

トマト果実の自動収穫能力を競うトマトロボット競技会

Tomato-Harvesting Robot Competition

石井和男^{*1}, 松尾貴之^{*2}, 武村泰範^{*3}, 園田隆^{*3}, 川尻一志^{*4}, 西田祐也^{*1}

^{*1} 九州工業大学 ^{*2} 北九州工業高等専門学校 ^{*3} 西日本工業大学 ^{*4} 響灘菜園

Kazuo Ishii^{*1}, Takayuki Matsuo^{*2}, Yasunori Takemura^{*3}, Takashi Sonoda^{*3}, Kazushi Kawajiri^{*4}, Yuya Nishida^{*1}

^{*1} Kyushu Inst. of Tech. ^{*2} National Inst. of Tech., Kitakyushu College. ^{*3} Nishinippon Inst. of Tech. ^{*4} Hibikinada Green Farm

1. はじめに

日本は生産現場へのロボット導入が進んでいる国の一つであるが、実用化されているロボットの多くは第二次産業用のオートメーション用ロボットであり、農林水産分野におけるロボットの割合は少ない。農業現場では、生産者の高齢化と過疎化、後継者不足による労働力不足が問題となっている。農林水産省の統計情報[1]によると日本の食料自給率（カロリーベース）は約39%となっており、主要先進国の中で最低水準である。これらの問題を解決した将来像として「スマート農業」が提案、それを実現するツールであるロボットの農業分野への導入が期待されている[2]。農業用ロボットの開発は、省力化、自動化、生産性の向上などが期待でき[3]、さらに農作物の環境、栽培、状態や品質の管理、生産量調整などの情報を一元管理できる。近年ではアスパラガスを収穫するロボット[4]の開発、航空写真やIoT センサを用いて圃場マップや作業支援、農作業を支援するシステム[5]が導入され始めている。

著者らは、農業用ロボットを開発するにあたり、大規模施設園芸場を有する響灘菜園(株)を見学した(図1参照)。響灘菜園は、農業先進国であるオランダ[6]のトマト栽培技術を導入しており、8.5haの敷地において年間約2500トンのトマト果実を出荷している。トマトは主要な果菜類の一種であり、多くがハウス等の施設で栽培されているが、高温・高湿度な作業環境と長い収穫期間があるため、労働負担は大きく省力化が望まれている。また、オランダではトマト栽培に様々な技術を導入し、日本より遥かに高い生産性を実現している。

トマト収穫ロボットの開発には、移動技術、マニピュレーション技術、エンドエフェクタ、画像処理、等の様々な技術が必要となる。トマト収穫用のロボットに関する研究事例として、川村らは移動台車に5自由度マニピュレータを搭載したトマト収穫ロボットを開発している[7]。指令した位置に対し十分な精度で対象物を把持できることを示し、トマトの認識にはカメラからの輝度信号と赤色信号をもとに、ステレオ視によるトマト果実の3次元位置推定に成功している[8]。照明環境の変化による認識率の低下、茎の認識の困難さを指摘している。次の段階として、トマト収穫の高速化が望まれ、そのためのフィードフォワード制御の研究が進められている。近藤らはトマト房のモデルを導入

するためトマト房の固有振動数を実験的に調査し、マニピュレータの軌道計画に導入している[9]。トマトを収穫するための収穫機構（エンドエフェクタ）も重要な研究課題の一つであり、茎から切り取る方式、折り取る方式、吸引方式等が提案されている[10]。リアルタイムでの画像処理技術に関しては、太田らによる把持しやすい方向の推定や、日照条件が変化する環境でのトマト果実の把持実験が進められている[11][12]。関係者らとの議論において、前述の農業用ロボットの開発事例を参考に、ロボット研究者らを農業分野に興味を持ってもらうという観点から、トマトロボット競技会実行委員会を組織し、トマト果実を収穫する作業を題材とした競技会を開催することとした。

ロボット開発において重要な設計条件の一つがロボットの動作環境の設定である。実際の圃場には様々な環境が存在しており、屋外の不整地からインフラが整備されている大規模施設園芸場まで様々である。大規模でインフラ環境が整備されているトマト菜園を有する響灘菜園(株)(北九州市若松区)の協力のもと、トマトロボット競技会ではインフラがある程度整備されトマト植物体が一列に整列して栽培されている環境を想定することとした。

トマト採取を始めとしたトマト収穫の自動化、及び実用化を目的とし、トマトロボット競技会を通じて農業用ロボットの発展、自然環境への興味とロボット技術の興味を合わせ農業用ロボット研究の裾野を広げることを目指している。



図1 響灘菜園(株)の作業環境

2. トマト果実収穫作業の調査

2.1 大規模施設園芸場

図1に示した大規模施設園芸場では、コンクリートの床

面の上に通路を挟んで両側に養液栽培されているトマト植物体が一直線に並べられている。通路には一対のレール(パイプ)が配置されており、レールの上を走行可能な移動台車を用いて作業員がトマト果実の収穫作業を行う(図1右)。集中管理された計算機により、温度に応じて天井が開閉できるようにになっている。

作業の効率化、低コスト化に向けた議論において、競技会の課題候補として(a)受粉作業、(b)収穫作業、(c)収穫したトマトの輸送、等があがった。(a)は現状でハチを用いており、その購入のためコストがかかるため自動化が望まれている。課題としては“黄色い花を見つけ振動させる”ことであり、ロボットの作業として適していると考えられるが、競技の判定は何個の実を結んだかどうか、となりその場での結果判定ができないため、今後の検討とした。(c)の課題も重要であるが、輸送はトマト栽培に固有の課題ではないことから、(b)のトマト果実の収穫を競技課題とすることとした。

2.2 収穫に関する調査

トマト果実収穫作業ロボットを開発するための基本情報を得るため、収穫作業を行っている作業員21名に対してアンケート調査を行った。

(1) トマト果実収穫作業に関する聞き取り調査

トマト房の上部に位置するトマト果実から赤くなり、ヘタを残したまま適度な長さの果梗を残して切断する必要がある。収穫するトマト果実の見本は、その日の始業時に決まる。響灘菜園の収穫作業に同行し、収穫作業の観察を行いつつ収穫作業におけるコツやどのように収穫作業を行っているのか調査した。

a. 収穫のコツ

- ・ 房の上方から収穫を行う。
- ・ 鉋で切りやすい果梗から切断する。
- ・ 利き手側から収穫する。
- ・ トマト房全体を把持する。
- ・ 切りにくい果梗は手元で2度切りする。
- ・ トマト房を自分の目の前まで持ってくる。
- ・ ヘタが作業員の正面にくるようにトマト房を回転。
- ・ 果梗が切断し易い向きにトマト房を回転させる。
- ・ 進行方向の次に収穫するトマト房を確認する。

b. 収穫の際に気を付けていること

- ・ 色が薄いものを収穫しない。
- ・ 色むらに注意する。
- ・ 果実が落ちないようにトマト房を握る。
- ・ ヘタを傷つけない。
- ・ 果実を傷つけない。
- ・ 誘引の糸を切らない

c. 収穫作業で不便に感じる点

- ・ 葉がある場合は邪魔である。
- ・ 収穫した果実の箱が重い。
- ・ 足元の茎が移動の時に邪魔である。

- ・ トマト房が様々な方向を向いている。
- ・ 色むらがある時の判断が難しい。

(2) 収穫順序調査

次に、図2に示すトマト房の写真において、トマト果実に番号を付け、作業員の収穫順番について調査した。①が最も上方にある果実で番号が増える毎に下方の果実とした。収穫作業を行う順序は大きく分けて、トマト房の上方から収穫を行う場合と、手前にあるトマトから収穫する場合の2通りの収穫順序が存在した。収穫作業者が最初に収穫を行う果実で最も多い意見が、トマト房の上方の果実であった。理由は、果実がトマト房の上方から赤くなっていくため、トマト房の上方の果実がより赤いことが多いことと、大きさも大きくなりやすいことが挙げられた。他の意見として、一番手前にある果実から収穫を行うという意見も21名中5名と多かった。理由は、一番手前にある果実の果梗は、鉋を入れやすいことであった。

収穫しやすいトマト房の向きの調査も行った。果梗が手前に見えやすいものが一番収穫しやすいと感じ、房の角度を回転させて果梗が見えにくくなるにつれて収穫しにくくなるという意見が多かった。



(a) トマト房1 (b) トマト房2

図2 収穫順序の調査のための写真

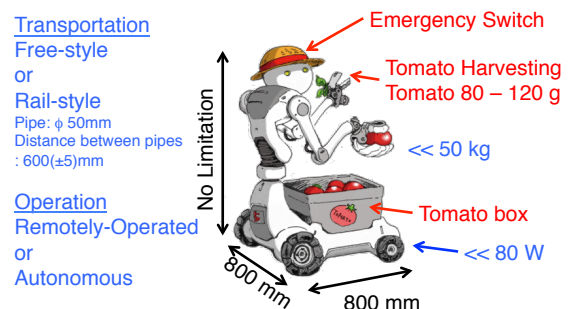


図3 トマト果実収穫ロボットへの要求仕様

3. トマトロボット競技会

3.1 トマト果実収穫ロボットへの要求仕様

基本仕様として、ロボットのアーム等を折りたたんだ状態におけるロボットの水平投影面積が幅 800mm×800mm 以内(高さ制限無し)(図3)、緊急停止ボタンをわかりやすい位置に設置することとした。また、収穫したトマト果

実を蓄えるコンテナをロボット内に搭載する必要がある。推薦仕様として、重量は 50kg 以内、産業用ロボットの規格を参考に駆動部のモータ 1 個当たりの出力は 80W 以下とした。ロボットの移動方式は、予め設置されたレールを使用するレールスタイルとレールを使用せず移動するフリースタイルの 2 種類とする。レールはφ 50mm のパイプで、レールの中心間距離は 600mm とした。ロボットの移動速度については特に制限を設けていない。収穫用のトマト果実は 1 個 60g～120g 程度（中玉）とする。トマト果実の高さは 800mm～1200mm に設定する。

ロボットは自動化の程度や動作環境により T1 から T6 の 6 つのカテゴリーに分類した。レール上で動作し、オペレータが直接トマト果実を確認しながら遠隔操作する T1 の 1 果実あたりの得点は 2 点、一方、レールを使用せず自律移動と収穫する T6 の得点は 3 2 点、1 6 倍とした。トマト果実に傷をつけた場合は半分の得点とした。得点についての議論は参考論文[13]を参照されたい。

表 1 トマト収穫ロボットのカテゴリーと得点

Robot Control	Remotely Operated(x1)				Autonomous (x8)	
	Direct Observation of Tomato (x1)		Indirect Observation of Tomato (x2)		Start and Stop commands	
Operator Manipulation	Mode of Locomotion		Mode of Locomotion		Mode of Locomotion	
	Rail-style (x1)	Free-style (x2)	Rail-style (x1)	Free-style (x2)	Rail-style (x1)	Free-style (x2)
One Tomato Points	2	4	4	8	16	32
Category	T1	T2	T3	T4	T5	T6

3.2 競技の流れ

競技は 3 ステージに分けて行う。各ステージでは、1 回の競技時間を 10 分間、ロボットは必ず指定された初期位置からスタートし、トマトの前まで移動して適切なトマトを収穫する。トマトが収納コンテナに入った時点で収穫とし、トマト果実は 1 個ずつ採るものとした。

第 1 ステージではトマトを 1 個収穫する（図 4(a)）。トマトは糸で吊り下げられており、これをロボットが収穫する。ここでは、ロボットの移動、マニピュレータの動作、画像処理、等の基本性能の確認を行う。

第 2 ステージでは房付きトマトからトマト果実を収穫する。図 4(b)のように実物の房付きトマトが吊り下げられており、ロボットはトマトを 1 個ずつ収穫する。

最終ステージでは、株植えのトマト植物体からトマト果実を収穫する。図 4(c)のように実際に育てられているトマト株が並んでおり、収穫可能なトマトを採取する。

4. 競技会の結果、及び競技規則の変遷

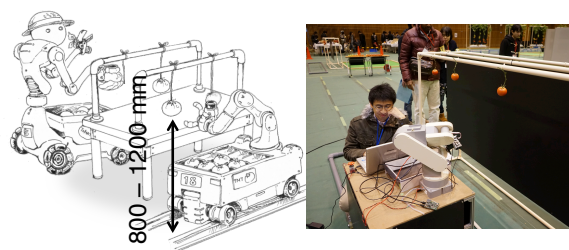
スマート農業の実現とロボットの社会実装に向け、競技規則を変更している。競技規則の変更点を表 2 にまとめている。2014 年に第 1 回大会を開催し、9 チームの参加があった。優勝チームは東京大学の JSK（8 号機）（図 5 参照）であり、カテゴリーは T-6、遠隔地からオペレータの操作による収穫ロボットであり、10 分間に 6 個のトマト果実を収穫した。自律型のロボットは 2 台参加したが、収穫でき

ず予選で敗退した。矢口らはこれらの技術内容を参考論文[14]に報告している。第 2 回大会から中高校生を対象に、LEGO Mindstorms を用いてミニトマトを対象としたロボットを製作するジュニア部門を設立した。第 5 回大会からは、画像処理の簡易化のためにトマト植物体の奥に設置していた黒ボードを取り除き、背景色への対応も必要とした。2020 年に開催した第 7 回大会は、屋外のビニールハウスで実施し、太陽光への対応も課題とした。

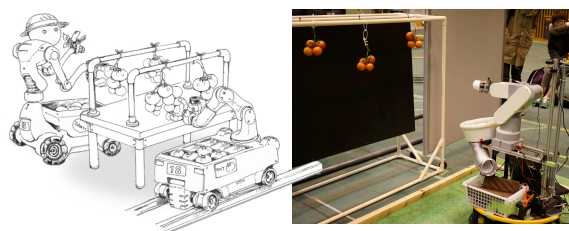
表 3 にこれまでの優勝チームを示す。第 2 回大会で優勝したチーム HAYASHI-LAB（図 6）は、10 分間に傷なし果実 2 個と傷あり果実 4 個の計 6 個を収穫し、約 100 秒/個の収穫能力を見せた。第 6 回大会の優勝チーム Hibikino-Tom's は第 2 ステージにおいて、13 個、1 個あたり 45 秒での収穫（図 7）に成功した。その技術内容については、参考論文[15][16]を参照されたい。第 7 回大会優勝の H&M Lab（図 8）は、19 個、30 秒/個の速さで収穫しており、年々ロボットの性能が向上している。

5. まとめと今後の展望

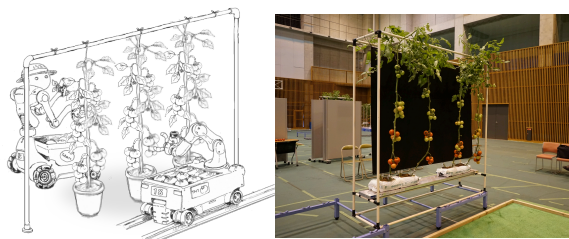
農業用ロボットの開発と農業分野へのロボット導入、スマート農業への貢献を目指し、2014 年よりトマトロボット競技会を毎年開催している。トマトを優しく大切に扱う、実際の動作環境に近づける、等を考慮して競技規則を変更



(a) 第 1 ステージ：単体のトマト果実を収穫



(b) 第 2 ステージ：トマト房から果実を収穫



(c)最終ステージ：トマト植物体から果実を収穫

図 4 トマトロボット競技会の流れ

し徐々に難易度を上げて開催している。人による収穫は、1個あたり約5秒、ロボットより5倍以上速いが、ロボットによる収穫性能も年々向上しており、更なる収穫能力の向上が期待される。今後は、エンドエフェクタの高速化、複数同時収穫できるエンドエフェクタの開発、全体の動作の最適化、夜間における運用等の更なる発展が望まれる。

謝辞

本稿で紹介したトマトロボット競技会は、北九州市、北九州産業学術推進機構、響灘菜園株式会社、株式会社安川電機、株式会社アフレルをはじめ、多くの機関の支援により実施している。ここに謝意を表す。

表2 競技規則の変更点

N-th	Year	Rule & Changes
1	2014	Senior League started with 6 categories from T1 (manual operation) to T6 (autonomous) and 2 kinds of working fields (rail and artificial grass) in indoor field (Gymnasium). The black boards are set behind tomato plants.
2	2015	Senior: No rule change. Junior: Junior League started. Lego mindstorm is used for basic platform.
3	2016	Senior: Bump is placed in the center of grass field. Junior: No rule change.
4	2017	No rule change.
5	2018	Senior: Slope is placed instead of Bump in the grass field. The black boards are removed. In scoring, success rate is added. Junior: Original arm made of stationery is allowed. Tomato box removed.
6	2019	No rule change.
7	2020	Senior: Video evaluation instead of 1st and 2nd rounds. The competition field is changed to the outdoor experimental greenhouse. The grass field is changed to the soil field. Junior: Online competition in each school.

表3 トマトロボット競技会の優勝校

N-th	Year	Senior Teams	Junior Teams	Winner	2nd Place
1	2014	9	-	Inaba-Okada Lab., Univ. of Tokyo	National Institute of Technology, Kitakyushu College
2	2015	14	16	Hayashi Lab., Kyutech	Team SS
3	2016	12	23	Kyushu Polytech	NAIST
4	2017	12	18	Hayashi Lab., Kyutech	Ishii Lab., Kyutech
5	2018	9	23	Hayashi Lab., Kyutech	Kyushu Polytech
6	2019	9	25	Ishii Lab., Kyutech	NAIST
7	2020	8	13	National Institute of Technology, Kitakyushu College	Hayashi Lab., Kyutech



図5 第1回大会優勝チーム JSK team (東京大学)。

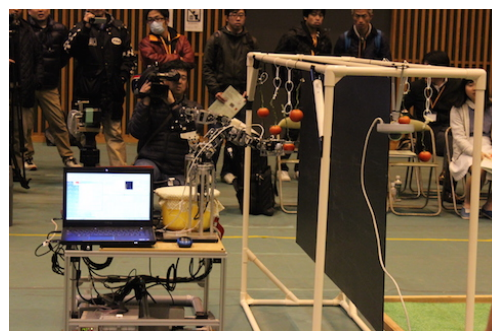


図6 第2回大会優勝チーム HAYASHI-Lab (九州工業大学)。自律型の収穫ロボットが優勝。



図7 第6回大会優勝チーム Hibikino-Tom's (九州工業大学)。トマト果実を吸引し切断する機構を装備。



図8 第7回大会優勝チーム H&M Lab. 屋外の農業用IoT実習用ハウスにおいて実施。

参考文献

- [1] 農林水産省統計情報 <http://www.maff.go.jp/j/tokei/index.html> (2021/8/26)
- [2] 農林水産省：スマート農業の実現に向けた研究会 https://www.maff.go.jp/j/kanbo/smart/g_smart_nougyo/index.html (2021/8/26)。
- [3] N. Noguchi: "Agricultural Vehicle Robot," J. Robot. Mechatron., Vol. 30, No. 2, pp. 165-172, 2018.
- [4] inaho 株式会社, <https://inaho.co/> (2021/8/26)。
- [5] ウォーターセル株式会社: アグリノート, <https://www.agri-note.jp/> (2021/8/26)。
- [6] 農林水産省海外農業情報: "オランダの農林水産業概況", (2021/8/26)
- [7] 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信: "農業用ロボットの研究 (第1報 マイコン制御による果実収穫用マニピュレータ)", 農業機械学会誌, 46 (3), pp. 353-358, 1984.
- [8] 川村登, 並河清, 藤浦建史, 浦元信: "農業用ロボットの研究 (第2報 固体カラーテレビカメラによる果実の位置検出及び収穫基礎実験)", 農業機械学会誌, 47 (2), pp. 177-1

82, 1985.

- [9] Kondo, N., Yamamoto, K., Shimizu, H., Yata, K., Kurita, M., Shiigi, T., Monta, M., Nishizu, M. (2009a): "A Machine Vision System for Tomato Cluster Harvesting Robot," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 2(2), 60-64, 2009.
- [10] Kondo, N., Yata, K., Iida, M., , Shiiji, T., Monta, M., Kurita, M., Omori, H.: "Development of an End-Effector for a Tomato Cluster Harvesting Robot," *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 3(1), pp. 20-24, 2010.
- [11] 太田智彦, 山下貴史, 林茂彦, 米田隆志: "鏡面反射利用の視覚システムを持つトマト収穫ロボットの開発 (第1報) 画像処理によるハンドの接近方向の選択," 農業機械学会誌, 72(6), pp. 587-594, 2010.
- [12] 太田智彦, 山下貴史, 林茂彦, 米田隆志: "鏡面反射利用の視覚システムを持つトマト収穫ロボットの開発 (第2報) 動画処理による走行制御システムとハウス内収穫実験," 農業機械学会誌, 72(6), pp. 595-603, 2010.
- [13] Takayuki Matsuo, Takashi Sonoda, Yasunori Takemura, Masanori Sato, Kazuo Ishii, "Toward Smart Tomato Greenhouse: The Fourth Tomato Harvesting Robot Competition," *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, Volume 6, Issue 2, pp.138 - 142, 2019
- [14] H. Yaguchi, K. Nagahama, T. Hasegawa and M. Inaba: "Development of An Autonomous Tomato Harvesting Robot with Rotational Plucking Gripper," 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 652-657, 2016.
- [15] T. Fujinaga, S. Yasukawa, B. Li, K. Ishii: "Image mosaicing using multi-modal images for generation of tomato growth state map", *J. of Robotics and Mechatronics*, 30(2), pp. 187 - 197, 2018.
- [16] T. Fujinaga, S. Yasukawa, K. Ishii: "Tomato Growth State Map for the Automation of Monitoring and Harvesting," *J. of Robotics and Mechatronics*, 32(6), pp. 1279-1291, 2020.



石井和男 (Kazuo Ishii)

1996 年東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程修了。同年九州工業大学情報工学部講師, 同助教授を経て, 現在九州工業大学大学院生命体工学研究科教授。博士(工学)。フィールドロボットに関する研究に従事。日本機械学会, 日本船舶海洋工学会, SICE, IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)



松尾貴之 (Takayuki Matsuo)

2009 年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年九州工業大学研究員, 北九州工業高等専門学校制御情報工学科助教を経て, 現在同校生産デザイン工学科准教。神経振動子や生体模倣型ロボットの研究に従事。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



武村泰範 (Yasunori Takemura)

2010 年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士課程修了。博士(工学)。同年日本文理大学工学部助教, 准教授を経て現在西日本工業大学工学部准教授。ロボカップサッカーロボットやニューラルネットワーク, スポーツのチーム分析の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)



園田隆 (Takashi Sonoda)

2009 年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士後期課程単位取得退学, 2010 年 博士(工学)取得。ふくおかIST研究員, 九州工業大学研究員, 同生命体工学研究科特任准教授を経て, 現在西日本工業大学工学部准教授。パラレルリンク機構, 筋拮抗型関節等の研究に従事。日本機械学会等の会員。

(日本ロボット学会正会員)



川尻一志 (Kazushi Kawajiri)

1996 年岡山大学大学院農学研究科修士課程修了。同年株式会社村上農園入社, 2005 年響灘菜園株式会社入社、現在に至る。修士(農学)。トマト生産コストの管理と統合型環境制御装置を用いたトマトの生育管理に関する研究開発に従事。



西田祐也 (Yuya Nishida)

2011 年九州工業大学大学院生命体工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)。九州工業大学研究員, 東京大学生産技術研究所研究員, 同特任助教, 九州工業大学大学院生命体工学研究科助教を経て, 現在, 同准教授。生物模倣型関節機構, 自律型水中ロボットの開発等の研究に従事。日本機械学会, 日本水産学会, IEEE 等の会員。

(日本ロボット学会正会員)