

図形言語によるクレーン制御システム

Crane Control System by Visual Language Programming

技術本部 西岡正樹*¹ 豊原尚*²
 広島製作所 宮田紀明*³ 吉岡伸郎*⁴

クレーン制御システムはこれまでプログラマブルロジックコントローラ (PLC) を主制御装置として制御システムを構成し、ラダー言語により制御ロジックを記述してきた。このラダー言語の解釈にはメーカーごとに専門的知識を習得する必要があり、かつ数値演算などでは視覚的に解釈することが難しいものであった。そこで制御ソフトウェアのメンテナンス性向上を目的として、視覚的に容易にロジックを解釈することができる図形言語システムを用いてクレーン制御システムを開発した。制御ロジックの図形表現により複雑なクレーン制御の機能向上を容易に進めることができた。

We have developed the crane control logic by ladder language programming on a programmable logic controller (PLC). Crane users had to master ladder programming language for each PLC manufacturer and it is difficult to understand numerical operation by ladder diagrams. We developed a new crane control using visual language programming developed for easy crane control maintenance. We easily developed complex crane control logic to improve crane control functions using the visual programming language.

1. ま え が き

クレーン制御システムはこれまでプログラマブルロジックコントローラ (PLC) を主制御装置として制御システムを構成し、ラダー言語により制御ロジックを記述してきた。このラダー言語の解釈にはメーカーごとの特徴を専門的に習得する必要があり、また複雑な数式演算は視覚的な制御ロジックの理解が難しいものであった。この度、当社では視覚的に容易に制御ロジックを記述できる機械制御向け図形言語システムを採用し、専用制御マイコンを用いてクレーン制御システムを構築した。これにより、制御ロジックの視覚的理解度の向上とこれまでのクレーン制御のノウハウを盛り込んだ高機能クレーン制御システムを開発したので本報で具体的に紹介する。

2. 図形言語によるクレーン制御システムのねらい

図形言語を用いて視覚的理解度の高い制御プログラムを構築することにより、エンドユーザでのクレーン制御のメンテナンス性向上、メンテナンス時間短縮に貢献するシステムを提案する。またロジック検証が視覚的に容易にできる図形プログラミングによりソフトウェア開発の効率化を図り、独自性のある高度な制御ロジックの考案によるクレーン制御の高機能化をねらった。本報では以下に挙げる内容について紹介する。

- (1) 異常処理ロジックの視認性向上
- (2) 振れ止め制御ロジックの可視化
- (3) 吊荷荷重演算機能の高機能化
- (4) 可変加速度制御の考案 (高速化)

3. 図形言語システム概要

今回、クレーン制御システム開発に適用した図形言語システムはソフトウェア生産性・信頼性の向上を目的として機械

制御向けに特化したプログラム開発支援ツールとして自社開発したシステムである。この図形言語システムは図面上に図形を描いて制御ロジックを表現するもので、図面情報から自動的に制御プログラムを生成するものである。作成した図面上で制御ロジックの実行状態をリアルタイムモニタリングできる機能も有しており、このロジックモニタリング画面ではパラメータの設定変更や信号の強制オン/オフができロジック検証が効率的に行える。図形の記述形態には FBD (Functional Block Diagram) と SFC (Sequential Function Chart) の 2 形態あり、本システムでは機械制御に必要な機能を各種要素関数として織込んでいる。

また、本図形言語システムでは C 言語によりその装置特有の処理ロジックを FBD の要素関数として図形に埋込むことができる。高度な制御ロジックを構築する上で C 言語による関数が作成できる機能は有用である。

図 1 は FBD のサンプルで同じロジックのラダー言語を比較したものである。FBD は各信号をアンド、オアなどの論理演算要素や数値演算要素を使って接続し意図するロジックや数値演算を図形で表現する。このため視覚的にロジックの内容を理解しやすく機械制御ロジックを表現するのに適している。一方ラダー言語は接点信号を直列、並列接続する電気回路記述形態であり図形言語と比較した場合、ロジックの内容を視覚的に理解しにくい。特にフィードバック制御系などのブロック図や数値演算の表現においては FBD はラダー図とは比較にならないほど適している。図 2 は SFC のサンプルである。この SFC はシーケンシャルな順序制御を状態遷移図として表現するものである。遷移条件により制御状態を上から下のステップに移行する。本図形言語システムでは SFC を記述した同じシート内に FBD で遷移条件ロジックを直接記述できる特徴を持っている。SFC のステップには下位マクロが記述でき、その状態での特別な処理を記述できる。

*1 広島研究所搬送システムグループ主席

*3 鉄構技術部運搬機設計課主席

三菱重工技報 Vol. 37 No. 5 (2000-11)

*2 広島研究所制御システム研究室

*4 鉄構技術部運搬機設計課

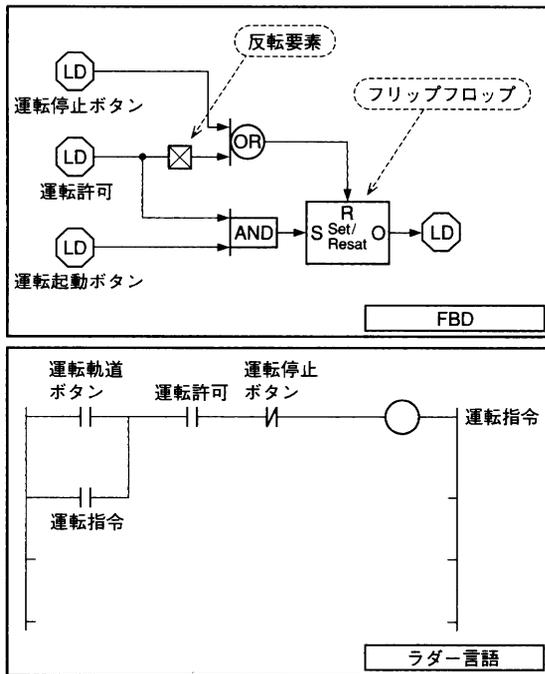


図1 FBD サンプル 図形言語システムで使用する FBD 図面のサンプルを示す。
Sample of functional block diagram

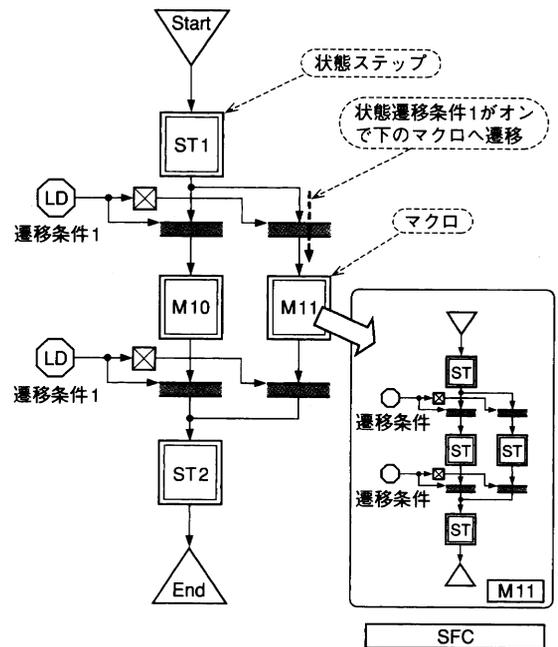


図2 SFC サンプル 図形言語システムで使用する SFC 図面のサンプルを示す。
Sample of sequential function chart

表1 コンテナクレーン主駆動系仕様一覧
Specifications of container crane main drives

駆動系	定格出力 (kW)	定格速度 (m/min)
巻上	400×2台	80/160
横行	210×1台	210
起伏	220×1台	64
走行	22×8台	45

また、本図形言語システムではマルチタスク制御構成が可能であり、制御周期や優先度の異なる複数の制御タスクで制御システムを構成することができる。制御の高機能化を推進する上では欠かせない機能を有している。

4. クレーン制御システム構成

4.1 適用クレーンの仕様

表1に示す駆動仕様を持つ大型コンテナクレーンを対象として制御システムを構築した。

4.2 制御システム構成

今回開発した図形言語によるクレーン制御システムのシステム構成を図3に示す。制御に必要な入出力データはマスタ PLC と通信リンクで接続する構成とした。マスタ PLC はその他各制御機器との I/O 機器としても機能させている。主制御装置である自社開発制御マイコンとマスタ PLC とはイーサネット通信で接続し、クレーン制御のすべてを制御マイコン側で処理する制御構成とした。このシステム構成とすることで主駆動系システムに依存することなく、核となるクレーン制御ロジックは標準化が可能となる。図4に制御マイコンと図形言語システム開発コンピュータの外観を示す。

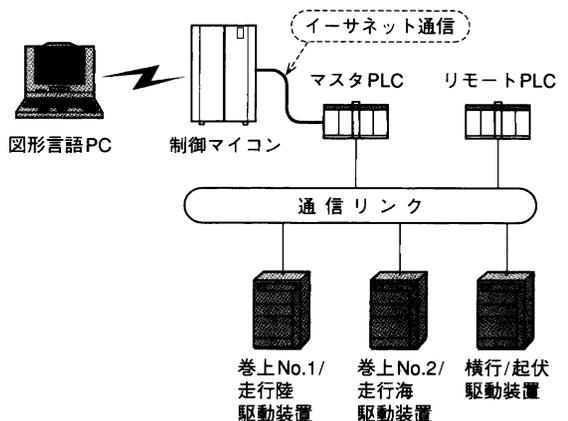


図3 制御システム構成 図形言語システムを搭載したクレーンの制御システム構成を示す。
Control system configuration

5. 図形言語による制御ソフトウェアの特徴

5.1 異常処理ロジックの視認性向上

異常処理ロジックの視認性向上はクレーン制御のメンテナンス性向上、時間短縮に直結する重要なテーマと位置付けロジック開発を実施した。

クレーンの異常処理は異常、インタロックレベルに応じてすべての駆動系を非常停止させるものや個別の駆動系のみを非常停止させるもの、通常停止や強制減速処理だけでよいものなど複雑な処理が要求される。そこで図5に示すように異常処理構造が視覚的に容易に追えるようにツリー構造でインタロック処理ロジックを構成した。図5においてツリー構造の各々の枝の部分が各インタロック検知部であり、幹の部分がこれらインタロック信号を集約した運転を許可する信号や非常停止にかかわる信号となっている。

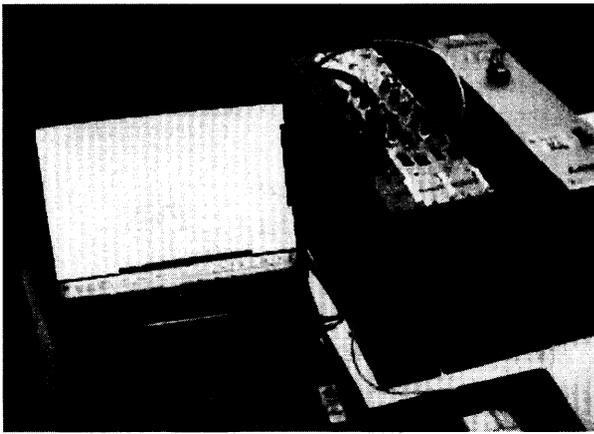


図4 制御マイコン、図形言語 PC 外観 クレーン制御マイコン及び図形言語プログラム作成パソコンの外観を示す。 Picture of micro computer and visual language programming PC

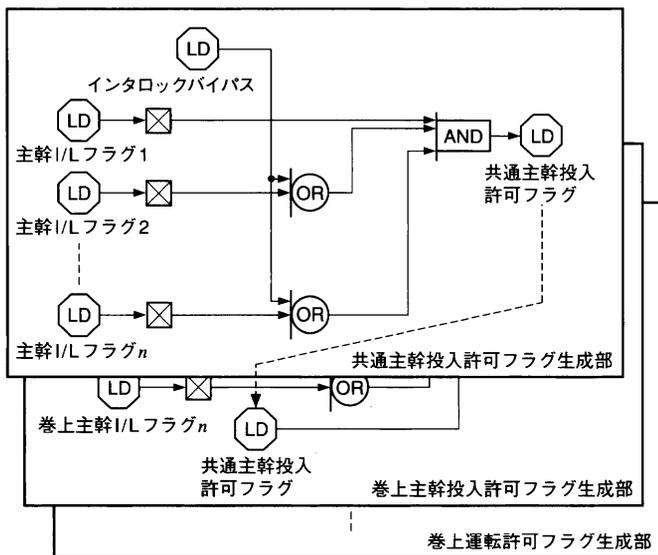


図5 異常処理ロジック構成 異常処理ロジックの図形表現を具体的に示す。 Logic configuration of crane interlocks

実際の異常処理にかかわるロジック検証において、このツリーをたどり末端のインタロック検出箇所を視覚的に追うことにより、これまでソフトウェア開発者以外は難しかったロジック検証がモニタ操作を習得するだけで容易に行えるようになった。

5.2 振れ止め制御プログラムの図面化

コンテナクレーンでは横行運転中、横行速度を自動的に変化させてコンテナの荷振れを制御する電気式振れ止め制御を適用している。この振れ止め制御は横行位置、横行速度、吊りロープ長、荷振れ量、荷振れ速度といった多数の状態量に対して制御の意図に応じて重み設定された制御ゲインを各々の状態量に掛合せ横行速度指令を生成する最適フィードバック制御系で構成している。この振れ止め制御に加えて自動的に指定レーンに到達するレーン指定運転機能や、その場で自動的に振れ止めができるその場振れ止め機能、自動的に振れ止めしながら微小横行できる微小位置決め機能など多機能な

制御構成となっている。この振れ止め制御ロジックは高度な演算や複雑な処理系で構成されることから従来はすべてC言語で作成していた。これまではエンドユーザでの振れ止め制御のロジックモニタリングは非常に難しい状態であった。今回、振れ止め制御ロジックの図形化により従来ブラックボックスであった振れ止め制御の制御状態を視覚的に確認できるシステムに再構築した。SFCによる状態遷移表記、FBDによる最適フィードバック制御系の表記により、自動制御の実行状態をリアルタイムモニタリング可能となり振れ止め制御メンテナンスツールとしての機能を大幅に向上させることができた。

5.3 荷重演算機能の高機能化

荷重演算とは巻上モータの出力トルクから吊荷の質量を推定演算する演算機能である。図6に荷重演算処理ブロック図を示す。荷重演算で得た吊荷の推定質量を基に巻上モータの定出力領域で出力できる最大巻上速度を設定している。この技術は従来からコンテナクレーンには適用されているが、図形言語の採用により、複雑な演算処理ロジックを容易に構築できることから、これまで蓄積してきたコンテナクレーン制御のノウハウを盛込んだ信頼性の高い荷重演算ロジックを構築した。荷重演算は演算結果が実態の吊荷質量より軽く推定した場合、荷の落下を招く重大な事故につながる可能性がある。そこで、荷重演算の信頼性及び推定精度を向上するため、以下の事項について対応できる演算ロジックとした。

(1) 巻上加速度が変化しても対応できる荷重演算処理

巻上の速度とトルクの状態信号を高速定周期でサンプリングすることで安定性の高い荷重演算を実現した。実機検証では±2t程度の検出安定性を得た。

(2) 定速運転時に荷重演算を再実行する

巻上加速運転中の荷重演算結果の妥当性チェックを巻上定速運転中に行い、速度の出しすぎであると判断した時点で目標速度を引下げるロジックを組込んだ。これにより万

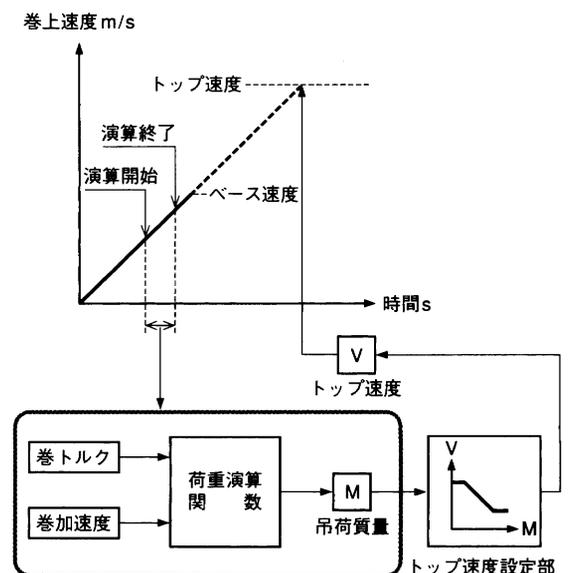


図6 巻上荷重演算処理ブロック図 荷重演算機能のブロック構成を示す。 Block diagram of load weight calculation

が一の演算失敗のときでも安全に荷役ができるよう徹底的に安全性を追求したロジック構成とした。

5.4 可変加速度制御の考案

可変加速度制御は今回の図形言語によるクレーン制御システム構築において新たに考案した速度制御方式である。

巻上速度指令は前記した荷重演算結果から得た吊荷質量に応じた巻上モータの定出力領域内で出力できる最大巻上速度を目標速度として設定するが、従来では定出力領域においても0～ベース速度間の加減速度と同じ加減速度で目標速度まで加速させていた。0～ベース間は定トルク制御領域であり荷重演算精度維持のためにも一定の加速度が必要である。ところが荷重演算が完了した状態においては現在吊っている荷の質量が既知の物理量となっていることから、巻上モータの出力性能でどれだけの速度及び加速度が出力できるかは単純なパワーバランスの式で導出できることに着目した。そこで、定出力領域では巻上モータが出力できる出力性能限界まで使った速度指令を生成し速度制御を行えば、従来と同容量のモータでも加減速度時間を大幅に短縮させることが可能となる。今回考案した可変加速度制御は荷重演算が完了した状態において速度指令が定出力領域に出た瞬間から式(1)に示す巻上モータと吊荷のパワーバランス式を用いて現在出し得る最大加速度をリアルタイムに計算し、式(2)によって次の瞬間の速度指令を生成する加速度制御方法である。

$$a = \frac{1}{V_{n-1}} \left[\frac{P_m - MgV_{n-1}/\eta}{(\pi\alpha)^2 GD^2} \right] \quad (1)$$

$$V_n = V_{n-1} + aT_s \quad (2)$$

ここで、

- P_m : モータ最大出力 (kW)
- M : 吊荷質量 (荷重演算結果) (kg)
- GD^2 : 装置の総合慣性イナーシャ (kg・m²)
- η : 装置の総合機械効率 (巻上時)
(巻下時は逆数)
- α : 回転数 (rps) / 速度 (m/s) 比
- g : 重力加速度 (m/s²)
- a : モータが出せる限界加速度 (m/s²)
- V_{n-1} : 現在速度指令値 (m/s)
- V_n : 次の制御周期での速度指令値 (m/s)
- T_s : 制御周期 (s)

図7に可変加速度制御による巻上運転のチャートを示す。破線は速度パターンが従来の速度指令であり、今回考案した可変加速度制御の速度パターンが実線である。図7では倍速速度まで2.75s掛かっていた加速時間をこの可変加速度制御により2.25sまで短縮することができた。

6. 成 果

図形言語システムの導入によりソフトウェア専門技術者でなくとも容易に制御ロジックのプログラミングを行うことができる環境が整った。この環境整備によりこれまで蓄積してきたクレーン制御技術のノウハウを図形プログラムに盛り込み、

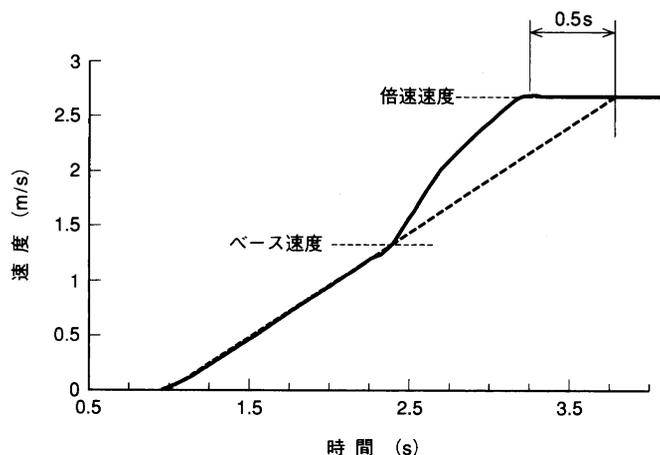


図7 可変加速度制御による速度出力パターン 可変加速度制御により生成した速度パターンを示す。
Speed pattern diagram by real-time calculation of acceleration following motor power limit

荷重演算機能の高機能化、可変加速度制御の考案など具体的に特徴のある制御システムを構築することができた。図形記述手法をプログラミング前に十分検討し制御ロジック作成を進めたことで視覚的に容易に理解できるプログラム構成とすることができた。今回開発した図形言語プログラムの視覚的認識性は以前のラダー言語による制御ロジックと比較して大きく向上することができた。その結果、実機検証においては試運転調整期間を短縮する成果を得た。

7. ま と め

図形言語システムの採用により従来のラダー言語による制御プログラムと比較して視覚的認識性を大きく向上させることができた。これにより、制御ロジック検証の効率化を進め、制御プログラムのメンテナンスツールとしての機能を大幅に向上することができた。また、これまで蓄積してきたクレーン制御技術のノウハウを盛り込みかつ荷重演算の高機能化や新しい速度制御方法を組み入れた図形制御ロジックを構築したことでクレーン制御の高機能化を推進することができた。これらは図形化プログラミングの長所を十分に生かすことにより実現できたものである。今回開発した図形言語によるコンテナクレーンの制御システムは今後もたゆまぬ努力を重ね更なる改善を続けていく積りである。

またコンテナクレーン以外のクレーンについても現在、適用開発を推進中であり、これからのクレーン制御の標準システムとして育てていきたい。

参 考 文 献

- (1) 西崎純一ほか, 制御ロジックの図形言語化によるソフトウェア生産性・信頼性の向上, 三菱重工技報 Vol.36 No.2 (1999) p.58