

状になっていることが多い。従って台車を接触させて移動することは不可能である。また、ベルト駆動という構造上の制約から、ベルトとスピンドルを確実に接触させるため、スピンドル自体も前後に出入りしている。このように接触が許されないカブリングマシンに対しては、簡易的な案内フレームあるいは床面に軌道(経路)を取り付け、超音波やレーザ光線によって自律的に台車の位置と姿勢を確認しながら移動する方法が必要とされる。しかし、非接触式の自律台車の制御は、各地点間を移動する無人搬送車とは異なり、停止時の位置精度や姿勢が大変重要となる。この非接触式台車に類するものとしては、Crowleyによる壁面に沿って移動するロボット⁹⁾、田中らによる畝間を移動するロボット⁹⁾など部分的に考え方を参考にできるものもあるが、どちらも移動距離が比較的長いこと、そのため修正動作のための十分な時間的余裕があることなど、カブリングマシン用自律台車の特殊性をカバーするには至らない。

一方、実際の工場内では、床の凹凸・傾斜をはじめ、台車への人間の接触、糸くずやゴミの散乱など、台車の理想的な走行を阻害する要素は非常に多い。そこで、開発した自律式台車が各種外乱に対してどのように応答し、その限界がどの程度であるのかも確認する必要がある。なお、工場内の床面の状態⁹⁾はJASSを参考に、樹脂塗装のように非常に良好な場合で3mにつき7mm以下、コンクリートに塗装を施した比較的凹凸の激しい場合は1mにつき10mm以下を想定している。

このような条件下で、自律式作業台車は、位置姿勢を含め、スピンドルへの芯糸通しが可能である±3mm以内の精度で停止することが要求される。本研究では、台車がカブリングマシンに接触しないで高精度の移動停止を繰り返すために、カブリングマ

シン本体に幅20~50mm程度の細長い仮の壁面を取り付け、この面との距離を、超音波や電波に比べて分解能が極めて高いレーザ光線によって測定する方法を使った。その結果をもとに、台車は各種外乱にも対応しながら位置と姿勢を自律的に修正し、各スピンドル間で移動停止を繰り返していく。本報では、自律式作業台車の開発とその制御方法ならびに制御の限界について報告する。

3. 自律式作業台車

3.1 自律式作業台車の開発

非接触式の自律作業台車の寸法は、カブリングマシン同士が約1mの間隔で配置されていることから、第2報で報告した接触式と同様、幅600mmとし、長さは各種機構の収納スペースを考慮し700mmとした。駆動部は、安定性も考慮し、左右輪が独立して回転できる2輪速度差制御方式の2駆動輪2キャストの4輪とし、後輪を駆動輪とした。弓形フレームを持つカブリングマシンの案内面を直線化するため、まっすぐな案内板(壁)をカブリングマシン表面に簡易的に取り付け、台車は、これとの距離を前後2つのレーザ変位計によってA/D変換して読み取り、進行方向の距離は左右モータに取り付けられたエンコーダにより計数カウントする。検出された各データは、パソコンによって演算処理され、台車の位置・姿勢・移動距離を確認する。さらに、外乱やすべりを補償し修正動作を行うため、両輪モータの回転数や運転停止をそれぞれ制御し、スピンドル間の移動を行っていく。なお、台車の停止は、光電スイッチによりスピンドルを検出して行っている。自律台車システムの概略を図1に、また、その仕様を表1に示す。

3.2 自律式作業台車の制御

2駆動輪1キャスト(2DW1C)あるいは2キャスト(2DW2C)の自律台車における2次元運動^{8,9)}については理論的には同様であり、第2報でも報告したとおり、車輪のすべりや外乱がない場合は、

$$\begin{pmatrix} dx/dt \\ dy/dt \\ d\theta/dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta/2 & \cos\theta/2 \\ \sin\theta/2 & \sin\theta/2 \\ 1/B & -1/B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_R \\ V_L \end{pmatrix} \quad (1)$$

という式で与えられる。ここで、 V_R 、 V_L はそれぞれ左右駆動輪の移動速度を表し、 B はトレッド、 t は時

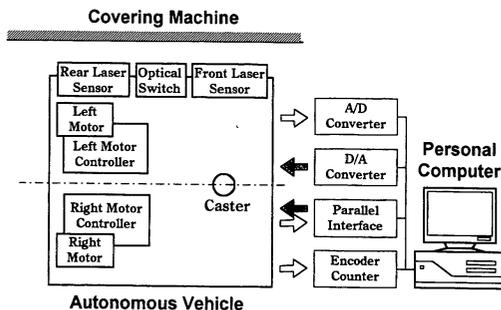


Fig. 1 System Diagram of Autonomous Vehicle

Table 1 Specification of Autonomous Vehicle for Covering Machine

Motor	ORIENTAL MOTOR	FBL550GD-A Rated Speed:3000rpm Rated Output Power:50W Rated Torque:1.7kgcm, 0.17N·m
Gear Head	ORIENTAL MOTOR	4GD200K Reduction Ratio:200
Caster	HAMMER CASTRE	420EA-R75 Wheel: ϕ 75, Rubber
Driving Wheel		Diameter:100mm, Width:15mm Steel, Rubber Surface
Driving Wheel Bearing	NIHON PILLOW BLOCK	UCPH202
Laser Displacement Sensor	KEYENCE	LB-01/LB-60 Reference Distance:100mm Range: \pm 40mm
Photoelectric sensor	KEYENCE	PK-72 Detecting Distance:80~200mm (\square 10cm White Mat Paper) Beam Spot Diameter: max ϕ 11mm
Personal Computer	NEC	PC9801RLmodel51 CPU: i80386+80387 (20MHz)
A/D-D/A Converter	ADTEC	AB98-57B 8ch12bit A/D, 2ch12bit D/A
Counter	ADTEC	AB98-29A 2ch, 24bit UP/DOWN Counter
Digital I/O Interface	ADTEC	AB98-47B 16ch Relay Output/ 16ch Photo Coupler Input
Programming Language	BORLAND	Turbo-C ver2.0

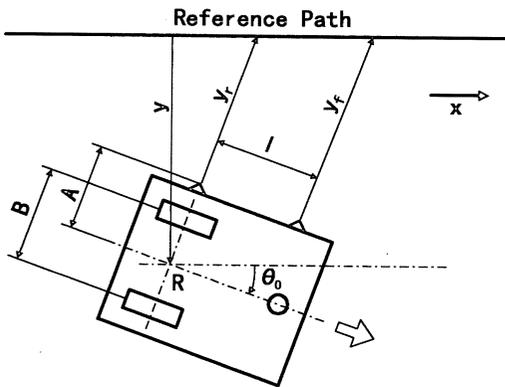


Fig. 2 Measurement of Position and Attitude

間, (x, y, θ) は左右輪の中心における座標を示している。なお, そのときの台車速度の絶対値 V は,

$$V = (V_R + V_L) / 2 \quad (2)$$

で表されるので, 左右輪の速度により理論的な台車の位置と姿勢の変化を表すことが可能である。この方法を『デッドレコニングシステム[®]』と呼んでおり, 内界センサによる台車制御の基本となっている。しかし, この手法では, 床面の凹凸や車輪の滑りがあると誤差が累積されるため, 通常は外界センサによる動作の確認を行う必要がある。

そこで, カバリングマシン用自律台車では, 旋回

と直線移動を組み合わせた Bang-Bang 制御[®]を基本に, 途中何度かの経路計画の修正を行うフィードバック制御を行うことにした。ここで, レーザ変位計の計測値をもとに, 台車の位置・姿勢を演算する方法を述べる。図 2 において, レーザ変位計の設置間隔は $l = 385\text{mm}$, 台車のトレッドは $B = 490\text{mm}$, 車輪間中心 R からレーザ変位計先端までの長さは $A = 370\text{mm}$ である。前後レーザ変位計の値と間隔 l より台車の傾斜角 θ_0 が計算され, 後部レーザ変位計の値とその θ_0 をもとに車輪中心 R の位置 y が計算される。レーザ変位計の基準距離は 100mm なので, 案内板とレーザ変位計 (台車) の距離が $A + 100\text{mm}$ に保たれれば, その誤差 Δy は 0 と処理される。したがって, R における目標経路からの誤差 Δy は,

$$\Delta y = y - A - 100 \text{ [mm]} \quad (3)$$

として与えられる。

次に, 目標経路からわずかにずれている台車を, 経路上にのせ, スピンドル軸線上で停止させるための制御方法について述べる。図 3 において, 台車は次のスピンドルから 20mm 程度手前を目標地点とし, この長さを移動距離としている。台車は, この移動距離と経路からのずれ量より進むべき方向を割り出し, 姿勢をその方向に向けて直進し始める。しかし, 台車は経路計画通り直進しないため, 一定間

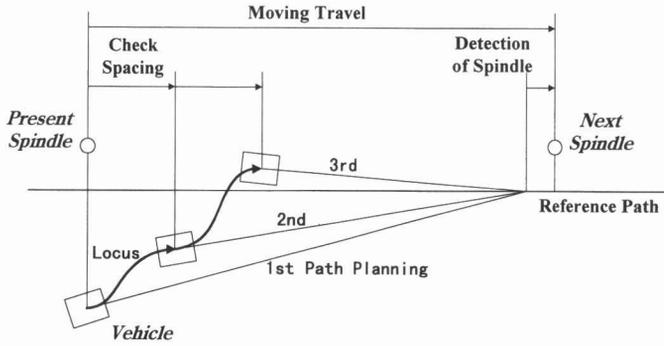
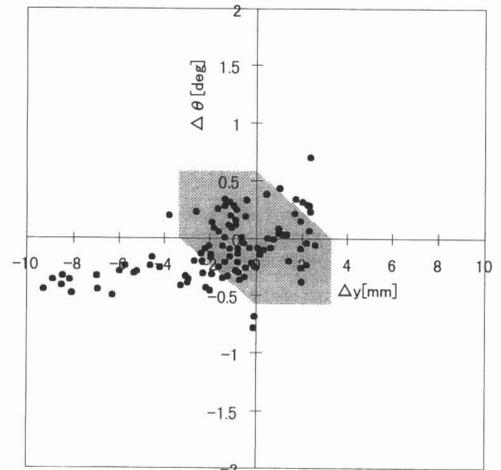


Fig. 3 Modification of Path Planning and Detection of Spindle

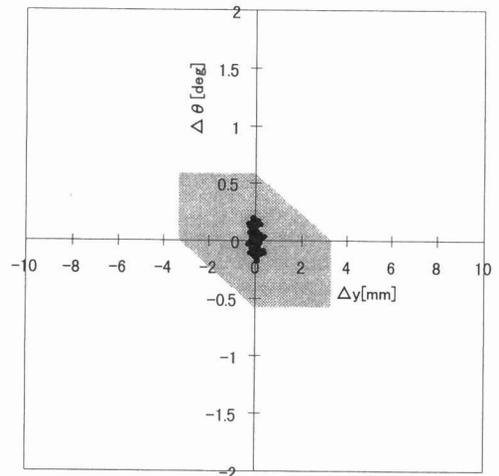
隔移動したところで、再び台車の位置を確認して経路計画を修正する。この動作を何度か繰り返し、位置誤差を徐々に小さくさせ、目標地点に達したところで姿勢を正す。その後、移動してきた台車は、次スピンドルの手前で減速をし、モータ最大速度の20%で徐行して、スピンドル検出のための直進を始める。そこで、光電スイッチによりスピンドルが検出されると、台車はスピンドル軸線上で停止し、カバリングの準備作業を開始する。台車の停止については、第2報で報告したとおり、自然停止（電源断）ではなく瞬時停止（ブレーキ）のほうが、高い停止精度が得られることが確認されているので、ここでも瞬時停止を利用した。また、光電スイッチの光線は直径11mmの大きさを持っており、スピンドル自体も円筒かつ鏡面である。よって、センサの作動する範囲はスピンドル軸を中心に幅11mm以上となり、停止位置の特定が困難になる。そこで、光線の中心とスピンドル中心軸を合わせる方法ではなく、移動の際、光線の端がスピンドル軸中心付近で反射し、センサが作動し始めるその立ち上がりを利用することにした。

4. 実験と考察

実験は、実験室の床のゆがみの影響を避けるため、補強した厚さ10mmの木製合板の上に台車をおいて、24mm/sec（最大速度の30%）の速度で、スピンドル間距離の100~200mmを移動させたものを標準とした。これに、制御パラメータを若干変更したもの、台車の初期位置をずらしたもの、コンクリート塗装床上を移動させたもの、移動途中に各種外乱を与えたものなどのバリエーションを設定した。



(a) Non-controlled



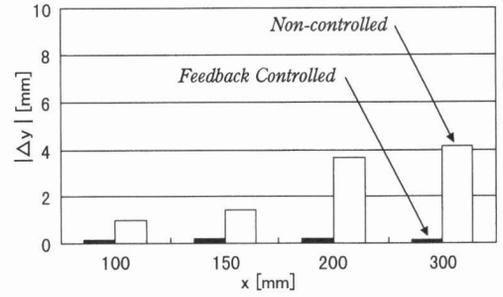
(b) Feedback Controlled

Fig. 4 Effect of Feedback Control (V=30%, x=200 mm)

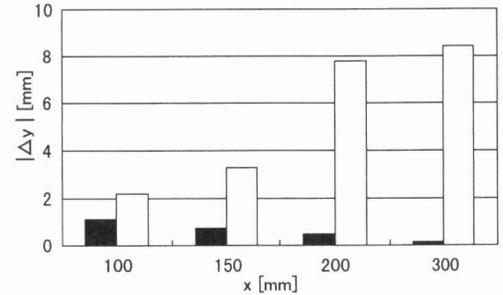
4.1 走行試験

まず最初に、台車を経路（案内板より 100 ± 0.5 mm）にのせて速度30%，移動距離200mmの条件で木製合板床上を走行させ、停止した位置での台車の位置および姿勢誤差（ Δy , $\Delta \theta$ ）を50回計測した。台車自体の直進性およびフィードバック制御の効果を検討するため、経路計画を修正しない場合と30 mm 間隔で修正した場合を比較した。その結果を図4に示す。図中、網をかけた部分は、芯糸通し作業が成功する許容誤差範囲であり、実際には各データがこの範囲に入ることが要求される。図4(a)より明らかかなように、台車は、両輪を同速度に回転させても、床面の凹凸やすべり、キャスターの動特性、機械的誤差の影響を受けて直進は極めて困難であると同時に、図4(b)のフィードバック制御の効果は、非常に大きいといえる。なお、図では比較していないが、(b)の姿勢制御最小単位は 0.03° であり、これを 0.1° 程度まで大きくすると停止時の $\Delta \theta$ は、最大で 0.5° 程度まで拡大し、芯糸通し作業の成功範囲の限界に近づくことが確認された。また、同様の実験を、経路計画の修正有りとしてコンクリートの塗装床で行ってみると、停止精度の若干の低下は認められたものの、芯糸通し作業の成功範囲から逸脱するものではなかった。

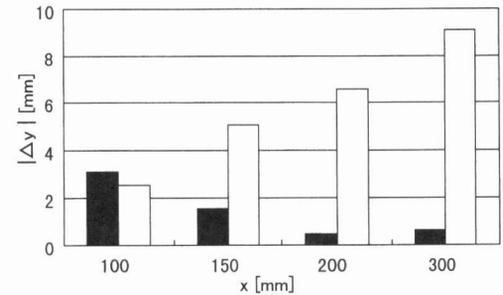
次に、台車が経路からある程度離れた場所から移動を開始し、移動するあいだに経路上へ復帰する場合を考える。ここでは、フィードバック制御の効果と同時に、この台車の制御限界についても検討を行った。条件は、初期偏差 Δy_i を0, 5, 10mmと変化させて、速度30%で木製合板床を100~300mm移動するものとし、停止したときの位置および姿勢誤差（ Δy , $\Delta \theta$ ）の最大値を求めた。その結果を図5に示す。図5(a)~(c)において、フィードバック制御を行わなかった移動では、いずれも移動距離 x の増加とともに停止誤差 Δy は累積され徐々に増加している。これに対し、フィードバック制御を行った場合は、経路上（ $\Delta y_i=0$ ）から出発したものは全て0.2 mm 以内で不変であり、その他の場合でも、移動距離の増加とともに停止精度は向上している。これは、短い移動距離でより大きな位置誤差を修正しようとする、台車の姿勢を変えるための旋回角が大きくなり、このときの計測・制御誤差が大きく影響するものと考えられる。例えば、100mmの移動距離で10mmの位置を補正しようとする、その突入



(a) Initial Variation $\Delta y_i=0$ mm



(b) Initial Variation $\Delta y_i=5$ mm



(c) Initial Variation $\Delta y_i=10$ mm

Fig. 5 Response to Changing of Initial Setting
 角度は 5.7° となる。しかし、前後レーザー変位計のどちらかを経路上にのせて、測定できる最大角は、この台車の場合には 5.9° であり、いわばこの角度が限界といえる。したがって、短距離で大きな位置補正するのは当然不利なことではあるが、レーザー変位計の測定範囲やその取り付け間隔などに大きく支配されるものと考えられる。ただ、フィードバック制御を行っただけの場合も、芯糸通しの必要停止精度は達成することができた。

4.2 外乱への対応

実際の工場内では、本報第2節でも述べたように、台車の理想的な走行を阻害する要素が非常に多い。ここでは、各種の外乱を想定し、開発した自律

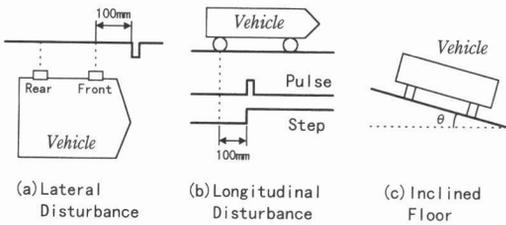
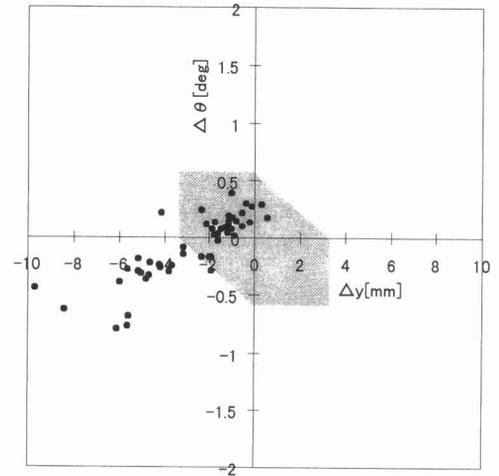


Fig. 6 Type of Disturbance for Autonomous Vehicle

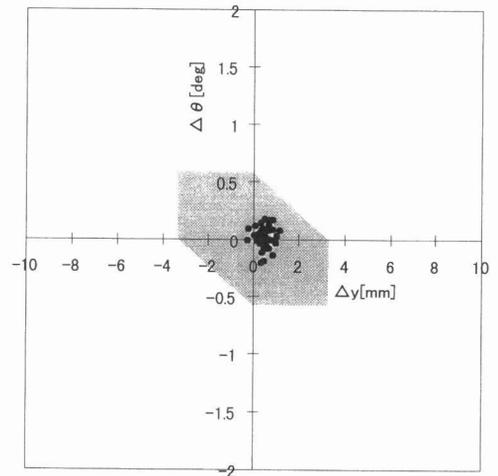
式台車がどの程度まで対応できるかを確認した。
 外乱の与え方を、図6に示す。(a)は、台車の横方向への一時的なずれを与えるもので、案内板より設定量だけ突き出した壁面を設置した。ただ、この方向へのステップ的な外乱は、すでに図5で示した設定値変更の場合に相当するので、ここでの説明は省略する。次に縦方向の外乱として、(b)のように、片側の車輪にパルス状およびステップ状の段を設置した。(a)、(b)ともに外乱を与える位置は、移動を開始してから100mmの地点で、総移動距離は200mmである。また、(c)は台車の横滑りを誘発させるために、最初から床を傾斜させて移動させたものである。

以上の条件に対して走行試験を行い、芯糸通しの成功する停止精度内におさまったときの、外乱の限界値を表2に示す。台車の位置や姿勢は、リアルタイムで計測しているが、それに対する制御は一定間隔でしか行っていないため、パルス的な外乱に対しては、台車はあまり大きな影響は受けないことが確認された。同時に、移動を伴わない回転(スピターン)による姿勢制御を行っているため、対応は、前レーザ変位計に対しては容易であるが、後レーザ変位計に対してはやや困難であることも確認された。しかし、ここで表される限界値は、前述のとおり、いずれもレーザ変位計の測定範囲と配置、および台車の寸法によって支配されるものであり、制御

自体の限界を示したものではない。さらに、傾斜床に対する応答については、想定した1%の傾斜に十分対応できるなど、フィードバック制御の効果が確



(a) Non-controlled



(b) Feedback Controlled

Fig. 7 Reponse to Inclined Floor

Table 2 Permissible Disturbance Value for Autonomous Vehicle

Lateral Disturbance	Pulse Input	for Front Sensor	± 40mm
		for Rear Sensor	± 10mm
	Step Input	for Front Sensor	± 10mm
		for Rear Sensor	± 10mm
Longitudinal Disturbance	Pulse Input	10mm	
	Step Input	5mm	
Inclined Floor		10mm / 1m (1%)	

using a pair of Laser Displacement Sensor which has ± 40mm in measurement range

認された。一例として、(c)の傾斜床における実験結果を、図7に示す。経路修正を行わないで移動した場合は、全体的に床の傾斜方向へ流され、停止時の姿勢自体も不安定であるが、フィードバック制御によって移動した場合は、最大で1mm程度のずれを生じたにとどまっている。

4.3 停止位置

台車の減速、光電スイッチによるスピンドル検出、モータの瞬時停止の組み合わせによって、自律台車の x 方向の停止誤差は、1mm以内に抑えることができた。また、ターゲットとしてスピンドルを直接利用することにより、前述の y および θ に多少の誤差があったとしても、台車上の作業機構は必ずスピンドル軸線上でその方向を向くことになり、芯糸通しを行う際には非常に都合が良いということがわかった。

ただし、通常のカバリングマシンでは、スピンドル自体が10~20mm前後出入りしているため、芯糸通し装置は、その出入りに合わせて操作ストロークを変えなければならない。自走式台車では、直線フレームをもつ新型カバリングマシンを対象としたためこの長さが172mmと一定であったが、機構自体は300mm近くまで出入りできる余裕を持っている。自律式台車ではこの機構を可変長に変更し、スポンジゴムと電極を組み合わせたセンサによってスピンドルを機械的に検出し、そこで作業を行うことにした。これにより、 y および θ 方向のわずかな誤差も吸収することができる。

5. 結 言

本報では、スピンドルの出入りや湾曲フレームをもつ旧型カバリングマシンに対応した非接触式の自律台車を開発し、作業のための移動および停止の制御法について検討した。開発した台車は、自律台車の位置姿勢計測用サンセとしてレーザ変位計を利用したもので、経路計画を一定間隔で修正するフィードバック制御との組み合わせにより、非常に高精度の位置決めが可能となった。実際には、外乱やすべりのある環境下において、芯糸通しなどカバード糸製造準備作業の必要停止精度 $\pm 3\text{mm}$ を実現することができた。ただし、この制御の可能限界はレーザ変位計の測定範囲に大きく支配され、 $\pm 40\text{mm}$ の測定範囲をもつレーザ変位計を使ったときでは、約10mmの横外乱、約5mmの縦外乱、約1%の傾斜に対応できた。

文 献

- 1) 堀純也, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 50, T24 (1997)
- 2) 八田潔, 堀純也, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 50, T343 (1997)
- 3) 堀純也, 八田潔, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 51, T42 (1998)
- 4) 堀純也, 八田潔, 喜成年泰, 新宅救徳; 繊維機械学会誌, 51, T59 (1998)
- 5) James L. Crowley; IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-1-1 (1985), 31.
- 6) 田中好文, 山田昭夫; 日本機械学会論文集, 61-582, C (1995), 662
- 7) 狩野春一; 建築施工ポケットブック, p. 14-9, オーム社 (1980)
- 8) 水谷元彦, 対馬一憲; 日本機械学会論文集, 58-550, C (1992), 1965
- 9) 高野政晴; 日本ロボット学会誌, 5-5, (1987), 391