

全天候型自動化施工システムの開発 —その4：自動制御・計測技術と現場適用—

田中 靖之* 金川 武雄*
内田 俊司* 増谷 正治*

要 旨

本システムのおもな制御はリフトアップ装置のメインシリンダストロークの同調と、シャトルクレーンの自動搬送である。制御方式は集中監視・分散制御で、この方式はこれらの機械設備と中央制御室のコンピュータをLAN (Local Area Network) に接続するだけでよく、制御系を簡素化できる特徴がある。

一方、クレーン搬送作業やリフトアップ時のリフトアップフレームの安全性、およびシステムの健全性を確認するため、フレームの挙動（水平変位、たわみ、支柱フレームの軸力）を計測した。

これらを現場適用した結果、下記に示す効果を得ることができた。

- ①リフトアップの一連の動作に自動制御を導入してヒューマンエラーによる操作ミスを排除したことで、安全性、および信頼性が向上しリフトアップ所要時間の短縮につながった。
- ②シャトルクレーンの搬送に自動制御を導入したことで干渉の予測が可能になり、搬送作業の安全性が向上した。また、搬送経路をモニタに表示したことでクレーンオペレータが搬送状況を容易に把握でき、手動運転操作の技術向上にもつながった。
- ③リフトアップ装置の機側盤、およびクレーンの各機能ごとにコンピュータを組み込み、制御上の独立性を高くしたことで制御構成を簡素化でき、配線工事の省力化、および保守作業が容易になった。
- ④リフトアップ中の水平変位やフレーム着床後の支柱フレームの負担荷重などをリアルタイムに確認でき、リフトアップを安全に実施することができた。

1. まえがき

リフトアップは10台のリフトアップ装置（メインシリンダ、上下クランプ）の協調作業である。リフトアップフレームの局部応力の発生や、支柱フレームの過大な負担荷重を防止して安全にリフトアップするためには、シリンダのストローク同調制御や、リフトアップ開始後、および着床前のカンヌキの開閉動作、ならびに荷重を負担していない状態でのロックピンの抜き差し動作など、多くの確認・操作項目がある（詳細は、別稿、その2「構成技術と現場適用」を参照）。そこで、ヒューマンエラーによる操作ミスを排除して安全性の向上を図るため、リフトアップの一連の動作に自動制御を導入した。

もう一つの制御項目、2台のシャトルクレーンの自動搬送もクレーン同士の協調作業である。クレーンオペレータの作業負担を軽減して搬送作業の安全性、および搬送時間の短縮を図るためには、互いのクレーンの現在位置や姿勢の把握、動作の予測、複数の機能の同調運転など、多くの不確定要素への対応と高度な運転技術が必要になる。そこで、コンピュータが状況を判断して最適な搬送経路を生成後、所定位置まで搬送する一連の作業に自動制御を導入した。

一方、クレーン搬送作業やリフトアップ時に、リフトアップフレームの状態を監視することは、本システム全

体の健全性を確認することでもある。そこでフレームの水平変位、たわみ、および支柱フレームの軸力から構成するリフトアップフレーム挙動計測を考案した。地上からのレーザ光をフレーム上のCCDカメラで視準する水平変位計測、フレーム上の水圧センサで鉛直レベルを計測するたわみ計測、ひずみゲージを使用した支柱フレームの軸力計測など、精度の確保、保守の容易性を考慮してこれらの計測方法を採用した。

以下、本稿（その4）ではリフトアップ制御、自動搬送制御、およびリフトアップフレーム挙動計測の概要と適用結果について報告する。

2. 開発の基本方針

自動化の目的は作業工数の削減による生産性の向上と省力化、および機械同士の協調作業の実現や操作ミスを排除して安全性の向上を図ることである。すなわち、どこまで自動化するのか、自動化の範囲をどのように考えるかが重要である。

一方、自動化の範囲の増加にともない設備数や運用・保守作業も増加する。そこで、機械と人それぞれが得意な作業を明確にして、自動化の範囲を決めた。下記に自動化（自動制御）の開発方針（条件）を示す。

- ①一連の動作、および判断基準が明確で、その流れが

* 技術本部 FACES プロジェクトチーム

シーケンス的な場合

- ②制御対象の数量が多い場合
- ③自動化の投資効果が大きい場合
- ④触感・視覚情報が不要な場合
- ⑤予測できない外乱がない場合

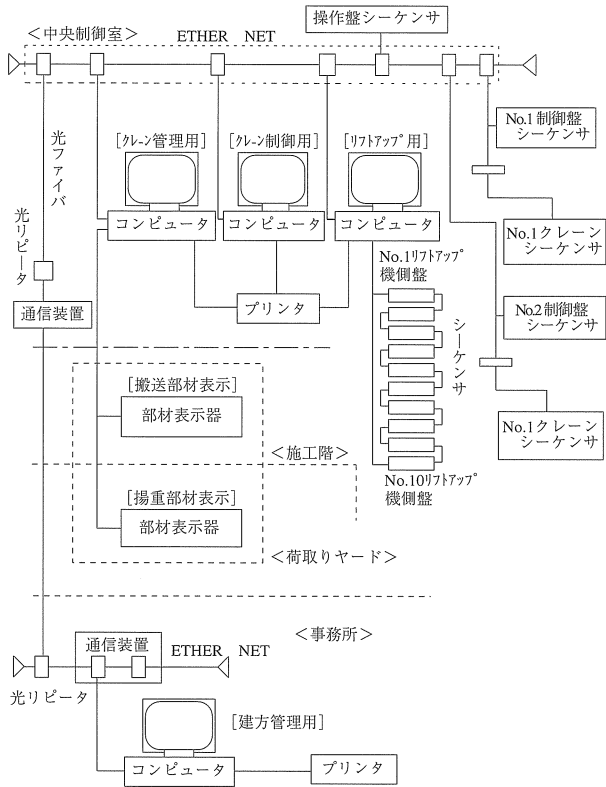


図-1 制御系統図

リフトアップフレーム挙動計測の目的は、クレーン搬送作業やリフトアップ作業などの安全性、および本システム全体の健全性を確認することである。開発方針は計測結果が対策につながる計測方法を考案するだけでなく、計測準備、計測機器の初期化、盛替えなどの運用・保守作業の省力化も図ることである。

3. 中央制御室と機械設備

3.1 中央制御室

中央制御室は、リフトアップ装置やシャトルクレーンの運転・制御・監視、施工階の作業状況、リフトアップフレームの挙動監視などを行う本システムの指令塔である。中央制御室にはコンピュータ、操作盤、モニタ、計測機器などを設置し、これらの機器と各種機械設備、計測機器、現場事務所間には光ファイバーを敷設し、LAN (Local Area Network: イーサネット・CSMA/CD方式・10Mbps) を介して接続する。

中央制御室のコンピュータのおもな機能には、各種機械設備の集中監視、自動搬送経路の生成、通信、ヒューマンエラー防止用の作業支援 (表示、警報出力) などがあり、これらは協調作業の実現や操作ミス の排除に必要なものである。

図-1 に制御系統図、図-2 に制御室機器配置、写真-1 に操作状況を示す。

なお、現場事務所には建方管理用のコンピュータを設置する。

3.2 機械設備

各種機械設備には制御上の独立性を高めるため、リフトアップ装置の機側盤 (10面)、およびシャトルクレー

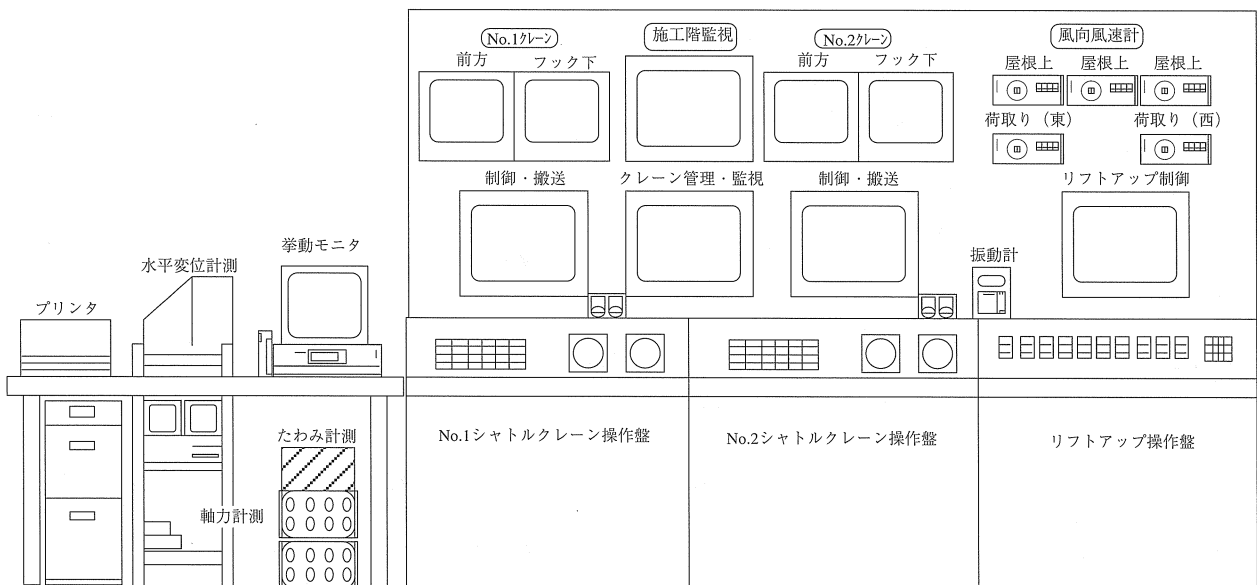


図-2 制御室機器配置

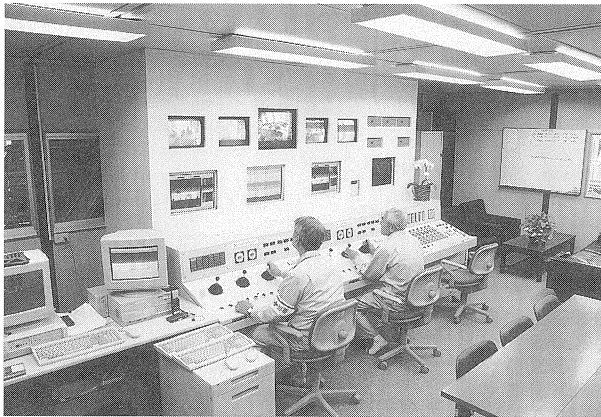


写真-1 操作状況

ンの制御盤（走行、ブーム旋回、ブーム伸縮、フック旋回、巻上げ下げの5面）ごとにコンピュータが組込んである。したがって、各種センサ情報を処理することで、リフトアップ装置やクレーンの各機能の状態を把握でき、設備ごとに動作を決定（分散制御）することができる。

4. 制御

4.1 制御概要

制御概要はリフトアップ装置のメインシリンダストローク同調制御と、シャトルクレーンの自動搬送制御である。制御方式は中央制御室のコンピュータが各種機械設備からのセンサ情報を集約・判断し、シリンダ伸縮速度やクレーンの動作を決定した後、分散的に制御する集中監視・分散制御である。この方式はこれらの機械設備と中央制御室のコンピュータをLANに接続するだけでよく、制御系を簡素化できる特徴がある。

表-1に制御機器とおもな機能を示す。

4.2 リフトアップ制御

4.2.1 リフトアップ制御の概要

制御の概要は、

- ①10本のメインシリンダのストローク差を5mm以内に制御するストローク同調運転
- ②リフトアップ開始後・終了前のカンヌキの開閉動作
- ③ロックピンの開閉動作
- ④シリンダ単独の上昇・下降運転
などの機器制御と状態監視、および
- ⑤中央制御室、各種機器、および現場事務所のコンピュータとの通信
- ⑥機器の状態やメッセージの表示
- ⑦シリンダ負担荷重の履歴作成
などである。このうち、機器制御と状態監視が優先処理項目である。

表-2にリフトアップ制御の構成、図-3に自動制御

表-1 制御機器とおもな機能

制御機器	おもな機能
リフトアップ用コンピュータ (中央制御室に設置)	リフトアップ制御 リフトアップ状態監視 機器の状態表示 履歴作成 各コンピュータとの通信 通信用シーケンサとの通信
クレーン管理用コンピュータ (中央制御室に設置)	自動搬送経路生成 異常監視、異常記録管理 建方順序の表示 搬送・揚重部材の表示 稼働実績管理 各コンピュータとの通信
クレーン制御用コンピュータ (中央制御室に設置)	自動運転制御 クレーン干渉チェック クレーンの状態表示 自動運転経路の表示 各コンピュータとの通信 通信用シーケンサとの通信
建方管理用コンピュータ (現場事務所に設置)	部材の建方順序作成 自動搬送シミュレーション クレーンの状態表示 建方実績管理 各コンピュータとの通信
通信用シーケンサ (操作盤に設置)	コンピュータ、シーケンサとの通信
クレーン用シーケンサ (制御盤に設置)	各機能の運転制御 通信用シーケンサとの通信
リフトアップ用シーケンサ (機側盤に設置)	シリンダの伸縮速度制御 ロックピンの開閉制御 カンヌキの発停制御 通信用シーケンサとの通信
部材表示器 (施工階と荷取り階に設置)	搬送部材の表示 揚重部材の表示
通信装置	各制御機器間との通信 データの光伝送変換

表-2 リフトアップ制御の構成

運転モード	機能	内容
自動	リフトアップ	10本のシリンダの同調運転 (1フロアの上昇、下降)
	柱建込み	任意のシリンダの上昇、下降 (反力柱の建て込み空間を確保する)
	1ストローク	10本のシリンダの同調運転 (シリンダ1ストロークの上昇、下降)
手動	連動	10本のシリンダの運転 (任意ストロークの上昇、下降)
	単独	任意のシリンダの運転 (任意ストロークの上昇、下降)
		任意のシリンダの運転 (シリンダ1ストロークの上昇、下降)
地切り	荷重20%	設計荷重の20%押上力での上昇運転
	荷重40%	〃 40% 〃
	荷重60%	〃 60% 〃

フローを示す。

リフトアップは一連の動作や判断基準が明確で、その流れがシーケンシクであり、そのうえ制御対象の数量が

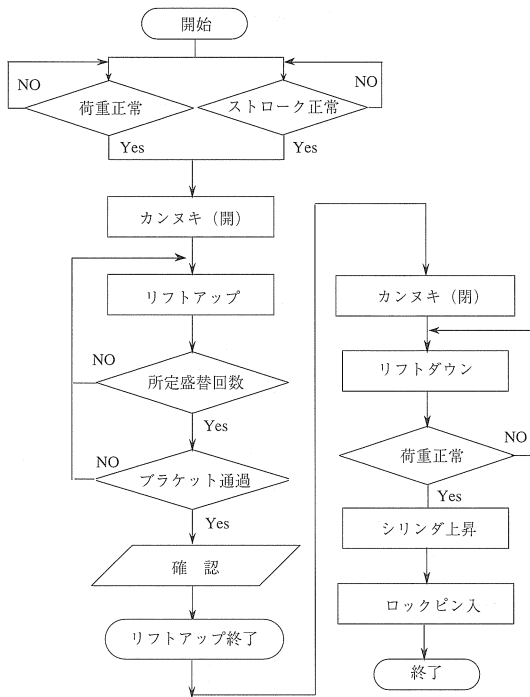


図-3 リフトアップの自動制御フロー

多いため自動制御には適したものである。
 そして、これらの制御対象には通信系統を2回線敷設し通信の信頼性を確保している。
 また、リフトアップ時には安全確保のためシリンダのストローク差と負担荷重、ロックピン動作状況、メッセージなど監視に必要なものを表示する。
 写真-2にリフトアップ制御のモニタ表示を示す。

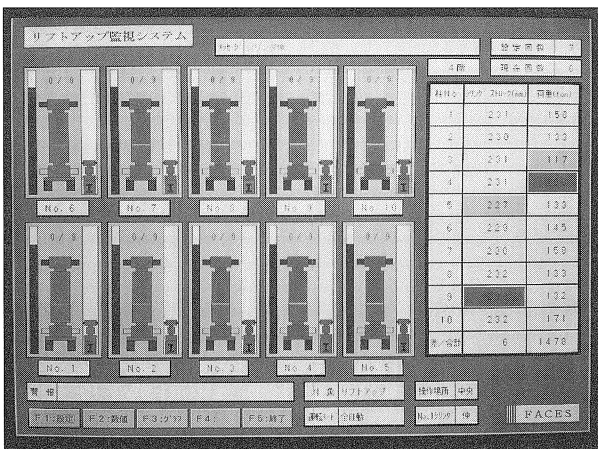


写真-2 リフトアップ制御のモニタ表示

4. 2. 2 シリンダ同調制御

下記にシリンダ同調制御の概要を示す。

- ①ストローク差チェック：リフトアップ中に10本のシリンダストローク差（最大-最小）が通常許容値を超えた場合、最大ストロークのシリンダ伸縮速度が減少す

る。ストローク差が復帰許容値より小さくなった場合はシリンダ伸縮速度をもとにもどす。

- ②過大ストローク差チェック：リフトアップ中にストローク差（最大-最小）が過大許容値を超えた場合は全シリンダを停止する。
- ③シリンダ停止チェック：リフトアップ中、シリンダの盛替え動作など各ステップごとにシリンダストロークをチェックし、それぞれの設定値に達した場合はシリンダを順次停止する。

4. 2. 3 適用結果

20回リフトアップを実施した結果、制御上の不具合は皆無であった。下記におもな適用結果を示す。

- ①リフトアップの一連の動作に自動制御を導入したことでヒューマンエラーによる操作ミスを排除でき、安全性・信頼性が向上し、リフトアップ所要時間の短縮・安定につながった。

図-4に階数とリフトアップ所要時間を示す。

階数	30	1 時間	30	2
20 F	リフトアップ			
19 F				
18 F				
17 F				
16 F				
15 F				
14 F				
13 F				
12 F				
11 F				
10 F				
9 F				
8 F				
7 F				
6 F				
5 F				
4 F				
3 F				
2 F				

図-4 階数とリフトアップ所要時間

リフトアップ所要時間はほぼ一定である。通常、人手による作業には習熟効果が期待できるが、一定であるということは、リフトアップ制御が正常に動作し人が介在することがなかったことを示している。

- ②シリンダストロークの同調制御が正常に働き、リフトアップ中にフレームを水平に保つことができ、シリンダ負担荷重の過大防止、フレームの局部応力の発生防止などを図ることができた。

図-5にリフトアップ中のシリンダ負担荷重を示す。

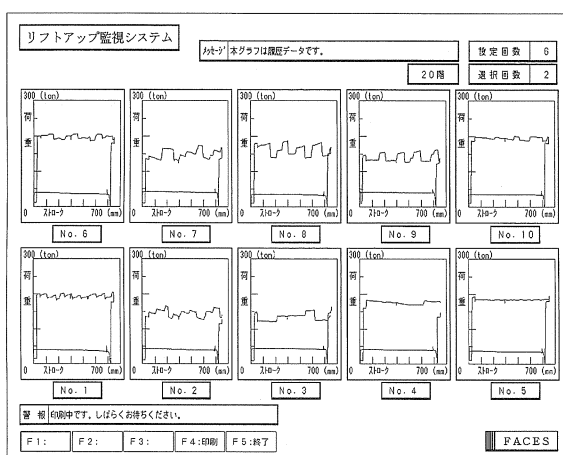


図-5 リフトアップ中のシリンダ負担荷重

③サイクル工程との兼ね合いで、リフトアップ完了前の一時停止、リフトダウン、カンヌキ開閉動作などのリフトアップ手順の変更があったが、運転モードと機能を選択することで対応でき、作業に支障をおよぼすことはなかった。

④シリンダのストロークやロックピンの開閉状態を表示したことで、次の作業の指示を迅速に行うことができリフトアップ作業時間の短縮につながった。

4. 2. 4 評価

リフトアップ制御は、自動化の開発方針を網羅するとともに、シリンダストロークの検出に磁束ひずみセンサ、情報通信にイーサネットなど信頼性の高い完成した技術を使用するなど、リフトアップ装置との整合性も兼ね備えたものであり、計画通り十分な効果を発揮した。

本システムのような工法では施工の安全性を確保するため、リフトアップ中はクレーン作業を一時休止するが、リフトアップ所要時間の短縮・安定化を達成できたことは、クレーン作業のロス時間削減、すなわち、サイクル工程の短縮・安定を実現した一つの要因でもある。

また、リフトアップ装置の独立性を高くしたことで、制御構成を簡素化することができ、配線工事の省力化や保守作業が容易になるなど運用・保守上の効果もあった。

4. 3 自動搬送制御

4. 3. 1 自動搬送制御の概要

自動搬送の適用は、部材の荷取り位置から搬送位置(取付け位置近傍)までの範囲である。制御の概要は、

- ①干渉のない安全な搬送経路の生成
- ②フック旋回、ブーム伸縮などの機器制御
- ③搬送中の干渉チェックを含めたクレーンの状態監視
- ④中央制御室、各種機器、現場事務所のコンピュータとの通信
- ⑤クレーンの状態やメッセージなどの表示
- ⑥建方・稼働実績の履歴作成

⑦現場事務所での建方管理

などである。このうち、搬送経路の生成、機器制御、クレーンの状態監視が優先処理項目である。

図-6に自動制御による自動運転フローを示す。

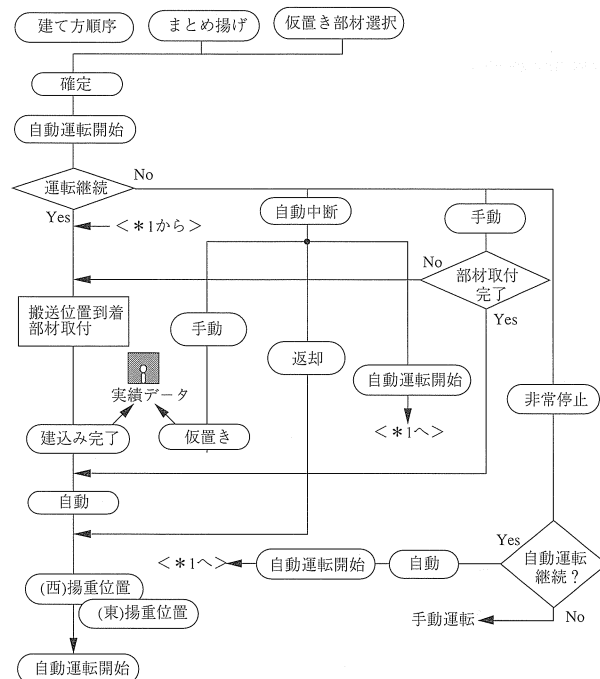


図-6 自動制御による自動運転フロー

一方、現場事務所の建方管理コンピュータでは、施工計画にもとづく柱・梁部材の建方順序や建方状況を管理する。図-7に自動搬送制御のファイル構成を示す。

その他、建方管理コンピュータでは、

- ①建物形状のモデル化
- ②搬送部材の登録
- ③部材の取付け位置、形状、および建方状況を参照した最適な部材の搬送経路の生成
- ④シミュレーションによる搬送の安全確認
- ⑤LANを使用した部材データの送信なども行う。

4. 3. 2 おもな機能

表-3に自動搬送制御のおもな機能を示す。

1) 自動搬送経路生成

自動搬送経路生成とはクレーン同士の干渉、および既設構造物との干渉がない荷取り位置から搬送位置までの部材の搬送範囲をもとめることである。この搬送経路は搬送部材ごとに制御コンピュータで搬送部材データ(部材の取付け位置やサイズなど)と設備データ(支柱フレームや建て込み完了部材など)を参照して生成する。経路生成中に干渉が発生した場合は干渉を回避する経路を新たに生成する。

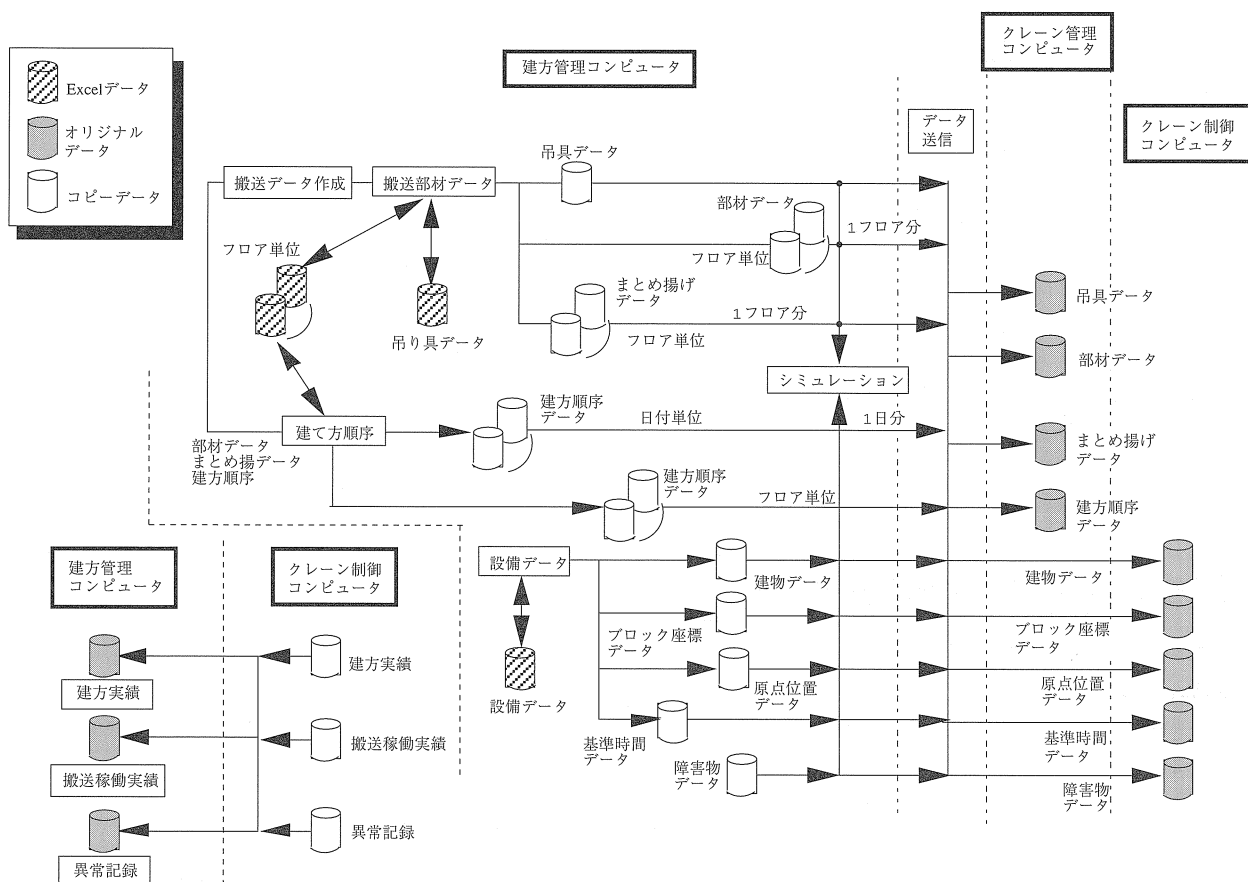


図-7 自動搬送制御のファイル構成

表-3 自動搬送制御のおもな機能

機能	内容
自動搬送経路生成	搬送部材データや設備データから、自動運転が可能な搬送経路を生成する
自動搬送制御	部材の自動搬送経路に沿って、クレーンを自動運転するこの時、クレーン同士の干渉チェックも行う
シミュレーション	クレーン同士の協調作業における部材の自動搬送を事前に確認する
表示	クレーンの状態、自動運転経路および揚重部材などを表示する
通信	地上事務所とリフトアップフレーム内の中央制御室間の通信および各種機械設備間の通信を行う
履歴作成	シャトルクレーンの各機能の累計稼働時間、異常発生記録の履歴および建方実績などを管理する
安全対策	ソフト上でのリミット設定、および各種センサによる自動停止など対策がある

2) 自動搬送制御

制御対象はブーム伸縮、ブーム旋回、フック旋回、走行、巻上げ下げ用の各モータなどである。これらを同時に制御して各種部材の荷取り位置から所定の搬送位置まで自動搬送する。搬送中はコンピュータが2台のクレーンの現在位置や姿勢、および動作を把握することでクレーン同士の干渉を予測し、干渉が予測された場合には優先度の低いクレーンを停止するなど、干渉を制御する能力も備えている。自動搬送完了後は作業員との協調作業で部材を取付ける。取付け完了部材は建方実績ファイ

ルに登録され、次の部材の搬送経路生成時に設備データ(障害物データ)として認識される。

速度制御には広い可変速範囲、高速応答、急加減速、およびストールトルク制御など速度制御特性に優れているベクトル制御方式を使用している。下記に、この方式を使用したおもな制御要素を示す。

- ①搬送経路に沿ったクレーンの姿勢制御
- ②荷振れを極力抑える走行・旋回速度制御
- ③干渉が予測された場合の優先度が低いクレーンの停止制御
- ④フック旋回時に吊り荷の傾斜を抑える吊り荷水平制御
- ⑤部材取付け時に吊り荷を走行レールに対して直角方向に直線的に移動する横行制御

3) シミュレーション

現場事務所の建方管理コンピュータで、搬送状況をシミュレーションすることができる。次の階の搬送作業を安全に効率よく行うため、部材登録後に搬送経路、および安全性を事前にシミュレーションして確認する。

4) 表示

自動搬送中、オペレータはクレーン制御コンピュータのモニタを通して搬送状況を監視する。このモニタには

建物形状、クレーンの相対位置・姿勢、吊り荷、搬送位置、および搬送経路を表示する。手動運転中もこの画面で搬送状況を確認しながら操作する。その他、ヒューマンエラーを防止するため必要に応じてメッセージや警報を出力する。

一方、クレーン管理用コンピュータのモニタには通常、建方順序や建方部材名を表示してあり、この画面上で搬送部材を選択する。さらに、異常記録やクレーンの各機能の稼働時間などもこのモニタ上で確認できる。

施工階と荷取りヤードには大型部材表示器を設置し、施工階の表示器には搬送部材名、荷取りヤードの表示器には揚重部材を表示する。このようにすることで、作業員も部材の搬送位置や玉掛けする部材を確認することができる。

写真-3に自動搬送制御のモニタ表示を示す。

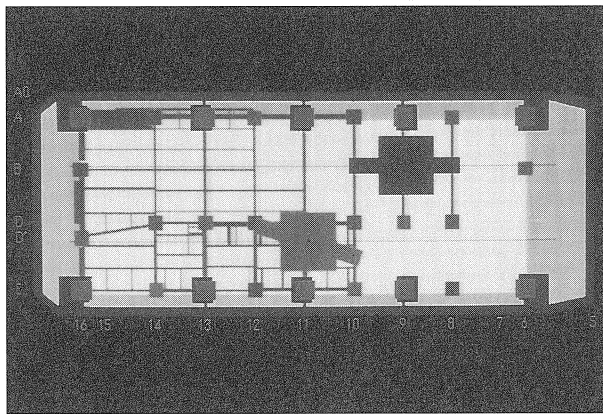


写真-3 自動搬送制御のモニタ表示

5) 通信

中央制御室、各種機械設備、および現場事務所間には光ファイバケーブルを使用したLANを敷設する。事務所からは部材の取付け位置、サイズ、吊り具の種類などの属性を付加した搬送部材データを中央制御室に送信する。通信方式は信頼性の高いTCP/IPで大容量のデータを短時間で送信することができる。

6) 履歴作成

クレーンの各機能の累計稼働時間や異常の発生時刻、発生ヶ所、復旧時刻などを管理し、クレーン管理コンピュータに保管する。必要に応じてこれらのデータを確認することができる。

一方、部材毎に搬送開始・終了時刻なども記録し、現場事務所の建方管理コンピュータに保管するとともに、日々の作業終了毎に搬送部材データ、設備データなどを更新する。

7) 安全対策

ソフト上でのおもな安全対策にはシミュレーションで

の搬送経路の事前チェック、2台のクレーンの干渉回避を含めた自動搬送と自動停止、モニタを通しての搬送状況、およびメッセージ・警報出力によるオペレータへの警告などがある。

ハード的には衝突防止のための干渉物検出センサやリミットスイッチなどによる状態監視、および風速・振動過大検出による運転停止がある。さらに、施工階の作業状況や搬送部材の挙動を監視するため、クレーンとフレームにカメラを設置している。

表-4に制御上の安全対策を示す。

表-4 安全対策

動作	項目	内容
巻上	過負荷防止	クレーンの過荷重を検出する
	過巻防止 (常用上限)	巻常用上限位置で巻上を停止させる
		※この位置信号により巻エンコーダ出力を0補正する
	(非常上限)	巻非常上限位置で動力回路を遮断し、巻上を停止させる 復旧は、原因を排除し後に再度、電源投入する 尚、通常は巻常用上限センサーで停止するため、巻非常上限センサーが作動した場合は原因究明が必要
	上限減速	シーケンサの設定で減速範囲を指定する
過速度防止	巻過速度を検知し、巻上/巻下を停止させる	
走行	両極限停止	走行東進限を検知し、東進を停止させる(西進可)
		走行西進限を検知し、西進を停止させる(東進可)
	レールアンカ	レールアンカの「入」「抜」を表示しレールアンカ「入」の時には走行しないようにする
ブーム移動	両極限停止	ブーム前進限を検知し、前進を停止させる(後進可)
		ブーム後進限を検知し、後進を停止させる(前進可)
	ブーム側面衝突防止	旋回時におけるブーム側面と障害物との衝突防止用 (本センサーはバックアップ用として使用し、通常は制御ソフトにて相対位置を検出し動作を停止させる)
	ブーム先端/後端衝突防止	伸縮時におけるブーム先端及び後端の衝突防止用

4. 3. 3 適用結果

1) 協調作業について

クレーン同士が互いに干渉する位置関係にあるため、安全に効率よく搬送するには協調作業が必要である。ここでいう協調作業とは外界の認識結果をもとに(構造物、他のクレーンとの相対位置の把握など)、相手の邪魔をしないように自分の動作を決定すること、すなわち、
①他のクレーンの搬送経路を考慮した経路生成手順
②クレーンの水平投影面積を考慮した搬送・干渉回避時のクレーンの姿勢制御

③干渉予測、および優先度の高いクレーンの選択制御などを確立することである。そして、これらの手順・制御を適用した結果、安全に効率よく搬送作業を実施することができた。

2) 自動搬送制御の効果について

手動搬送では階数が高くなるにつれ搬送作業時間が徐々に減少しているが、自動搬送は作業時間のバラツキ

が少なくほぼ一定である。このことから搬送制御が正常に動作したことがわかる。そして、自動の平均搬送時間は手動の約86%であり、搬送経路に沿った姿勢制御なども有効であった。

そのうえ、自動搬送制御は搬送終了後、部材の取付けを容易にするため、取付け位置まで1動作で移動できるように、クレーンだけでなく部材の姿勢まで制御している。そのため、取付け作業も搬送作業と同様に自動搬送ではほぼ一定で、その作業時間も手動の約95%であった。

3) モニタ表示について

搬送経路やクレーンの姿勢を表示したことは、搬送方法の把握、安全の監視だけでなく手動運転操作の技術向上にもつながった。

また、異常発生ヶ所、異常原因をシーケンサのデータをもとに詳細に表示したことは、保全作業に役立った。一方、部材表示器で搬送部材や玉掛け部材を作業員が確認できたことは作業情報の徹底を図ることにもなった。

操作・安全性の観点からは、外壁の取付け作業など施工階より下の階での施工状況もモニタで確認する必要があり、今後の改善事項である。

4. 3. 4 評価

搬送制御の要素技術には、センサ技術、位置出し・位置決め技術、情報通信技術、システム技術（協調作業、障害物検出、干渉回避）などがある。このうち、自動搬送にはシステム技術が必要であるが、要素技術の中で最も完成度が低いためこの技術の開発に留意した。

- ①協調作業：搬送経路生成、クレーンの姿勢制御、優先順位・選択制御などの開発
- ②障害物検出：干渉物検出センサを使用
- ③干渉回避：クレーン各機能の同期制御などである。その結果、クレーンの機能を十分に活用した自動搬送を実施することができ、リフトアップ制御と同様、サイクル工程の短縮・安定化に貢献した。

5. リフトアップフレーム挙動計測

5.1 計測概要

挙動計測は、地上からのレーザ光をフレーム上のCCDカメラで視準する水平変位計測、フレーム上の水圧センサで鉛直レベルを計測するたわみ計測、ひずみゲージを使用した支柱フレームの軸力計測など、信頼性が高く、運用・保守が容易な計測技術から構成する。

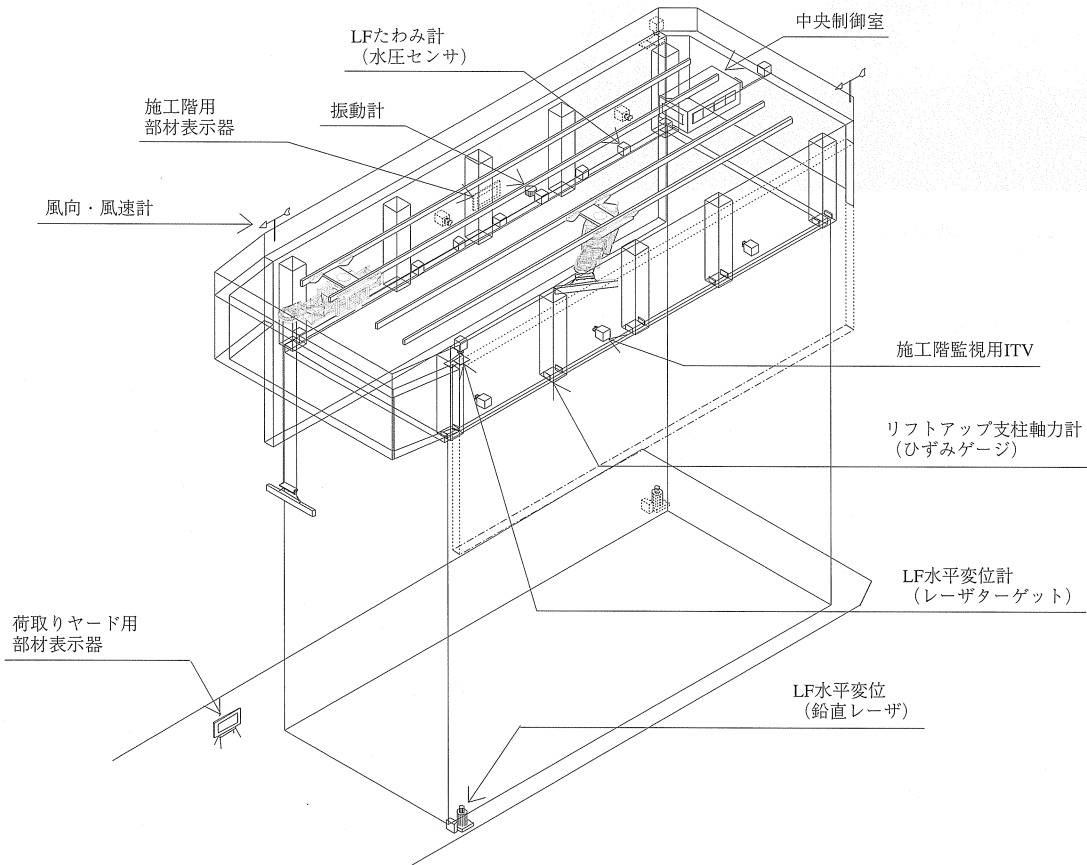


図-8 挙動計測の構成

これらの計測結果をリアルタイムにモニタ表示・収録するとともに、設定値を超えた場合には警報を出力する。その他、設定以上の振動（過大な変位）・風速を検出すると、クレーンやリフトアップ作業を停止する機能も備えている。

図-8に挙動計測の構成を、表-5におもな仕様を示す。

表-5 挙動計測のおもな仕様

項目	精度	範囲	点数
フレーム水平変位	±0.5mm	150×150mm	フレーム角部2点
フレームたわみ	±1.0mm	-80~20mm	フレーム中央11点
支柱フレーム軸力	±5.0t	0~250t	各支柱フレーム2点

5.2 フレーム水平変位計測

5.2.1 計測方法

地上の座標基地点から照射している鉛直レーザ光を、フレーム上のレーザターゲット内のCCDカメラで視準してリフトアップ前後のフレームの相対変位を計測する。

ターゲット上にはレーザポイントの他に基準点として2つの発光ダイオードがあり、この発光ダイオードとの相対的な位置関係からレーザポイントの座標をもとめる。

5.2.2 適用結果

リフトアップ中の変位量は建物の長辺、および短辺方向とも最大5mm以内であり、リフトアップの繰返しによる変位の累積もなかった。その結果、安定したリフトアップを実施できた。

図-9に階数2~RFまでのリフトアップ中のフレームの最大水平変位を示す。

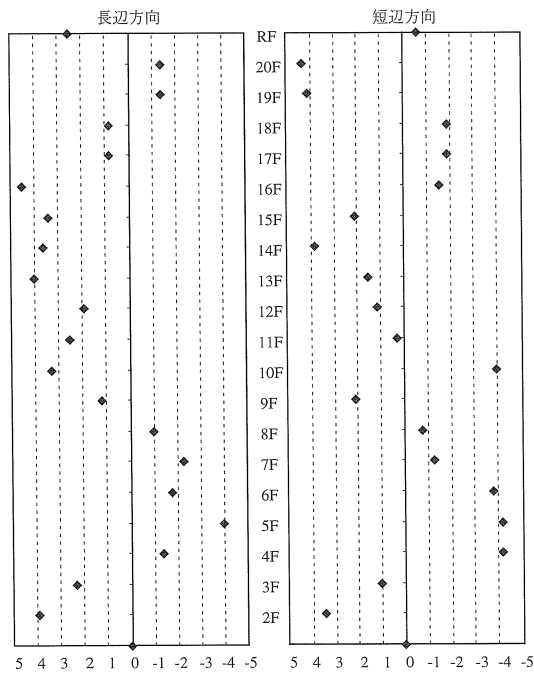


図-9 リフトアップ中のフレームの最大水平変位

5.3 フレームのたわみ計測

5.3.1 計測方法

フレーム組立時の「たわみ状態」を基準にして、クレーン移動時のたわみやリフトアップ時の傾きによる相対鉛直レベルを水圧センサで計測する方法である。

写真-4に水圧センサの設置状況を示す。

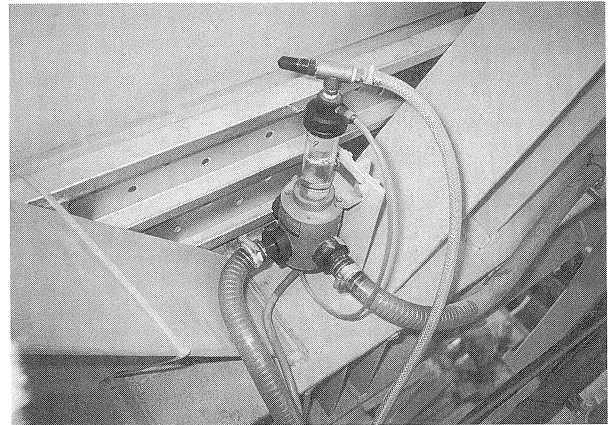


写真-4 水圧センサ設置状況

この方法は、水平旋回するレーザを使用したレベル計測に比べ、レーザの見通し確保など機器設置上の制限や、駆動部がないため、運用・保守が容易である。

図-10にフレームのたわみを示す。

5.3.2 適用結果

設計上、クレーンがP2点に移動した場合に最大11.5mmのたわみがP1で発生する。この状態での、たわみの実測値は最大11mmでありクレーン搬送時のフレームの健全性が確認できた。

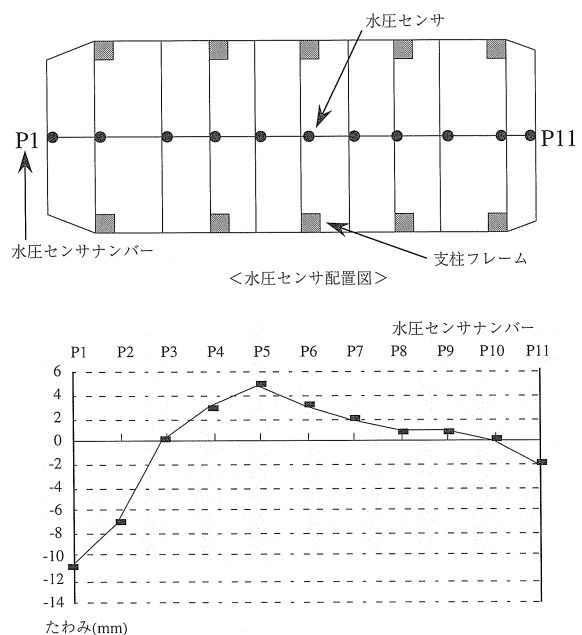


図-10 フレームのたわみ

また、本工事では20回リフトアップを実施し、リフトアップ時のレベル差は2～3mmで、シリングストロークの同調制御が有効であったことも確認できた。

5. 4 支柱フレームの軸力計測

5. 4. 1 計測方法

リフトアップフレーム（機械設備も含む）を支持する支柱フレームの負担荷重（軸力）を計測するもので、支柱フレーム下部の支持梁（カンヌキと称す）にひずみゲージを貼り付け、カンヌキに加わる応力から負担荷重を求める計測方法である。

この方法はロードセルに比べ、検出部を小型化できフレームの加工も不要になるが、精度向上の対策が必要である。そこで、応力から荷重への変換係数は実物と同じ部材を使用した荷重試験から求め、ひずみゲージ（2軸交差ゲージを2枚使用、1枚は温度補償用）は工場内で応力ゼロの状態のときにカンヌキ材両面の対称な位置に貼り付けた。現場適用後は繰り返し使用による誤差を除去するため、リフトアップごとにゼロ点調整を行った。

5. 4. 2 適用結果

リフトアップ完了後、梁ブラケット上へのフレーム着床時のカンヌキのレベル管理は、各支柱フレームの軸力が設計軸力±10%になるように、梁ブラケットのレベルをシムにて調整する。シム調整量と荷重の増減について計測した結果、調整量1mmに対して、約15～20t荷重が増減することがわかった。この関係には再現性があり、以後のリフトアップ作業に活用できた。

図-11にシム調整前後の支柱フレームの軸力を示す。

着床直後の2-1カンヌキの場合は、過大軸力95tになっている。シム調整を1.2mm行ったことで軸力が約20t減少し、減少分の荷重が2-2カンヌキに移っていることがわかる。

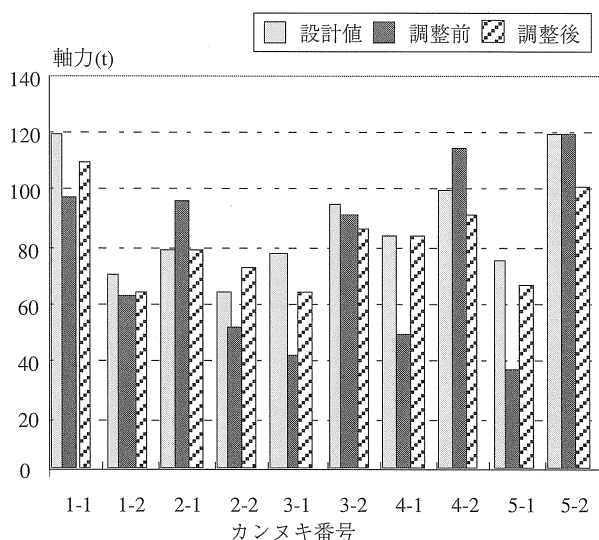


図-11 シム調整前後の支柱フレームの軸力

5. 5 評価

リフトアップ中の水平変位やフレーム着床時の支柱フレームの負担荷重などをリアルタイムに確認でき、鉄骨建方、およびリフトアップ作業を安全に実施することができた。特に、カンヌキのレベル管理に軸力を使用したことで、計20点のレベルをリアルタイムに把握でき、シム調整時間の短縮にもつながった。このように、本挙動計測は計測結果が対策につながることを検証できた。

6. あとがき

自動化（自動制御）で最も懸念したことは、通信不良、コンピュータの誤動作、データ（階高データや搬送部材データなど）の入力ミスによる不具合などでシステムが停止した場合、各種作業の中断、作業員の待機、車輛スケジュールの変更、調整作業などその波及範囲が広いことである。したがって、通信・センサなどに完成度の高い技術を使用するとともに、シミュレーションによる搬送状況の確認など不具合の発生防止に考慮した。また、自動搬送制御においては予測できない外乱（自動運転中断）への対応など、オペレータに従来とは異なる知識が必要になったが、マニュアルの整備と教育・訓練を実施することで対応できた。

今回は「機械と機械」の協調作業の観点から自動化に取り組んだ。今後も引き続き適用結果を分析するとともに、自動化が必要な作業を抽出し、「人と機械」の協調作業の観点からの自動化についても検討していく所存である。