協働ロボットの人型デザインと安全のための 表示器に関する試作研究

塩谷 昌行* 石川 真也*

A Prototype Research on Humanoid Design and Safety Indicator of Collaborative Robot

Masayuki Shiotani* and Shinya Ishikawa*

In this study, we have developed a prototype of a status indicator (light) suitable for “Foodly,” which is a collaborative robot that works alongside people in the process of serving lunches in a food factory. In order for the robot to work with people, it must have a non-fearful, non-intimidating appearance and a display that can provide safety and operational information appropriately. We built several prototypes and compared their appearance. We determined if the information provided could be properly understood. We classified the safety information into four categories, which can be easily recognized by users from safety and operational perspectives.

Key Words: Collaborative Robot, Safety Indicator, Humanoid Robot, User Experience, Food Technology

1. 緒 言

現在、食品業界では深刻な人手不足により、機械化が進められている [1]。筆者らは 2019 年に食品工場向け協働ロボット「Foodly」を発表し、その開発を続けている (Fig. 1) [2]。Foodly はばら積みされた不定形な弁当のおかずを頭部のカメラで識別し、アーム・ハンド部がその一つを取り出して弁当箱に盛り付けることができ、Fig. 2 のように弁当の盛り付け工程で人と並んで作業を行う。開発段階の Foodly を食品工場の従業員に見せてヒアリングしたところ、ロボットの状態が把握できるようなランプやブザーが欲しいという要望があった。

本稿では、Foodly を対象として食品工場で動作する協働ロボットとして求められる機能とデザイン性とを両立した、視覚シグナルを用いる表示器の試作研究について述べる。

2. 食品工場における協働ロボットの表示器の課題

2.1 産業用ロボットにおける表示器の役割

産業用ロボットではロボットの動作状態を周囲の作業者が分かるように積層信号灯をはじめとする表示器を取り付けているものがある。これは、産業用ロボットの安全要求事項をまとめた JIS B 8433-1:2015 [3] ではロボットの設計にあたり状態表示機能の搭載を要求していることに基づいている。また、機能安全活用テキスト [4] ではリスクアセスメントの結果、提示すべき使用上の情報として機械の状態変化や異常状態を知らせたり、機械を正しく使用するために必要な情報を使用者に提示したりする際に、表示灯の使用が例として挙げられている。

産業用ロボットでは積層表示灯によってロボットの状態を示

Fig. 1 Names of parts of Foodly

Fig. 2 Foodly in action on a bento-serving line

しているものや、Fig. 3 (a) のようにアーム上に状態表示用のランプを配しているものもある。また、協調運転が可能なロボットの場合、協調運転中であるか否かを表示器によって示す必要がある。

人型に近い協働ロボットにおいては、Fig. 3 (b) のようにメーカー独自の形状や位置に表示器を取り付けているものがある。

また、これらの表示器はその役割上目立つように配置されている。

原稿受付 2020 年 8 月 5 日

* (株) アールティ

* RT Corporation

■ 本論文は有用性 (システム設計・構築分野) で評価されました。

2.2 食品機械としての要求事項

JIS B 9650-2:2011 [5] では、非食品接触部の形状、構造について、洗浄や清掃、検査、修理・点検および保守が容易であることが求められている。

また、弁当盛り付けラインにおいて、ベルトコンベアや番重、弁当箱などの食品のある領域の真上にロボットを設置、あるいはロボットの部位が通過することは、部品が落下して異物混入の原因となったり、食材が飛散、付着して正常に動作しない恐れがあるため避けることが望ましい。

2.3 弁当盛り付けラインにおける協働ロボットの表示器

Fig. 2 のように人と並んで作業する協働ロボットの場合、次のような課題があると考えられる。

2.3.1 表示の見やすさ

表示器は見やすい場所に位置し、表示を伝えるべき人間が容易に視認できることが求められる。JIS B 9706-1:2009 [6] では、自然な視線の中央線から上下 30 [deg] の範囲に位置することを推奨している。

また、ロボットの可動部に取り付ける場合、ロボット自身の動きによって表示に注目しづらくなることが考えられるため、なるべく動きの少ない部分に配置する必要がある。

2.3.2 表示内容の明快さ

弁当盛り付けラインでは他の工場とは異なり、ロボットの取扱について熟知した専門家が作業できるとは限らない。また、ロボットは多くのセンサやアクチュエータを備え、様々な機能を搭載しているため、提供する情報やエラー内容は多岐にわたる。

表示器でこれらを表示すると多くの表示パターンが必要となり、作業者の理解と対応が難しくなる。また、JIS C 0448:1997 [7] では使用する色数を最小にすることが推奨されている。

このため、提供したい情報を整理、単純化する必要がある。

2.3.3 人との距離の近さ

Fig. 2 のように人と隣り合う距離で動作するため、省スペースであることが求められる。また、周囲の人間が引っかけたり接触しやすくなるため、突起や張り出しが少ないことが求められる。

3. 弁当盛り付けラインにおける協働ロボットの表示器の検討

3.1 搭載位置の検討

表示器の搭載位置を検討するにあたり、2.3.1 項で挙げた課題に加えて、Foodly ならではの制約を考慮する必要があり、その結果頭部に搭載することとなった。検討した搭載位置と制約を以下に述べる。

3.1.1 台車に搭載する場合

Foodly は上半身を左右 90 [deg] ずつ回転でき、機体の正面だけでなく左右に配置された番重からも食品をピッキングできる。

Fig. 3 Example of a robot indicator

したがって台車の操作盤付近に表示器を搭載した場合、Foodly の腕に表示器が干渉し、動作を阻害してしまうことが考えられた。

3.1.2 肩部、背中部に搭載する場合

Foodly は食品の飛び跳ねや偶発的な接触などにより筐体が汚れることを防ぐため、作業着を着せて動作させることが想定されている。肩部や背中部に表示器を搭載した場合、作業着により覆われてしまい、視認性が低下することが考えられた。

3.1.3 頭部に搭載する場合

Foodly の全高はおよそ 1.5 [m] であるため、頭部は 2.3.1 項で挙げた設置位置の要求を満たしている。また、Foodly の頭部は停止時に正面、動作時に食品のある下方を向くがそれ以外に動くことは少なく、視認性への影響は少ないと考えられた。ただし、頭頂部に設置した場合、動作中の Foodly を背後から見る際に表示器が隠れてしまうため、避けたほうが良いと考えられた。

これらのことから、表示器は頭頂部を除く頭部に搭載することとなった。

3.2 外見の検討

3.2.1 方式 1：頭部全体を光らせる

まず、頭部全体を表示器として光らせ、見え方や受ける印象などを評価した。Foodly の外装は光を透過するため、頭部内部にフルカラー LED を取り付け光らせた。

頭部全体を光らせた場合、Foodly に感情があるような印象を与えてしまうという知見が得られた。これにより本来伝えたい内容とは違う意味に捉えられてしまう恐れがあることが分かった (Fig. 4)。例えば停止が必要な危険な状態を知らせるつもりで赤く発光させても、ユーザにとっては「Foodly が怒っている」という誤った情報になってしまう恐れがあった。

また、Fig. 4 (b) のように発光部の縁を濃色パーツとすることでコントラストが生じ、視認性の向上に寄与することが分かった。

このほか、点滅させると目立たせることはできるが、隣に立って作業する作業者の視界の端にチラチラと映り込むため、作業の妨げとなる恐れがあることが確認できた。点滅表示は周囲の作業者にアピールすることには有効だが、通常動作などの表示時間が長いものには向いていないことが分かった。

3.2.2 方式 2：頭部の特定箇所を光らせる

頭部全体を光らせることは好ましくないことが分かったため、表示部を頭部に組み込むようなデザインとし、頭部の特定の部分のみを光らせることとした。

Foodly のイメージに沿った外見となるよう、Fig. 5 に示す 4 種類のデザインを作成し、そのうち 2 種類を実際に試作・評価した (Fig. 6)。

視認性の評価として、食品工場の照度 (900 [lx] 程度) で実験を行った。まず光る様子が視認可能か、点灯状態と消灯状態の区別が付きやすいかを評価し、次に LED の色や発光パターン

Fig. 4 Shining the indicator

Fig. 5 Design proposals examined

Fig. 6 Prototype design proposal

(b) Indicator from other angles (side/behind/behind in operation)

Fig. 7 Selected design proposal

(点灯, 点滅)を変えたときに, その違いが分かりやすいかどうか検証した。

次にデザイナーを交えて外見のレビューを実施した。レビューでは動作モード(動作時, 停止時)について各方向からの見やすさや, 見た目から受ける印象などの観点からデザインの妥当性を議論した。

レビューの結果, Fig. 6(a)のA案を採用した。A案は表示器部分を直線的なデザインとし, 顔と表示器の区別が付きやすく, Foodlyの曲線的なデザインとの対比から表示器の存在感を高める狙いがある。また, 表示器部分を張り出すことで, 頭部が下を向いたときや正面からみたときの視認性を確保し, 周囲に濃い色を配することでコントラストをつけ視認性を高めている(Fig. 7)。

3.3 表示内容の検討

次に, 2.3.2項で挙げたように, 表示内容を明快にするため提供したい情報を整理, 単純化した。

Table 1 Intended users and classification

All workers involved			
Workers in the factory			Engineer
Staffs on the line		Others	
Worker	Manager		
Working next to Foodly	Operation leader	Passerby	Foodly's maintainer
Refilling food trays		Other workers	
Operating Foodly	QA manager	Visitor from outside the factory	
Cleaning Foodly's work clothes			

Table 2 Provided message and its subject (partial)

Message	Subject
Carrying in	Workers in the factory
Configuring for operation	Operating Foodly
Started operation	Workers in the factory
Currently operation	Operating Foodly
Tongs' usage time-limit expired	Operating Foodly
Collided with other workers	Worker
Have fallen down	Staffs on the line
Posture is tilted	Worker
Hands got stuck	Worker
Running low on battery	Worker
Running low on target foods	Worker

3.3.1 周辺環境とユースケースの洗い出し

実際の弁当盛り付けラインを想定し, 設置から片付けまでの各動作段階においてどのような情報を提供すべきか, 誰に伝えるべきかを洗い出した。

運用に関する情報については, 通常運用時におけるシナリオを「電源投入」「運搬・設置」「盛り付け設定」「盛り付け動作」「盛り付け終了」「片付け・撤収」の六つのフェーズに分類し, 作業フェーズごとに Foodly の動作や周辺状況を列挙することで, ユースケースを整理した。これにより, 「何を」「いつ」「誰」に伝えるかを明らかにした。想定した作業者と分類を Table 1 に示す。

3.3.2 リスクアセスメントによる表示内容の洗い出し

安全に関する情報については, 前記のユースケースにおいて予見可能な誤使用を連想することで危険事象を洗い出し, それに対応する危害の対象者に対して何を伝えるべきかを抽出した。

Foodly はモータの出力を低く抑え, 周囲の作業者と接触すると即時に動きを止める, あるいは受け流すことができるため, 運転中の作業者の接近や接触によるリスクは許容できるものとしている。しかし, 表示器によって動作開始時など周囲の作業者に注意を促すことで更なるリスク低減を図ることができる。例えば, Foodly が動き出す前に表示器を点灯させ, 周囲の作業者に知らせることで Foodly に触れない, 過度に近づかないといった行動につなげることができる。

3.3.1 項で洗い出された情報と合わせて 66 個の提供情報を抽出した。Table 2 に抽出した提供情報とその対象者の一部を示す。

3.4 表示色・発光パターンの検討

3.4.1 表示色の検討

JIS B 9706-1:2009 [6] では表示灯を用いて伝える情報や色の選択方法などをまとめている。

当該 JIS は表示灯に用いられる色を Table 3 のようにコード化し, 点灯する色の意味を定めている。また, 特に情報を強調したい場合は点滅表示を推奨している。これに従って実装を試みた。

3.4.2 提供情報の分類分け

前項で洗い出された 66 個の提供情報について, 「どのように」

Table 3 Basic principles of color coding

Color	Meanings		
	Safety around the robot	Machine/ process status	Equipment status
Red	Danger/Not allowed	Emergency	Fault
Orange/Yellow	Warning/Attention	Defect	Defect
Green	Safe	Normal	Normal
Blue	Obligation/Compulsion		
White, Gray, Black	No special meaning		

Table 4 Classification of the provided messages

		Operation	
		Normal	Exception
Safety risk	Low	(1) Normal Situation : Normal operation Action : None	(2) Need action Situation : Tongs' time-limit expired, Target foods running low, etc. Action : Confirm the necessary action through the user interface
	High	(3) Need attention Situation : Starting operation, Collision occurred, etc. Action : Stay away from Foodly	(4) Emergency Situation : Fatal error, Falling down, etc. Action : Stop Foodly immediately

伝えるべきかを検討した。

提供情報をライン関係者が適切に理解し対応するためには2.3.2項で述べたとおり、表示パターンを絞る必要がある。また、表示器を搭載できるスペースは限られているため、前章の「運用に関する情報」と「安全に関する情報」を一つの表示器にまとめて表示させる必要があった。

これらのことから、提供する情報を **Table 4** のように「運用上正常か異常か」、「リスクの低いものか高いものか」で分類した。分類された表示内容ごとに表示パターンの意味をそれぞれ(1) 通常時、(2) 情報提供時、(3) 注意喚起時、(4) 非常時と割り当てた。また、(2) では具体的な情報内容を操作画面に表示させることとした。

これにより、表示を受け周囲の作業者の取るべき行動を(1)は「特になし」、(2)は「操作画面で提供情報の内容を確認し対応」、(3)は「ロボットに近づかない」、(4)は「速やかに停止させる」の四つに絞ることができ、作業者の負担軽減が望める。

3.4.3 発光パターンの割り当て

Table 3 の色コードに従い、前項での分類ごとに発光パターンを次のように割り当てた。

- (1) 通常時：緑点灯、白点灯
- (2) 情報提供時：黄色点滅
- (3) 注意喚起時：緑点滅
- (4) 非常時：赤点滅

Table 3 においての(2)の情報提供時はプロセスの状態が異常なことから黄色を、(3)の注意喚起時はリスクは許容できるものとして緑色を選択している。(2)、(3)、(4)は情報を強調し、注目を集めるため点滅とした。また、(1)の通常時は動作中は緑点灯、待機中は白点灯とした。

Table 5 に提供情報ごとに分類分けし表示内容を割り当てたものの一部を示す。

このほか、ラインに並ぶほかの作業者など Foodly を注視できない作業者に対してはピープ音による情報提供を併用することとした。

4. 試作結果とまとめ

食品工場における協働ロボットの表示器の課題を考慮し、協働ロボット Foodly に適した表示器とその表示内容を検討、試作した。**Fig. 8** に今回試作した表示器を点灯させた様子を示す。

Table 5 Display contents assigned to each provided message (partial)

Message	Subject	Category	LED color and pattern
Carrying in	Workers in the factory	(1)	Steady White
Configuring for operation	Operating Foodly	(1)	Steady White
Started operation	Workers in the factory	(3)	Flashing Green
Currently operation	Operating Foodly	(1)	Steady Green
Tongs' usage time-limit expired	Operating Foodly	(2)	Flashing Yellow
Collided with other workers	Worker	(3)	Flashing Green
Have fallen down	Staffs on the line	(4)	Flashing Red
Posture is tilted	Worker	(3)	Flashing Green
Hands got stuck	Worker	(3)	Flashing Green
Running low on battery	Worker	(3)	Flashing Green
Running low on target foods	Worker	(3)	Flashing Green

(a) Turned off (b) White light (c) Green light

(d) Yellow light (e) Red light

(f) State during operation

Fig. 8 Prototype indicator

後頭部にフルカラー LED を搭載し、表示色や表示パターンを変化させた。見やすさや見た目から受ける印象を考慮しつつ、表示器として提供する情報が適切に理解されるようなデザインを採用した。表示内容については運用面、安全面の両側面から抽出し分類わけすることで、表示パターンを単純化した。

今後、さらに開発を進め、食品工場での実証実験に臨みたいと考えている。

参考文献

- [1] 農林水産省：食品製造業における労働力不足克服ビジョン，<https://www.maff.go.jp/j/press/shokusan/seizo/attach/pdf/190711-2.pdf>, p.12, 2019.
- [2] 中川：「協働人型ロボット Foodly と衛生」，FOOMA 技術ジャーナル，vol.14, no.2, pp.11–15, 2020.
- [3] JIS B 8433-1：2015.
- [4] 中央労働災害防止協会：「機能安全活用テキスト」，<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkokuanzeniseibu/0000197858.pdf>, pp.42–43, 2018.
- [5] JIS B 9650-2：2011.
- [6] JIS B 9706-1：2009.
- [7] JIS C 0448：1997.