の難易度は高かった。Fig. 8 (e) は練習時のうまくいったときのデータであり、ステアリングを切り返さずに走行できる場合は 32 秒程度で走行可能であるが、小回り性能の向上に関しては今後の課題である。上記の 2 タスク終了時点で、金、銀チームメダルに対してそれぞれ 57 秒、73 秒も遅れてしまった。

Fig. 9 はランプ+ドアタスクの結果である。20 [deg] の斜面を上った後、ドアを開けて通過、ドアを閉めて、15 [deg] の斜面を下る。Fig. 6 が示すように、(b-1)、(b-3) の斜面移動中も、ピッチ軸が動くことでシートはほぼ水平である。ドアを開ける場面が (b-2) である。その右上図に示すようにシート部分を前後移動するシートスライドモードによりドアなどに容易に近づくことができるが、パイロットはそのままドアの開け閉めが可能だったため、この機能は使わなかった。

銀メダルチームのクローラ機構では、(c) に示すように斜面への切り替わりの際にベルト前方が路面から浮いてしまい、路面に対する重心位置の移動に伴い、急にバタンと倒れるように接地面が切り替わる問題がある。

金メダルチームの所要時間が 71 秒とほかと比較して大きい (Table 1)。ドアタスクでは、開けるために引いたドアを機体



**Fig. 10** Rough terrain task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, b-3, c, d) scenes at the rough terrain task, (e) data of the front steering and the velocity of the body, (f) data before the competition ((a) is from the rule book, (d) is by ETH Zurich/Alessandro Della Bella and (e) is captured from a video by ETH Zurich/SRF)

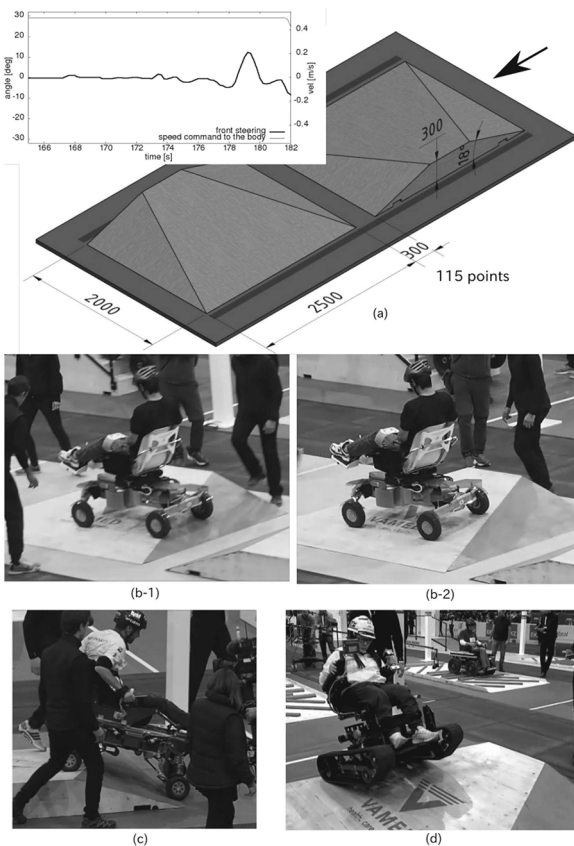
がよけて通る必要があるが、金メダルチームの機体では、パイロットの足が干渉し、引いたドアを逃すことができない。そのためドアの取手に紐を引っ掛けて、紐でドアを引っ張ることで機体とドアの間隔を大きくしていた。その一方で銀メダルおよび筆者らのチームは、パイロットが乗車位置からドアを開けても、開けたドアに足が干渉せずに通過できるため所要時間に差があった。

Fig. 10 は凹凸路面タスクの結果である。凹凸路面には、直径が 120 [mm] と 86 [mm] の丸太の半割が (a) のように置いてある。日常生活にある凹凸路面の模擬である。(b-1)、(b-2)、(b-3) は移動の様子、(e) は P-WA の機体前進速度と前ステアリングの推移であり、17 秒で移動した。金、銀メダルチームの様子は (c)、(d) であり、両チームとも Table 1 より 11 秒で凹凸路面を移動した。

Fig. 10 (f) は練習時のデータである。実は、凹凸路面は機体に対して平面時と比較して大きな振動や衝撃が加わるため、大会本番までに機体を壊したくないという思いも働き、練習段階ではなるべく機体に負荷が掛からないように、スピードを抑え、なるべく各車輪が凹凸に面するタイミングをずらすようなコース取りを行っていた。ただし本番では、パイロットはほぼソフトウェア上の制限速度である 0.5 [m/s] で移動した (Fig. 10 (e)).

制限速度 0.5 [m/s] の値は、性能限界というよりも練習時に危険を感じないという理由で低めに設定していたものである。性能限界速度に対する議論を行い、より高い速度で走行をするべきだった。

Fig. 11 は左右傾斜路面横断タスクの結果である。(a)のように右に傾いた斜面の後に左に傾いた斜面を横断する。日常生活では、歩道と車道の接続部や、歩道に存在する車の出入り用スロープ部を想定したものである。車いす使用者にとって横流れや転倒などの可能性があり、移動しにくい路面の一つである。(b-1), (b-2) あるいは Fig. 6 に示すように、シートの姿勢角はほぼ水平を維持したまま、左右に傾く斜面を横断している。ピッチ軸と前後ロール軸をそれぞれ式 (1) により制御することで、シートの水平は維持される。その一方で、(c) の金メダルチームは路面の傾きに応じてパイロットも傾き（この写真のみ A 決勝のシーンがなかったため予選時のもの）、あるいは、(d) の銀メダルチームは傾斜の切り替わり部でベルトが地面から浮いてしまうため、パイロットの姿勢がバタンと急に変化する。Fig. 11 (a) 左上のデータは本タスク中のパイロットのスピードとステアリング操作であるが、ほぼソフトウェアの制限速度 0.5 [m/s] での移動であり、また、後半に少しステアリングを切った（次の階段タスクのための位置合わせのために）が多くは直進である。金、銀メダルチームはそれぞれ 11 秒、13 秒に対して P-WA は 17



**Fig. 11** Tilted path task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, c, d) scenes at the tilted path task ((a) is from the rule book, and (c), (d) are captured from videos by ETH Zurich/SRF)

秒かかったが、ほぼ 0.5 [m/s] での移動だったため、これ以上早く移動できなかったことになる。やはり制限速度の 0.5 [m/s] という値に関して議論が足りなかったということになり、より高速な速度での不整地移動に関する研究の必要性を再認識した。

Fig. 12 は階段タスクの結果である。高さ 170 [mm]、踏面 280 [mm]、幅 1,200 [mm] の階段を 3 段上り、その後、下るタスクである。駅などにある長い階段にはエレベータなどのインフラが設置されることが多く、それを使うほうが現実的だが、数段程度の階段に対しては、コストや場所的にエレベータなどを設置するのは難しい。数段の階段に対しては、スロープによるバリアフリー化が検討されるが、スペースの制約上設置が難しい場所も散在するため、このタスクがある。出場チームのうち、半数が階段タスクをクリアできなかったことから、一番難易度が高いタスクである。

P-WA は車輪を交互に一段ずつ上げながら階段を上る。この階段では、左右の前車輪が 3 段上った後に、左右の後車輪が 3 段上った。脚動作は、車輪付近の光電センサが段差を検知すると自動で開始する。脚動作の流れは以下である。まず、脚動作中に機体が倒れないようにするために、シートの位置を移動して重心位置を調整する。安定余裕を確保した後に、車輪を一定の歩幅分前に動かし、段差にぶつかったら上げて、段差の上に車輪を上らせる。脚動作が終了したら、前後のステアリングを初期位置に戻す。脚動作中は、脚動作と反対側のロール軸と、そして、ピッチ軸に関して、式 (1) のシート水平化制御をする。なお、ピッチ軸の可動範囲が  $\pm 30$  [deg] であり、階段移動での最大傾斜角が 37 [deg] 程度のため、シートが 7 [deg] 程度まで傾くときがある (Fig. 6 上段③)。ただし、例えば金メダルチームは (c-1), (c-2) のようにシートが路面の傾きと同じだけ傾くため、P-WA のシートの傾きはかなり抑制されている。

P-WA は階段を下る際も、車輪を交互に一段ずつ下げながら、移動する。シートの水平制御については上りと同様に、最大傾斜の際に  $-7$  [deg] 程度傾く以外は水平が保たれる (Fig. 6 上段④)。銀メダルチームは (e-1), (e-2) に示すように、パイロットが相当後傾になることで重心移動を行い、階段を下りていた。

Fig. 6 下段から、階段タスクでは 263~270 [s] の階段の上平面を前進するとき以外は、パイロットによる操縦は、断続的に前進指令を出す程度であることが分かり、自動化されている動作が多いことが分かる。そのため (d-3) が示すように、階段移動中に観客に対してパイロットが左手を上げて振ることも可能だった。

ただし、後述する事前技術審査で、機体の近くにいる大会のサポートスタッフの足に光電センサが反応して誤作動しないように指摘されたため、階段移動時以外は光電センサの情報をスイッチで OFF にしていた。なお、金、銀メダルチームとも、階段に対する機器の動作は、例えば、シート部分を前後に動かす、階段を上るためのスティックを出すなどいずれも路面に応じてパイロットが一つずつ手動操縦していたようだ。

Table 1 において、階段タスクで特徴的なのは、金メダルチームの階段タスクの所要時間が 67 [s] と、ほかと比較してほぼ半分であることである。金メダルチームの階段を上る動作は、各車輪の横付近にある Fig. 2 のスティック部を用いる。つまり、車輪



**Fig. 12** Stairs task: (a) dimensions of the course, (b-1, b-2, c-1, c-2) scenes at climbing up the stairs, (d-1, d-2, d-3, e-1, e-2) scenes at climbing down the stairs ((a) is from the rule book and (c-1, c-2, e-1, e-2) are captured from videos by ETH Zurich/SRF)

が段差の前に近づいたら、パイロットがスイッチ操作によりスティックを下げ、そのスティックが地面を押して機体を持ち上げる。そして、左右の車輪を同時に一段上に上げる。次に、階段を下る動作に関しては、特に後半の後車輪が階段3段めから床まで下り際に、ただ前進して勢いで進む移動方法だった。車輪のサスペンションで一段分落ちる衝撃をその都度吸収していたが、その分、パイロット自身への衝撃や姿勢変化は大きかった。

Fig. 12 (e-1), (e-2) は銀メダルチームの階段を下る場面であるが、パイロットが後傾していることが分かる。階段を下る際に、重心が支持面内に入り、静的に安定になるようにするためである。平面から階段への切り替わりの際に、タイミングよくパイロットが重心移動するという、パイロット自身の重心移動による移動戦略だった。なお、階段の上りにおいて平面から上りに切り替わる際には、機体後ろに付いている支持バーで機体が倒れないようにしていた。

我々のチームも静的な安定を保ちつつ移動する方法だったため、Table 1 に示すほどの所要時間差が出てしまい、やはり高速化への対応が課題として浮かび上がった。

まとめると、A 決勝の結果、P-WA はすべてのタスクをクリアし、ポイントは金メダルチームと同じ 660 だったが、タイム勝負により 4 位となった。姿勢の安定性、乗り心地、操縦の簡易性の観点では問題がなかった一方で、高速化の議論が今後の課題である。

#### 4. サイバスロン参加のための準備

サイバスロンに出場するための機体開発に関して記す。以下の状態だった 17ヶ月前から準備を開始した。

- 段差の移動も可能な 1 人乗り用の乗り物 (Personal Mobility Vehicle, 以下 PMV) の開発を 3 台行った経験がある。
- 3 代めまでの PMV 研究開発から得た知見を反映した P-WA の前提とできるシャシーがある。
- ただし、上記のシャシーでは 3 段の階段に対応できないため機構の見直しは必要である。

開発スケジュールの概要は以下である。

17~14ヶ月前 機構の見直しとシャシー改良部の製作

15~13ヶ月前 インターフェース (IF) 基板やコンピュータ (CP) システムの配線, 取り付け

13~12ヶ月前 CP システム構築

12~11ヶ月前 各 IF 基板ソフトウェアコーディング, 各部分レベルの動作確認実験

11ヶ月前 統合ソフトウェアコーディング, 統合動作確認実験

10ヶ月前~9ヶ月前 サイバスロン各タスク用ソフトウェアコーディング+動作確認実験

8ヶ月前~直前 動作実験+ソフトウェアの改良

ここで、IF 基板、CP システムなどは以前開発した PMV の資産をベースに改良したため、時間短縮に結びついている。また、10ヶ月程度前には、その後のハードウェアの見た目上の変更はほとんどない程度まで出来上がり、それ以降は実験とソフトウェア改良を行っている。つまり、機体が一通り動き初めてからの開発の時間をしっかり確保した。

Fig. 13 は 2015 年 10 月 (大会 12ヶ月前)~2016 年 9 月 (1ヶ



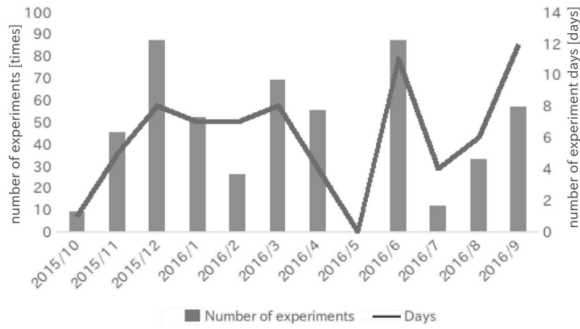


Fig. 13 The number of experiments and days

月前)までの実施した実験回数と所要半日程度以上の実験日数のグラフを示したものである。大会開催月の2016年10月は現地ホテルでの動作確認を行っただけのため、上記には含まれていない。延べ、実験回数が532回、実験実施日が73日であり、大会前1年間は毎週1, 2日は、7, 8 [回/日]程度の頻度で動作実験を行ったことになる。パイロットによる走行試験実施日数は、2016年2月に1日、3月に2日、4月に1日、6月に1日、8月に1日、9月に3日である。

Table 3には実験トピックと実施回数を記した。表中、Allは全タスクを一連で実施する内容であり、Outdoorは屋外での移動性能実験、Show Performanceは訪問者などへの性能実演を意味する。Othersは分類しにくい各種動作試験である。Fig. 13, Table 3より以下が分かる。

- 実験回数には4回の波(2015年12月, 2016年3, 4月, 2016年6月, 2016年9月)がある。
- 階段以外の比較的技術レベルの低いタスクは半年前くらいに動作確認実験は終了。
- 階段タスクの実験回数は3回の波(2015年12月, 2016年4月, 2016年8月)がある。
- 全タスクの一連動作試験は7ヶ月前(2016年3月)に開始し、2016年6月, 8月, 9月と行った。

上記から読み取れることは、本番を模擬した試験の開始は半年程度前であり、そして、技術難度の高いものは「実験→データの積み上げ→エラー対策/分析→改良」のサイクルを複数回、回していることである。

次に、実験を通じて発生した不具合内容と発生頻度についてまとめる。ただし以下は、移動制御アルゴリズムの骨格ができあがってから後に発生したものだけである。

- CPシステムアクセスレベルのソフトウェアエラー 9事象
- 階段動作アルゴリズムのエラー 12事象
- 各タスク動作(階段以外)のアルゴリズムエラー 11事象
- 状況によってまれに発生する移動アルゴリズムエラー 11事象
- センサ情報への対応アルゴリズムエラー 12事象
- 操作性, 使用方法の要改良 16事象
- その他 4事象

上記から読み取れることは、システム全体、アルゴリズムの骨格、センサ情報の環境に応じた処理方法、と全体から部分の全範囲にわたって不具合箇所が発生し、そして操作性, 使用性でも改良箇所が発生していることである。つまり、開発のどの

Table 3 Experimental topics through the development of P-WA

	2015 / 10	2015 / 11	2015 / 12	2016 / 1	2016 / 2	2016 / 3
Table	0	0	1	1	0	5
Slalom	0	0	0	3	0	0
Ramp & Door	0	0	4	7	1	2
Rough Terrain	0	0	2	3	0	4
Tilted Path	0	0	0	2	1	4
Stairs	0	0	59	14	7	4
All	0	0	0	0	0	3
Show Performance	0	0	0	0	3	0
Outdoor	0	0	0	0	0	30
Others	9	45	21	22	14	17

	2016 / 4	2016 / 5	2016 / 6	2016 / 7	2016 / 8	2016 / 9
Table	6	0	0	0	0	1
Slalom	4	0	0	0	0	1
Ramp & Door	5	0	2	0	0	1
Rough Terrain	0	0	0	0	0	1
Tilted Path	0	0	4	0	0	1
Stairs	16	0	0	0	15	1
All	0	0	15	0	14	14
Show Performance	0	0	0	7	0	2
Outdoor	0	0	7	0	0	0
Others	24	0	59	5	4	35

段階でも不具合が発生しており、開発期間全体を通じての実験の積み重ねはやはり重要である。

次に、サイバスロンへ出場するために必要なことの一つとして事前技術審査制度がある。事前技術審査は主に機体の安全性が基準をクリアしているかどうかを見るものである。大会5ヶ月前の2016年5月末までに第1版の書類を提出し、審査を受ける。不十分な箇所が指摘されれば、対策を施した後に再提出する。事前審査に合格したうえで、大会前日に現地での機体の安全性確認と動作確認に関する審査が行われる。

事前審査の主な内容は以下である。

- 一般的な安全対策 15項目, 例えば静電気対策が十分か, EMC性能, 振動, 騒音対策, 緊急停止性能など
- 電源に関する安全対策 10項目, 例えば電源部の絶縁性, バッテリの安全設置, 放熱対策, 耐水性, 最大電圧制限など
- 機体の開始, 終了処理 4項目, 起動後の暴走可能性, 初期状態での安全状態, 電源遮断時の安全状態など
- 機体の形状 11項目, 移動時に危険な形状にならないか, 人にやさしい形状で尖った箇所がないか, 形状がパイロットの視界を遮らないかなど
- その他, パイロットの操縦能力, 動作時の安全性

各項目は必要に応じてISOが参照されており、対策を取ったうえで、状況を書面で提出する。5月に第1版を提出し、それに対して不足点が指摘され、対策を取った後に第2版を提出したのが6月末である。筆者らは、第2版により事前審査を通過した。

### 5. 国際競技会に参加するためには

サイバスロンには、RT-Moversというチームのリーダーとして筆者は参加した。RT-Moversの構成は筆者のほか、パイロット1名、学生5名である。学生5名の内訳は学部3年生4人+学部1年生1名(チーム登録時)である。機体の開発は筆者が行

い、学生は実験時の補助などをしながらロボット開発を学んだ。

Lessons learned の積み上げの重要性は、近年、ロボット分野でも強く指摘され、論文としての価値も見直されている。例えば浅間山でのフィールド試験に関しては、動作環境が実験室では再現できないことに起因する知見が記載されている [9]。また、DARPA Robotics Challenge に関連して、例えば大会で確実に動くために必要なこと [10] [11] であったり、大会出場への開発工程に関すること [12] が記載されている。本論文では、いくつかの観点から、サイバロン出場を通して得た国際競技会に出場するための知見を記載する。

### 5.1 確実に動く機体を開発する風土について

確実に動く機体が必要なのは当たり前だが、それを実現するのは難しい。「確実に」の意味は、以下である。

- 特に開発の後期には故障している期間がなく、常時動作可能な状態を維持していること。
- 実験中不意に動作が停止しないこと。
- 移動性能が一定であること。

サイバロンでは、現状市販されている車いすでは解決できない問題がタスクになっているため、どの機体開発であっても新規開発要素がある。新規開発要素が、周囲環境や条件の変化に対しても確実に動作するレベルに引き上げるには、1回の成功の後にそれまでの数倍～数十倍の時間がかかることは、サイバロンの経験からも明らかである。

しかし大学の通常の研究活動からは、確実に動くマシンを開発、維持する風土は生まれにくい。理由は以下である。

- 大学の研究室では、確実性より可能性を重視するため、一度うまくいけば、うまくいった結果に基づいた性能について議論を始め、満足してしまう。
- 大学は学生という学び段階の開発者が入るため、耐久性、信頼性の観点からみた品質は低くなる傾向がある。
- 大学の研究は事象の断面に関して分析することが多く、サイバロンのような複数のタスクが連続した、つながったシーンを対象にすることは少ない。

一方、企業の研究開発部署では、確実に動作する機器の開発を生業としている。ただし、現状の商品では対応できないタスクが設定されるため新規開発要素が発生するが、直接的に商品として活用されないものの研究開発はされにくい。

つまり、大学、企業とも競技会に出るための機体開発には壁があり、その壁となる風土を変える必要がある。

なお、教育プログラムを開発工程と並走させる場合には、教育プログラムは実際の開発工程とは規模も質も独立したものと認識して、個別に企画・実施する体制が必要である。そうしないとスケジュールの大幅な遅延、品質の低下、責任所在のぼやけにつながる。

### 5.2 確実に動く機体の準備方法について

現状のロボットは配線数が多い。実験で動かすと配線に負荷がかかり、その結果不良箇所が発生してしまう場合も多い。故障した際に、原因である1本の配線を特定するのに相当な時間と労力がかかる。

競技会レベルの機体を開発する際に重要だった作業は、振り返ってみると以下に示す基本事項につきる。

**コネクタ作成の品質を重視** 専用工具を用いて品質最優先でコネクタ作成後、負荷をかけても外れないことを確認する。取り外しの際のコネクタの持ち手部分、あるいは、線材動作箇所の負荷が分散するように、グルーガンなどで補強する。

**配線の品質を重視** 配線は見た目もすっきりと取り回す。動作部を動かして配線の動作状況を確認めながら、適当な固定箇所を決定する。

**基板作成の品質を重視** 振動やコネクタの抜き差しの際の小変形で、はんだ付け部がはがれないように、はんだ付けを確実にやる。

**メンテナンスを重視** 機体の状態維持はメンテナンスの賜物であることを認識し、以下のメンテナンスを確実に実施する。

**通常メンテナンス** 特に力がかかる動作箇所は4時間以上動かした場合に行う。ネジの適正值での増しジメが中心。回路、コネクタ部分は目視確認。いもネジで必要な箇所も忘れない。センサ状態確認。全体の目視確認。  
**簡易分解メンテナンス** 動作箇所について、1週間に一度、ある程度分解して整備する。

**システムチェック** コネクタや配線に変更を加えた際にモータやセンサ単位で動作確認する。

**実験期間と回数の確保** 大会前1年弱程度、実験を平均で週1～2日行い、各段階での不具合を改良する。バスタブ曲線の初期故障部分を出し切る必要がある。実験データ、動画の保存を常時行い、振り返り検討を可能にする。

### 5.3 パイロットとの連携について

パイロットによる十分な走行練習は必須である。ただし、機体の動作検証、調整を行いながら、パイロットの操縦練習を行うことは、時間軸スケールが違う二つのことを並行して行うことを意味する。つまり、パイロットは集中的に、何度も走行練習を行いたい。その一方で、開発中の機体は、不具合が発生すれば、数時間その原因追求で停止する。その後、再実験となるが、その間パイロットは待機となる。時間軸に対する価値観を開発者とパイロットが共有する必要がある。

### 5.4 事前技術審査制度の有効性について

事前に機器に対して規定があり、それに基づき書類による事前技術審査が行われたため、安全に対する出場者の意識付けと、機器の一定以上の安全性の確保がされた。大きなけがなどがなく大会が行われたことは、その有効性を示してもおり、事前技術審査への十分な対応が必要である。

### 5.5 日本の風土について

サイバロンは国際大会のため、国による風土の違いについて議論する意義はあるだろう。

P-WAの研究開発を進めるにあたり、スピードや安全性への過度な保守性から発生する周囲からのプレッシャーがあったのは事実である。人前で実演などを行う場合も、もし事故があったら誰が責任をとるのかという責任論が先走りし、それに委縮して、例えば過度に最高速度に制限を掛けてしまったのが現実である。その一つの結果が0.5[m/s]という最高速度制限である。その一方で、海外のチームは攻めが感じられた。組織としての具体的な安全規定を持ち、その範囲内であれば個人への責任を過度に追及しないような風土によるものであろう。特に上

位の成績を狙う場合には、具体的な内容による事前技術審査と同様に、大学などの組織として、開発者が上位を目指す開発に専念できる具体的なルール作りが必要である。

## 6. おわりに

本大会の1年前にプレ大会が行われた。その際には、全タスクをクリアできる電動車いすは世界に存在しなかったが、本大会では6台のマシンがクリアした。競技会開催により技術が進んだ例の一つであり、大会が果たした役割は大きい。

そのようなサイバスロンに出場して、ほかの機体と同じ土俵でP-WAの性能を確認した。その結果、P-WAは全タスクをクリアでき目的とした移動性能があることは実証できた。ただし、競技の結果は4位であり、今後の課題として高速化に対する議論が必要であることが明らかとなった。さらに本論文では、国際競技会であるサイバスロンに大学のチームとして出場した経験から得た知見をまとめた。

**謝辞** 開発した機体のベース部分には、(独)鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」の平成23年度採択課題の成果を使用した。また、本研究は科研費(基盤研究(c)JP16K01550)の支援、そして、和歌山大学基金を通して多くの方、企業から研究開発費の支援をいただいた。さらに、チームメンバーの学生には、実験の補助など精力的に協力してもらった。この場を借りて感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 金, 秋山ほか: “移動困難者の需要推計に関する基礎的研究 —町田市を例にしたケーススタディ—”, 第30回土木計画学研究発表会・講演集, 2004.
- [2] 平成22年度 全国道路・街路交通情勢調査.
- [3] H. Andersen, Y.H. Eng and W.K. Leong: “Autonomous personal mobility scooter for multi-class mobility-on-demand service,” Proc. of 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.1753–1760, 2016.
- [4] R. Riener and L.J. Seward: “Cybathon 2016,” Proc. of 2014 IEEE International Conference on Systems, Man and Cyber-

netics, pp.2792–2794, 2014.

- [5] B. Daveler, B. Salatin, et al.: “Participatory design and validation of mobility enhancement robotic wheelchair,” Journal of Rehabilitation Research and Development, vol.52, no.6, pp.739–750, 2015.
- [6] M.J. Lawn and T. Ishimatsu: “Modeling of a stair-climbing wheelchair mechanism with high single-step capability,” IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol.11, issue 3, pp.323–332, 2003.
- [7] R.A. Cooper, M.L. Boninger, et al.: “Use of the INDEPENDENCE 3000 IBOT Transporter at home and in the community: A case report,” Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, vol.1, issue 1–2, pp.111–117, 2006.
- [8] S.-C. Chen, K.-J. Huang, et al.: “Quattroped: A Leg-Wheel Transformable Robot,” IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol.19, issue 2, pp.730–742, 2014.
- [9] 山内, 秋山, 永谷: “飛行ロボットと小型地表移動ロボットの複合システムによる火山活動区域の無人調査 —浅間山における2014年フィールド試験—”, 日本ロボット学会誌, vol.34, no.3, pp.220–225, 2016.
- [10] M. Johnson, B. Shrewsbury, et al.: “IHMC’s Lessons Learned from the DARPA Robotics Challenge Trials,” Journal of Field Robotics, vol.32, issue 2, pp.192–208, 2015.
- [11] M. Johnson, J.M. Bradshaw, et al.: “Seven cardinal virtues for human-machine teamwork: Examples from the DARPA Robotics Challenge,” IEEE Intelligent Systems, vol.29, issue 6, pp.74–80, 2014.
- [12] A. Stentz, H. Herman, et al.: “CHIMP, the CMU Highly Intelligent Mobile Platform,” Journal of Field Robotics, vol.32, issue 2, pp.209–228, 2015.



中嶋秀朗 (Shuro Nakajima)

JR 東日本で列車制御システム開発などにかかわった後に、千葉工業大学(研究員, 講師, 准教授, その間, visiting scholar, UC Berkeley, 2013~2014)を経て、現在和歌山大学教授。移動ロボット, 小型の乗り物に関する研究が専門。東北大学大学院へ飛び級入学し、博士後期課程は期間短縮修了。博士(情報科学, 東北大学), 技術士(機械)。2013年日本設計工学会論文賞受賞。2016年サイバスロン電動車いす部門4位入賞。2017年電気学会第73回電気学術振興賞 進歩賞受賞。German Innovation Award (Gottfried Wagener Prize), 2017受賞。(日本ロボット学会正会員)