連結式容器交換ロボットの開発

関 淳 也^{*1} 青 山 元^{*1} 石 川 和 良^{*1}
 石 村 左 緒 里^{*1} 和田 迫 鉄 矢^{*1} 薩 見 雄 一^{*1}
 横 田 和 隆^{*2} 尾 崎 功 一^{*2} 山 本 純 雄^{*3}

Development of an Autonomous Robot System Towing the Medicine Container

Junya Seki^{*1}, Hajime Aoyama^{*1}, Kazuyoshi Ishikawa^{*1}, Saori Ishimura^{*1},
 Tetsuya Wadasako^{*1}, Yuichi Satsumi^{*1}, Kazutaka Yokota^{*2},
 Koichi Ozaki^{*2} and Sumio Yamamoto^{*3}

We have developed an autonomous robot carrying a heavy medicine container, to be used in the medicine factory. In this environment, its workspace is narrow and the robot has to negotiate between existing machines and instruments. It is also necessary for the robot to comply with strict GMP standards defined by Ministry of Health, Labour and Welfare, Japan for medicine production. The robot tows an empty container to the throw-in platform according to the instruction given by the process controller system via infrared communication. Once loaded, the container is again towed by the robot and stored at a designated position in the stowage area. The robot runs on magnetic rails autonomously and is able to tow a container weighing 200 [kg], or heavier, and precisely position the container at the specified location with less than 10 [mm] of error. The container is rigidly held by a specifically designed gripper on the robot during transportation to maintain precise motion and positioning of the container. Three robots have worked in a medicine factory for more than two years without causing a single interruption in the manufacturing process, achieving improved production efficiency, lowered production costs, with fewer workers attending the production line than before.

Key Words: Container Transportation, Robot, Medicine Factory, Connection Mechanism

1. は じ め に

医薬品業界は、日米 EU 医薬品規制調和国際会議 (ICH) による国際標準化が進む中で、より高い品質 (薬効, 安全性) への要求の増大や、新薬開発費用の上昇および薬価改定などに伴う利益減少によるコスト競争の激化といった厳しい環境下にある。さらに、日本の伝統と文化である漢方薬が医療用として認められ、国際展開が進んでおり、国際競争力の強化が必要になっている。

製薬会社における製造ラインでは、品質保証の観点より原料や製品の搬送をバッチ単位で行う考え方が多く、そのためにステンレス製の大型容器を用いた搬送が行われている。このよう

な重量物搬送作業は作業者の肉体的負担となっており、高齢化が進む中で作業環境の改善が課題となっている。国際競争力向上に最も重要なコスト競争に打ち勝つためには、製造ラインの無人化少人数化製造の実現、製造コストの低減を図る必要がある。また少人数化を進めることは、少子高齢化による将来的な労働力不足に対応することにもなる。

これまでに我々は、清掃ロボットによるビルの清掃システムおよび広域清掃システムを開発し、床面を自走しながら清掃するロボットを実用化している [1]~[3]。そこで、この清掃ロボットを応用し、医薬品製造ラインにおける容器台車を連結し牽引走行して搬送するロボットを開発し、医薬品製造ラインに導入することとした [4]~[6]。

本稿では、まず製薬ラインの容器交換作業について考察し、要求仕様を明確にする。そして、要求仕様を満たす実用的な容器交換ロボットの設計方針、機構、走行性能、安全性設計について述べる。

原稿受付 2007 年 12 月 14 日

^{*1}富士重工株式会社

^{*2}宇都宮大学大学院工学研究科

^{*3}宇都宮大学

^{*1}Fuji Heavy Industries Ltd.

^{*2}Graduate School of Engineering, Utsunomiya University

^{*3}Utsunomiya University

■ 本論文は有用性で評価されました。

2. ロボットによる容器交換作業

2.1 作業環境

製薬工場では、薬品そのものの製造、製造した薬品の専用容器への投入、出荷用の梱包といった工程がある。この中で薬品を容器に投入する工程は造粒工程とも呼ばれ、**Fig. 1** のような製造室で行われる。この工程では、空の容器を台車で製造室内の薬品投入台まで運び、薬品充填後に所定の場所へ容器を運ぶ作業が必要である。薬品容器および投入台の外観を **Fig. 2** に、容器台車の外観を **Fig. 3** に示す。投入台には、容器を投入口に確実に位置決めするために両側にガイドが備え付けられている。容器が設置されると、上部から規定量の薬品が投入される。台車車輪は4輪とも自在キャスタとなっているため、抵抗が少なくスムーズに方向転換できる。しかし、薬品を充填した容器および台車は重量物であり、その交換作業は **Fig. 4** のように人手によって行われ、作業効率上の大きな問題で、かつこのような単純作業に労働力を費やすことも望ましくない。そこで造粒工程における容器の交換作業を、自動化、省力化することが望まれる。

医薬品製造ラインに関しては、GMP (Good Manufacturing

E : Empty Container L : Loaded Container

Fig. 1 Medicine product line

Fig. 2 Medicine container at throw-in platform

Fig. 3 Cart

Fig. 4 Changing containers by hand

Practice) による規定があり、導入する搬送方式、搬送装置はこの規定を満たす必要がある。GMP とは、厚生労働省より公布された医薬品および医薬部外品の製造管理および品質管理規則であり、

- ・人間による間違いを最小限にする
- ・医薬品の汚染、品質低下を防ぐ
- ・高い品質を保つ仕組みをつくる

ことを目的としている [7]。現在では、GMP 体制が整っていることが製造業の許可を取得するための必要要件になっている。そのため空気の汚染を防ぐ設備、製造室内への立入制限などが定められており、高いクリーン度が要求されるため、製造室はコンパクトに作られることが多い。ただし、造粒工程の製造室に求められるクリーン度は、例えば半導体製造におけるクリーン・ルームよりは制約がゆるく、実際造粒の粉が空気中や床面には存在する。

室内の粉粒については、以下の点に対する配慮が必要である。

- ・環境内での装置、機器類からの、部品や塗装片などの異物の落下、容器への混入
- ・装置、機器類への粉粒の付着、残留
- ・装置、機器類に残留した粉粒による装置、機器自体の腐敗
- ・装置、機器類に残留した粉粒の他所への落下、飛散
- ・装置、機器類に残留した粉粒と、さらなる別の粉粒の付着、混合による化学反応の発生

また今日の医薬品の製造においては、同じ製造ライン上で多品種の薬品をバッチ単位で製造することが多く、ラインそのものの設備更新や変更はまれにしか行われないのが現状である。このことは自動搬送装置の導入による効率化、省力化を考える際に、既存製造設備側の大幅な整備や更新を求めることが難しいことを意味し、既存設備に極力変更を加えることなく、容器搬送装置の導入ができることが望ましい。

工場環境における搬送方法としては、AGV、コンベア方式、自動リフトなどや [7]~[14]、クレーン [15] がある。クリーン・ルームの無人化製造としては、半導体工場で AGV が使用されている事例があるが、製造室のスペース、設備レイアウトの変更などの大幅な環境整備が必要であり、医薬品製造現場への AGV 等の大型搬送機構を導入することは困難と言わざるをえない。ローラコンベアなどは、据付固定によるフロア常設になるため、柔軟性に欠け、人動線や物流動線が分断され、製造室内の清掃性が悪くなりクリーン度の低下を招く。またクレーンは効率性と柔軟性の面で比較的優れているが、搬送物体の把持や位置決め時、人による操作が必要となるため、完全自動化に適していない [14]。

したがって、既存の設備に大幅な変更を加えることなく容器の交換作業を自動化無人化するためには、小型で旋回半径が小さく、製造室内を自由に移動できる搬送ロボットの開発が有効であると考えられる。このような搬送ロボットを製造ラインの中にシステムとして組み込むことで、狭い製造エリアを有効活用でき、必要なクリーン度を維持した上で、作業負荷低減と作業効率の向上を実現できると考えられる。

2.2 要求仕様

本システムは、既存の医薬品製造室において、連結式容器搬

送ロボットが自動で医薬品の充填容器を交換するシステムである。製造ラインの無人化のためには、製造設備と連動してロボットが動作し、効率よく容器を搬送する必要がある。以下に本ロボットを医薬品製造ラインで稼動するために課せられた要求仕様を示す。

- (1) 既存の設備レイアウトを変更せずに、狭い製造室内を自律移動できること。
- (2) 従来の薬品容器を使用でき、移載のために追加の設備を要さないこと。薬品投入時に支障が出ない位置決め精度を持つこと。
- (3) 製薬工場の GMP に適合すること。
- (4) 無人化、少人数化製造を実現すること。高安定稼動であり、誤動作により製造ラインを停止させることがないこと。
- (5) 作業者との共存を考慮した安全性を確保すること。

3. 連結式容器交換ロボットの開発

3.1 技術的課題

前章までに述べた要求仕様に対する技術的課題を以下に示す。

- (1) 製造室内で他の機器と接触することなく移動できるよう、小型車体で旋回半径が小さいこと。
- (2) 重量物である薬品容器を、移載装置を必要とせずに簡便に移送できること。なお、8.1 節で述べる導入事例では、薬品充填時の容器重量は 200 [kg] である。
- (3) 薬品容器の設置精度 ± 10 [mm] 以内を実現すること。
- (4) GMP に適合し、製造室内の環境を汚染しないこと。
- (5) 既存設備と通信によって連動し、設備側の指示に従って決められた経路を自律走行して、人手を介することなく容器交換作業が行えること。
- (6) 機械的な故障、破損がなく、ノイズなどに耐性があること。
- (7) 作業者に衝突、接触することなく自律走行できること。ただし製造室は GMP の規定から、設備や壁面が鏡面仕上となっているため、これらの固定物を障害物と誤認識しないこと。

本ロボットシステムは、実環境における運用を目的としているため、コスト低減と信頼性、耐久性などの品質を考慮して、筆者らがすでに実用化に成功している清掃ロボットと、車体構造、足回りなどを共有化することとした。さらに上記課題の達成に適した、信頼性が高く低コストな既存技術は積極的に用いる。

3.2 外観および仕様

開発したロボットの外観を Fig. 5 に、仕様を Table 1 に示す。本ロボットは製薬ライン内で容器と連結し、自走しながら交換作業を行う。システムは、メイン・コントローラ、操作パネル・コントローラ、モータ・コントローラから構成される分散システムであり、各コントローラ間は、シリアル通信 (RS-232C) でつながれている。他の機器は、メイン・コントローラにパラレル I/O で接続されている。足回りは、左右 2 輪と後部キャスト 1 輪から成る 3 点接地で、左右 2 輪が駆動輪となっている。走行誘導センサとして前後に磁気ガイド・センサを搭載し、前進、後進が可能である。安全装置としてレーザ式の測域センサ、バンパセンサを搭載し、ユーザインターフェースとして 12.1 型のタッチパネルを搭載している。このタッチパネルは、対話式

Fig. 5 Appearance of the developed robot

Table 1 Specification

Length	646[mm]
Width	744[mm]
Height	1600[mm] (Laser range finder) 1268[mm] (Touch panel)
Weight	125[kg] (including counter weight) 170[kg] (with battery)
Velocity	5[m/min], 10[m/min], 2level
Drive	DC servo motor (100[W]) $\times$ 2
Battery	65[Ah] $\times$ 2
Working time	6[H]
Payload	400[kg] maximum

に操作できるようになっており、またロボットの状態も人の顔をイメージした表情と共に表示される。Fig. 6 にシステム図を示す。また Fig. 7 に各機器の配置と容器台車、ロボットが容器を運搬するときの全長を示す。ロボットは、この容器台車と連結した状態で、導入製造室内の通路を走行できるよう寸法が決められた。すなわちロボットの占める床面面積は作業者が容器台車を推して作業する際に人間が占める面積とほぼ同等であるようになっている。

3.3 車体および足回り

本ロボットは、医薬品を扱うラインで稼動するため、GMP にしたがって車体はすべてステンレス製となっており、表面はバフ # 400 仕上げの無塗装とし、カバーは粉粒が堆積・残留しないよう、Fig. 8 のように車体各部に鋭利な部分がない丸みを持たせた形状とした。さらに粉粒が付着したとしてもロボット内部に入り込まないように、隙間は線溶接で埋められている。

製造室の床面は、摩擦の小さいエポキシ樹脂性の塗料が塗布されており、さらに非常に微細な医薬品の粉塵が発生して床面に付着する場合があります。走行中の駆動輪に滑りが生じる危険性がある。そこでタイヤ幅を狭くし、タイヤゴムの硬度を下げることで、グリップの向上を図り、滑りの発生を防ぐこととした。またメンテナンス性の向上および製造室内へのボルト脱落防止のため、ボルト本数を極力減らし、かつ使用する場合にはフランジ・ボルトを採用している。さらに、車体フレーム、足回り、制御装置、駆動モータ、センサ、ハーネス、その他機装部品などは、実用化済の清掃ロボットと共有化し、開発コスト、製造コストを抑え、信頼性や耐久性などの品質を確保した [6]。

3.4 連結機構

容器の移送方式としては、パレット方式やトレー方式などが考えられる。パレット方式は容器の移載装置が必要となり、設

Fig. 6 System

Fig. 7 Configuration

備の追加を要するため適当ではない。またトレーラ方式の連結では、方向転換時にジャックナイフ現象などが生じるため、切り換えのような複雑な制御とスペースが必要となるため、作業環境が限られている製薬ラインには適さない。そこでロボットと容器をストップで2点固定し、一つの剛体として一体化して、連結中は常に同じ位置関係を保つ連結方式を用いることとした。

Fig. 8 Shape of body

Fig. 9 Coupler

このとき容器の設置精度を確保するためには、連結時に容器とロボットの位置関係に偏差が生じても修正する仕組みが必要である。

連結時の偏差の修正には、左右前後方向にアクチュエータを設け位置を矯正する方法も考えられるが、連結部が大型になり、製造コストの問題や電力消費量の増加により稼働時間が短縮するなどの問題が考えられるため、実用的ではない。また連結および解放に要する時間が延びることで作業効率の低下することも考えられる。そこで、(1) 低電力、(2) 短い連結時間、(3) 低故障率、(4) 高い容器の設置精度の確保、(5) 移動ロボットに搭載できる、といった条件を考慮し、Fig. 9のような連結機構を設計した。

本機構は、二つの上下に動作するストップと前後に伸縮する電動シリンダにて、台車の取手を挟み込んで固定する。この取手は人手による容器交換作業の際には存在せず、今回ロボットとの連結用にあらたに台車に付加したものである。Fig. 10に上下ストップの構造を示す。ストップはカム機構となっており、アクチュエータとリミット・スイッチにより上下する。電動シリンダは、容器台車との連結に十分な推力を持つものを選定した。電動シリンダの推力と、連結に要する押し付け力をTable 2に示す。Table 2中の勾配5.2[deg]は、本ロボットが稼働する環

Fig. 10 Structure of stopper

Table 2 Actuator strength

Cylinder	392[N]
Necessary Actuator Strength on the Flat Surface	53.9[N]
Necessary Actuator Strength on the Slope (5.2[deg])	176[N] (Measured)

Fig. 11 Slide mechanism along for the coupler

境下で想定される最大勾配である。

連結時のロボットと容器の位置偏差修正のために、容器台車の連結部は、ステンレスパイプの曲線形状とした。このステンレスパイプを、ロボット側の上下ストップと押し板のついた電動シリンダで押し込んで固定する。連結時にロボットと容器の相対位置に偏差がある場合、連結部の曲線部にロボットのストップが接触し、容器台車がスライドすることにより、ずれを矯正できる。容器台車連結部のパイプの曲線形状は、例えばカム曲線の応用が考えられるが、本機構では作図により、 $\phi 35$ のパイプを曲げ、R16 の円形とした。このようにメカ機構を利用して偏差を矯正する手法は Selective Compliance (選択的柔軟性) と

呼ばれ、スカラロボットで用いられた位置決め手法である [16]。本連結機構では、台車の自在キャスタと曲線部により横ずれコンプライアンスが大きく、シリンダの押し付けとスライド・レール・ガイドの剛性により軸倒れコンプライアンスが小さくなるため、ロボットと容器台車の中心軸が一致するよう、スライドさせることができる。Fig. 11 に示すように、容器台車取手部の内寸とストップの幅から、台車連結時のロボットの横方向の許容誤差は左右各 19 [mm] で、押し付けと曲線部による補正後の残留誤差は左右各 16~22 [mm] となる。なお、容器台車の取手と摩擦が小さくなるように、ストップや電動シリンダの押し付け部は NC ナイロンとした。

4. 走行制御

4.1 誘導方法

本ロボットには、狭い製造室内で他の機器と接触することなく、信頼性のある走行法が求められる。また製造ライン内では粉塵が発生するため、汚れに強い誘導法が必要である。

室内でのロボットの誘導法としては、ジャイロ・センサや室内 GPS を用いた方法等が考えられる。ジャイロ・センサの場合、角度のキャリブレーションを行う必要がある。実用化済の清掃ロボットでは、磁気テープによるキャリブレーションを行っていた。すなわち基準となる向きに平行に磁気テープを設置し、ロボットを磁気テープに沿って走行させ、ある程度の距離を走行するとロボットは基準方向を向くため、そこでジャイロ・センサの角度をセットする手法をとっていた。しかし狭い製造室内では、上記のキャリブレーションが有効となるような十分な長さの直線経路を確保することは困難である。また室内 GPS は非常にコストが高く、実用的ではない [17] [18]。

そこで本ロボットでは、磁気レールと磁気ガイド・センサによる誘導方法に、エンコーダを組み合わせた走行制御を採用した。走行は磁気誘導によって行う。停止位置では、減速時間を考慮し、目標位置手前 160 [mm] で磁気レールを途切れさせている。ロボットは磁気を検出されなくなった地点からオドメトリに基づいて、目標位置に一致するように一定距離走行させることで位置決めし停止する。この距離は 100 [mm] 程度となるため、車輪の滑りなどの影響はほとんど受けない。これはこれまでに多くの AGV や自律移動ロボットで使われている技法であり、信頼性が高く、実用化に適している。

4.2 磁気によるスピントーン

ロボットの方向転換の方法としては、磁気レールをカーブ上に埋め込み、その磁気に沿って進行させる方法が単純であるが、カーブのスペースを確保する必要がある。狭い製造ラインでは実現が困難であると考えられる。その他の方法として、ロボットの左右の駆動輪を逆回転させるその場旋回 (スピントーン) がある。

Fig. 12 に容器連結時にカーブ上に設置された磁気レールに沿って方向転換した場合を、Fig. 13 にスピントーンした場合の必要領域を示す。このように、カーブ上に方向転換する場合は、内側はロボットの幅、外側は容器台車幅の分の領域が必要であり、その分既存の設備から距離を取って磁気レールを設置しなければならない。スピントーンによる方向転換では、必要

Fig. 12 Running along the curved magnetic rail

Fig. 14 Necessary working space for turn

Fig. 13 Spin turn by sensing the magnetic rail

領域は旋回点を中心とし、ロボットと台車が掃引する領域である。また通路に限られる製菓室の環境では、様々な方向から進入して出ていく交差点を設ける必要が生じる。この場合カーブ状の方向転換でこれを実現するには、Fig. 14のように交差点に複数のカーブを設置せざるをえず、磁気レールの設置に必要な領域も大きくなる。スピントーンならば、交差点に磁気レールを十字に設置することで、あらゆる方向転換が可能となり必要領域も交差点を中心とした巡回半径分だけである。

よって、必要領域と磁気レール施工の簡便性から、スピントーンによる方向転換を用いることとした。本ロボットではジャイロ・センサは用いないので、交差点に十字に施行された磁気レールの磁気を、磁気ガイド・センサで読み取りながら位置決めする。

磁気レールは Fig. 15 (1) のような磁場を発しており、磁気ガイド・センサはその磁場を測定し、センサの中心と磁気レール中心の偏差に応じて Fig. 15 (2) のような出力を示し、磁気レールの中心（偏差 0）で 5.0 [V] の出力となる。前述したように、ロボットは交差点にて、磁気とエンコーダにより位置決めをして停止する。このときロボットの巡回中心が、交差点中央に一致するように停止させる。次に Fig. 13 のように、スピントーン開始後、方向転換後の磁気レールを検知するまでは一定の速度で巡回し、検知後は磁気ガイド・センサの出力に応じて、駆動輪のスピードを比例的に落とし、巡回レートを徐々に小さくしながらスピントーンを続ける。さらに磁気ガイド・センサの出力がセンサ中心に近づいた時点で停止信号を出力することで、滑らかに停止させる。

本ロボットのスピントーンで問題になるのは、ロボットと容

Fig. 15 Output of magnetic rail and guide sensor

器の質量差である。一般にフォークリフトや AGV 等の搬送機械では搬送物よりも搬送機械の方が質量が大きいのにに対して、本ロボットでは自重よりも重い容器台車の運搬を想定している。慣性力を考えると、搬送機械の質量が大きいほうがスピントーンが安定し方向精度も確保しやすい。しかし本ロボットでは搬送物の質量のほうが大きいので、スピントーン時の加減速停止や線改革速度の指令値の生成に最適カム曲線を用いて方向精度を確保した。またロボットにカウンタ・ウェイトを搭載し、ロボット側の質量を大きくすることで（総重量 170 [kg]）、走行、スピントーンの安定性を向上させた。

本手法によるスピントーン終了後の停止位置における、磁気ガイド・センサ中心と磁気レール中心の偏差は、最大で左右 7 [mm] 程度であった。これは、本ロボットで採用した磁気センサの不感帯が 5 [mm] ピッチであるために発生した偏差と考えられる。

Fig. 16 Color sensor and color marker

実用性の面では、7 [mm] 程度の偏差は影響なく、スピントーン後の直進走行も、経路を逸脱することなく行えるため、本手法は実用に耐え得ると考えられる。

4.3 分岐点の認識

ロボットは設備から送信される経路指示信号に従い、複数の経路のいずれかを走行する。ロボットは経路指示信号に合わせて、分岐点を識別する必要がある。また分岐点は磁気レールの途中になるため、前述した磁気レールの途切れとエンコーダによる停止位置決めができない。

分岐点の認識方法としては、磁気情報板を床下に埋め込む方法や、レーザセンサと反射板を組み合わせた自己位置認識などがある。磁気情報板の場合、床面との段差ができると粉末や埃が溜まるため、平坦にする必要があり、施工コストが高くなる。また充填容器のような重量物が上を通過した場合、磁気情報板の強度が低いため変形する可能性もある。レーザセンサの使用は、製造室内の壁や機器がすべてステンレスの研磨材で作られているために、反射板と固定物を誤認識する可能性があり信頼性に乏しい。

そこで本ロボットシステムでは、分岐位置に 50 [mm] × 100 [mm] の色マーカーを床面に塗布し、ロボットには色判別が可能な色センサを装備して、色によって経路内の位置を認識することとした。Fig. 16 にロボットに取り付けた色センサと製造ラインに塗布した色マーカーを示す。色マーカーには、製薬ラインの床面にも使われているエポキシ系塗料を用いた。この手法は、施工コストが低く床面に影響も与えず、製造室のクリーン度が確保できるといった利点があり、製薬工場のインフラとして適していると考えられる。

5. 既存製造ラインとの統合

5.1 既存システムとの役割分担と連携

5.1.1 既存設備との通信

移動体の通信方法としては、無線 LAN が代表的であるが、安定性や周囲の設備への影響などの問題がある。本ロボットシステムは、清掃ロボットのエレベータ連動で実績のある光伝送装置を用いることとした [2]。伝送装置はロボットの待機位置であるホームポジションと投入台の 2 箇所に設置する。ロボットは、ホームポジションで設備から工程管理データの経路指定信号を受信する。指定された経路を移動し、指定の動作を行う。また動作完了後ホームポジションに戻ると、動作完了信号を設備に送信する。

また、投入台への進入時、ロボットは投入台手前で一時停止

Fig. 17 Layout of the medicine product line

し、容器交換の可否を、投入台の前に設置された光伝送装置から受信後、進入する。受信するまでは、投入台の前で待機し続ける。薬品充填を効率的に行うため、設備は容器の充填完了が近づいた時点で、ロボットを投入台の前に呼び出し、充填完了すると直ちに容器の交換を行わせる。

5.1.2 製造室内外の容器の運搬

これまで述べてきたように、本ロボットは、製造室内において容器の交換作業を行う。製造室内は、空容器、実容器の設置位置が定められている。製造室外から空容器を運んで規定の位置に置く作業や、充填完了した実容器を次の工程に移すため、製造室外に運び出す作業は、作業者によって行われる。

5.2 環境構築

以上の走行制御を考慮し、ロボットを導入する製造室に設置した磁気レール、色タグの状態、容器設置位置を Fig. 17 に示す。経路に沿って床面に磁気レールが埋め込まれている。

本製造室には、投入台の近くに空容器仮設置位置 IE と実容器仮設置位置 IL がある。これは、投入台での薬品投入に 30～40 分程の時間を要するため、この間にロボットに別な容器を運ばせ、交換作業を効率的に行うために設けられた位置である。

5.3 作業手順

Fig. 18 にロボットの作業手順を示す。

- (1) ロボットはホームポジションにて経路指示信号を受信するまで待機する。
- (2) 指示信号を受信後、製造室に置かれた空容器 E と連結する。連結する空容器は、経路によって決まっている。
- (3) 空容器仮設置位置 IE に、連結した空容器を設置する。
- (4) 薬品投入台にて、薬品を充填された実容器と連結する。充填完了は投入台入口の光伝送装置にて設備から通知される。
- (5) 連結した実容器を実容器仮設置位置 IL に移動し切り離れた後、空容器仮設置位置 IE に設置していた空容器と再び連結し、投入台に設置する。
- (6) 空容器に薬品が投入されている間に、実容器仮設置位置 IL に設置していた実容器と連結し、実容器設置位置 L に運ぶ。

Fig. 18 Flow of actions

設置場所は経路によって決まっている。

- (7) ホームポジションに戻り、次の経路指示信号を受けるまで待機する。

5.4 ロボット異常発生時の処理

ロボットが、何らかの原因で定められた動作と別の行動をすると、事故や品質悪化につながるおそれがある。本ロボット自身が検知する異常としては、(1) 経路の逸脱、(2) 経路上の障害物の出現、(3) バッテリ電圧の低下などがある。これらの異常を検知した場合、ロボットはただちに停止する。一方、ロボットが停止すると製造ラインが停止してしまうので、作業者はすみやかにそのことを知る必要がある。このため、製造ライン・システムはロボットがホームポジションを出発してから経過時間を測定しておき、規定の時間までにロボットが戻らない場合は異常と判断し、ブザーを鳴らして作業者に知らせる。またロボット側も前述した異常が発生した場合、異常の種類に応じてタッチパネルに表示したり、LEDの点灯により、作業者に知らせる機能を有する。

6. 安全設計

6.1 レーザ測域センサ

ロボットの導入により、製造ラインは基本的に無人化されるが、室外との容器の搬出入は作業者が行うので、衝突を避ける

Fig. 19 Detection area of the laser range finder

ための安全対策として、障害物センサが必要である。赤外線等の反射型センサは、検知物体の色や材質により、検知距離に大きな違いが出ることがある。また製造ラインの設備や壁は鏡面仕上げのステンレス製であるため、誤検知の可能性がある。そこで本ロボットにはレーザ測域センサを搭載することとした。レーザ測域センサは検知物体の色や材質の影響を受けないため、物体との距離を正確に測定できる。

Fig. 19 に測域センサの設置位置と検知範囲を示す。製造室内ではしゃがんで作業する人間がいる場合がある。そこで図のように、前方測域センサは、容器を検知せず、容器から 300 [mm] 離れた位置のしゃがんだ人間（高さ 1 [m] とする）を検知できる取付位置、測定範囲とし、後方測域センサは、人が横から近づいたとき、足が巻き込まれる前に停止できる測定範囲としている（足のサイズ 300 [mm] 以下とする）。経路上に人や障害物を検知したときは直ちにロボットを停止させ、安全性を確保する。

またロボットの台車連結側以外の周囲には、ソフトバンパセンサを搭載している。万一人や物体に接触した場合は即座に停止する。さらに駆動輪周囲にはフットガードを設け、車輪による巻き込みを防止する。

6.2 ノイズ対策

実運用においては、ロボットを長時間、作業員の随伴なしに動作させるために、ノイズ対策を十分に行う必要がある。製造ラインにおけるノイズ源には、アクチュエータ電源ラインから生じる電磁氣的ノイズと、照明による光伝送装置に対するノイズがある。また、アクチュエータを動作させたときに生じる電圧変動にも注意する必要がある。今回の実用化に当たっては、アクチュエータ電源ラインに対しては、アクチュエータおよび各ICにバリスタ、コンデンサ等を配置しノイズ対策を強化した。またアクチュエータ動作時に起こる瞬間的な電圧変動に対しては、DC-DCコンバータの設置、バッテリーの容量増大により対応した。光ノイズに対しては、赤外線フィルタを装備することによって、光伝送装置の誤動作を回避している。これらのノイズ対策は、従来から我々の清掃ロボットで採用し実績を重ねてきた技術で、信頼性が高く、実用化には不可欠である。

7. 実 証 試 験

7.1 容器台車位置決め試験

Fig. 20 に示すようにロボットを 5[m/min] のスピードで走行させ、容器台車を押し上げて投入台の規定位置に置き、このときの容器台車中心 A 点の X 方向、Y 方向の規定位置 Ar から偏差を測定する。同時に台車が置かれたときの姿勢を θ [deg] とし測定する。以下に試験手順を示す。

- (1) 磁気レールの切れた位置でロボットの停止信号を出力し、容器の規定位置からの偏差および傾きを測定する。
- (2) (1) の結果より、停止信号出力位置をプリセットし、容器設置位置を補正したときの規定位置からの偏差を測定する。この測定値から、実測と補正によって実現可能な精度を確認する。

測定はそれぞれ 10 回ずつ行った。

Fig. 20 Positioning experiment

7.2 試験結果

(1) では、A 点の測定値は $X = -5 \sim -2$ [mm], $Y = 8 \sim 12$ [mm], 傾きは $1.1 \sim 2.2$ [deg] であった。X 方向の偏差は 5 [mm] 以内と小さく、傾きも実用上問題ない範囲であるが、Y 方向の偏差が 10 [mm] 以上とやや大きい。したがって停止信号出力位置をプリセットすることで、容器台車をより正確な位置へ設置することができると考えられる。点 A の Y 方向の偏差の平均値は 9.8 [mm] であった。そこで (2) において、停止信号位置を 9.8 [mm] 後方へプリセットし、同様に A 点の偏差と傾きの測定を行った。Table 3 に測定結果を、Fig. 21 に偏差の分布を示す。

7.3 考察

(2) の結果より、停止信号出力位置をプリセットすることで、容器の中心と投入台中心の偏差は、X 方向、Y 方向とも 5 [mm] 以内となった。X 方向が一侧、Y 方向が+側に偏りがあるが、技術的課題である ± 10 [mm] 以内を満たしており、台車幅 630 [mm] に対して 1%以下の誤差であるため、実用に十分な精度を実現している。よって投入台への容器設置は、磁気レールが切れてか

Table 3 Result of measurements

	A[mm]	θ [deg]
1	X=-2, Y=5	1.2
2	X=-3, Y=0	0.5
3	X=-3, Y=4	0.4
4	X=-3, Y=3	0.8
5	X=-3, Y=1	0.2
6	X=-4, Y=3	0.6
7	X=-5, Y=2	0.8
8	X=-3, Y=4	1.1
9	X=-4, Y=2	0.2
10	X=-4, Y=2	0.5

Fig. 21 Distribution of misalignment of the center

Fig. 22 Installed robots

ら停止する手法で、十分に実用的な精度が実現できるといえる。

8. システムの導入事例と評価

8.1 導入事例

本ロボットを実用化し、株式会社ツムラ静岡工場造粒工程に導入した。現在 3 台のロボットが三つの製造ラインで、それぞれ朝 9:00～深夜 3:00 にかけて稼働している (Fig. 22)。作業者は、ロボットをスタートさせた後は、一定時間ごとの容器の搬出入と設備からの異常報告に対する対処以外の作業は行っていない。1 号機を導入してから 2 年以上経過しているが、ロボットに起因する製造ラインの停止率は 0% である。

8.2 システムの評価

導入したシステムは以下の評価を得ている。

- (1) 製造ラインのレイアウトを変更することなく、製造ラインを自動化できた。導入のためのインフラも、磁気レールの設置、光伝送装置の設置、色タグの床面への塗布、連結用取手の台車への追加、の最小限に止めた。
- (2) 1 回の充電で 1 日分の搬送量をこなすことができるため、ロボット運用にかかわる作業者の負担が小さい。
- (3) これまでは 5 ラインに 5 名の担当者を配置していたが、本ロボットの導入により、2 ラインに 1 名の担当で生産することが可能となり、少人化を実現した。
- (4) 夜間および昼休みにラインの無人稼働が可能となり、製造ラインの稼働時間が延び、生産量の増加、製造コストの低減に貢献することができた。
- (5) 自動化により作業者の製造ラインへの立入頻度が大きく減少したため、GMP の適合、室内空調管理が容易となった。
- (6) 既存設備システム・ソフトウェアに変更を加え、ロボットと光伝送装置により通信をすることで、連動して容器交換作業を行うとともに、作業の進行状況、医薬品の充填状況、容器搬送回数、ロボットのバッテリー残量等の情報が明確に確認できるようになった。

9. おわりに

以下に本論文のまとめを述べる。

- (1) 既存の医薬品製造設備に大幅な変更を加えることなく、既存設備と連動して動作する容器交換ロボットを開発し、重量物である充填容器の交換作業を行うシステムを実用化した。これまで AGV 等の搬送機械は実用化されているが、狭い医薬品製造室内での充填容器の運搬および交換作業を実現した例は他に類を見ない。

- (2) 開発したロボットは、GMP に適合し製造室内を汚染しない。
- (3) 製造室内の作業者に対する安全性を確保し、ロボットと人間の調和を実現しつつ、安定して長時間稼働し、容器交換作業の自動化、無人化を達成した。
- (4) 以上のように、医薬品製造ラインでの重量物搬送という、ロボットを活用する新たな分野を開拓した。

ロボットを実用化し、作業者に負担のかかる肉体的労働を削減した実績が評価され、経済産業省の「今年のロボット」大賞 2007 の優秀賞を受賞することができた。

今後、医薬品製造における造粒工程への本ロボットの導入を拡大するとともに、このロボットを応用し、造粒工程以外の、包装工程、箱詰めされた薬品の搬送などにも展開していく予定である。さらにこの重量物搬送の技術の、医薬品製造工程以外の、工場内の搬送、図書館の本の搬送、店舗での商品の搬送などの分野への応用が期待される。

参考文献

- [1] 青山, 田島, 横田, 尾崎, 山本: “自律走行式床面清掃ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.16, no.1, pp.57-64, 1998.
- [2] 田島, 青山, 関, 石川, 横田, 尾崎, 山本: “ロボットによる高層ビルの清掃システムの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.5, pp.595-602, 2004.
- [3] 岡村, 青山, 田島, 石川, 関, 井上, 糸賀, 清水, 児玉: “中部国際空港への清掃ロボット導入”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2005.
- [4] 石川, 青山, 田島, 橋ヶ谷, 大石, 三枝: “薬品容器搬送ロボットの開発”, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2004.
- [5] 石川, 青山, 田島, 岡村, 橋ヶ谷, 大石, 小幡: “連結式容器搬送ロボットの実用化”, 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2005.
- [6] 関, 石川, 青山, 和田迫, 薩見, 石村, 西原, 高藤, 雫, 伊澤, 橋ヶ谷, 大石, 小幡, 三枝: “連結式容器搬送ロボットシステムの改良”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2007.
- [7] 東京都福祉保健局: “医薬品の品質管理について”, http://www.fukushihoken.metro.tokyo.jp/kenkou/iyaku/sonota/license/g_katahe/gqp/index.html
- [8] 高橋 他: “物流技術のこれから”, 日本機械学会誌, vol.100, no.942, pp.89-95, 1997.
- [9] 齊藤: “工場内物流無人化のための機器活用法”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.10-15, 1997.
- [10] 取崎: “搬送システムで無人フォークリフトをどう使うか”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.16-19, 1997.
- [11] 石川: “モノレール式無人搬送車をどう使うか”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.20-25, 1997.
- [12] 坪内: “天井式自動化クレーンをどう使うか”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.26-29, 1997.
- [13] 小平: “パレタイジングロボットをどう使うか”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.30-35, 1997.
- [14] 太田 他: “コンベア搭載型 AGV の協調による物体搬送システム”, 日本機械学会論文集 C 編, vol.67, no.658, pp.209-215, 2000.
- [15] 仁野, 三富: “無人搬送車をどう使うか”, 自動化技術, vol.29, no.10, pp.36-39, 1997.
- [16] 牧野: “SCARA ロボットの設計思想”, 日本機械学会誌, vol.86, no.773, pp.45-50, 1983.
- [17] 江口, 藪内, 高木, 乾, 小林: “移動ロボットの直進走行制御と移動方式”, 第 13 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.897-898, 1995.
- [18] 清弘, 降矢: “床磨きロボットの自己推進制御 (第 3 報)”, 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1213-1214, 1994.

関 淳也 (Junya Seki)

2005 年宇都宮大学大学院博士前期課程修了。同年富士重工業 (株) 入社。現在、同社戦略本部クリーンロボット部にて清掃ロボット、搬送ロボット、地雷探知ロボット等の各種ロボットの研究開発に従事。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

石川和良 (Kazuyoshi Ishikawa)

1999 年明治大学理工学部機械工学科卒業。同年富士重工業 (株) 入社。トレーラの構造設計、清掃ロボットの開発を担当。現在同社戦略本部クリーンロボット部主任として、清掃ロボット、搬送ロボット、地雷探知ロボット等の各種ロボットの研究開発に従事。日本機械学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

和田迫鉄矢 (Tetsuya Wadasako)

2006 年山梨大学大学院博士前期課程修了。同年富士重工業 (株) 入社。現在、同社戦略本部クリーンロボット部にて清掃ロボット、搬送ロボット等の各種ロボットの研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

横田和隆 (Kazutaka Yokota)

1987 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。1991 年ロンドン大学インペリアル・カレッジ大学院博士課程修了。1992 年宇都宮大学工学部機械システム工学科助手。1995 年同学科助教授。2002 年同大学工学部附属ものづくり創成工学センター助教授をへて、現在同大学大学院工学研究科循環生産研究部門准教授。Ph.D.、知能移動ロボット、不整地移動脚式ロボット、組立計画の支援・自動化、保全作業の自動化などの研究に従事。日本機械学会、精密工学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

山本純雄 (Sumio Yamamoto)

1971 年東北大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程単位修得退学。宇都宮大学大学院工学研究科情報制御システム科学専攻教授、同大学工学部長などをへて、現在同大学理事。工学博士。感覚・感性の計測、複合システムの計測制御、群システムなどの研究に従事。日本機械学会、環境システム計測制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

青山 元 (Hajime Aoyama)

1979 年山梨大学工学部精密工学科卒業。同年、富士重工業 (株) 入社。高所作業車の安定制御装置、大型多軸自走車の油圧駆動および全輪操舵システム、清掃ロボットの開発を担当。1999 年宇都宮大学大学院博士後期課程修了。現在、同社戦略本部クリーンロボット部部長として清掃ロボット、搬送ロボット、地雷探知ロボット等の各種ロボットの研究開発に従事。博士 (工学)。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

石村左緒里 (Saori Ishimura)

1995 年東京科学電子工業専門学校機械工学科卒業。現在、清掃ロボット、搬送ロボット、地雷探知ロボット等の研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

薩見雄一 (Yuichi Satsumi)

2003 年第一工業大学航空工学科卒業。2007 年富士重工業 (株) 入社。現在、同社戦略本部クリーンロボット部にて清掃ロボット、搬送ロボット、地雷探知ロボット等の研究開発に従事。

(日本ロボット学会正会員)

尾崎功一 (Koichi Ozaki)

1993 年東洋大学大学院博士前期課程修了。1995 年埼玉大学大学院博士後期課程修了。1995 年理化学研究所奨励研究員。1996 年宇都宮大学工学部助手。1997 年同大学講師。2002 年宇都宮大学工学研究科助教授を経て、現在は同大学工学研究科学際研究部門准教授。移動ロボット、および画像計測の応用に関する研究に従事。博士 (工学)。日本機械学会、精密工学会、環境システム計測制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)