

Automatic Control System for Unloader Operation



兼田 経博

Tsunehiro Kaneda
水島製鉄所 製鉄部製
鉄技術室 主査(課長
補)



細見 和夫

Kazuo Hosomi
水島製鉄所 電気・計装
部電気・計装技術室



深川 卓美

Takumi Fukagawa
水島製鉄所 電気・計装
部電気・計装技術室



石川 裕昭

Hiroaki Ishikawa
水島製鉄所 設備部設
備技術室 主査(樹長)



林岡 卓己

Takumi Hayashioka
川鉄運輸(株) 水島支
店第2 業務部運転整備
課長

1 緒 言

一貫製鉄所最上流に位置し、鉄鉱石・石炭等ばら物原料の荷役プロセスを担うグラブバケット式アンローダは、船型・潮位変動等による外乱要素の多いこと、ロープ系を経由したグラブバケット(GB)の振れのコントロールを要することなどが、自動化への大きな障害となっていた。

アンローダ自動運転の課題は、①GBの振れ止め制御、②GBの船倉内原料面上への軟着地制御、③原料つかみ量制御の三大要素技術に大別できる。この三大要素技術のすべてを開発・実用化した実績は、過去に例がない。またGBの振れ止め制御部分の自動化実施例は、各種報告されているが、そのほとんどが実用化までには至っていない。

しかし当社においては、オペレータ運転負荷の軽減、運転技能の個人差解消、過荷重抑制等、種々の荷役作業改善を目的として、アンローダ自動化要素技術の開発・研究に取り組んできた。その結果、水島製鉄所原料岸壁のロープトロリ式アンローダ(1500t/h)

要旨

水島製鉄所原料岸壁のロープトロリ式アンローダに自動運転制御システムを開発し、実用化に成功した。本システムは、自動運転制御上の課題であるグラブバケットの振れ止め制御・軟着地制御・原料つかみ量制御の三大要素技術から構成され、機能的にも目標の精度・能率を達成している。また、安全・運用面と制御機能との調和を図ることにより、オペレータにとって従来運転と違和感の少ないシステムを構築した。現在、所期の目的とした自動運転率を維持し、オペレータ運転負荷の軽減、運転技能の個人差解消、過荷重抑制等の荷役作業改善に寄与している。

Synopsis:

A newly developed automatic control system has proved successful in the operation of the rope-trolley unloader at the Mizushima raw materials wharf. The system has solved the three basic and inherent technical problems of grab-bucket control in respect of sway-prevention, soft-landing, and accurate grabbing, and has attained high levels of functional accuracy and efficiency as originally aimed. Designed with ample attention paid to the safety and ease of operation, the system provides operators with a minimum degree of difference from the conventional operation.

Automatic operation rate originally planned has been smoothly maintained to date, and the system is contributing to substantial improvement in raw materials unloading operations at the wharf by reducing operators' work load, removing the attention paid to individual skill differences, and preventing excess bucket loadings.

の自動運転制御システムを開発し、実用化に成功した。

本報では、その制御内容と運用実績について述べる。

2 自動化の基本方針とシステム構成

2.1 自動化の基本方針

Fig. 1にロープトロリ式アンローダの機械構成、GB1サイクル工程の運転軌跡を示す。ロープ系を経由したGBが、横行・巻上下・開閉の基本動作をし、通常①～⑤の軌跡によって1サイクルの工程が形成される。自動運転要素技術はFig. 1の軌跡No. に対して次のとおり適用した。

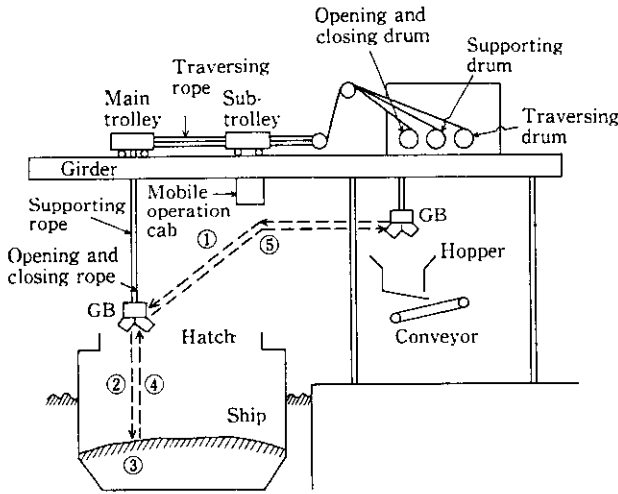
軌跡No. ①, ④, ⑤……GBの振れ止め制御

軌跡No. ②, ③……GBの原料面上への軟着地制御, 原料つかみ量制御

さらに、運用については次の点を基本とした。

(1) 船型・潮位変動による制御上の外乱要素への対応は、オペレータの範囲とする。

(2) (1)への対応のため、自動運転と手動運転の混在運転を可能



- Operation
- ①……GB open ~ Traversing to sea ~ Lowering start
 - ②……Traversing stop ~ Lowering stop
 - ③……GB closing
 - ④……Hoisting start ~ Traversing to land
 - ⑤……Hoisting stop ~ Traversing stop

Fig. 1 Unloader structure and grab bucket (GB) operation

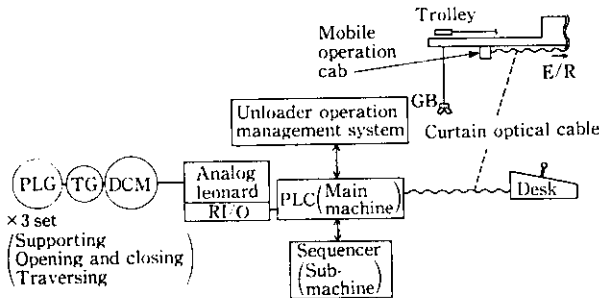


Fig. 2 Control system configuration

とする。

(3) GB と船との接触を防止するための安全確保は十分に行う。
すなわち、全工程の自動運転を可能とするが、部分的工程の自動運転も可能とし、オペレータにとって違和感の少ない運転形態とすることを要素技術と併せ自動運転システム開発の基本方針とした。

2.2 システム構成

Fig. 2 にシステム構成を示す。主に、アナログサイリスタレオナード、自動運転の制御処理を行う PLC (Programmable Logic Controller: 実装容量 13 kW, 処理時間 50 ms), 運転実績 (荷役能率, 自動運転率, つかみ量分布) のデータ処理を行うアンローダ作業管理システムにより構成している。

3 自動運転の要素技術

3.1 グラブバケットの振れ止め制御

自動運転の中核をなす GB の振れ止め制御は、最適制御理論に基づくプログラム制御を基本として開発し、荷役能率を確保するため、海側の横行と巻上下の複合動作時における振れ止め制御も可能

とした。

GB で原料をつかんだ後の初期振れの防止対策についても開発を行った。

3.1.1 振れ止め制御方式の選定

天井クレーンに見られる機械式ロックを除いた吊荷の振れ止め方式は、大別するとフィードバック制御とプログラム制御の二つに分けられる。フィードバック制御の不可欠の要素である吊荷の振れ角検出が、アンローダでは困難であるため、本自動化においてはプログラム制御の短所である初期振れの防止対策を考案した上で、振れ角センサーが不要かつ短時間制御が可能なプログラム制御方式を採用した。

3.1.2 プログラム制御の展開

Fig. 3 のクレーン模式図において、(1) 式の運動方程式が成立する^{1,2)}。

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{l}(\alpha - 2\dot{l}\dot{\theta} - g\theta) \dots\dots\dots (1)$$

すなわち、プログラム制御は横行加速度 α を制御することによって振れ角 θ を制御する。(1) 式を最短時間制御の評価関数

$$J = \int_{t_i}^{t_f} 1 dt \dots\dots\dots (2)$$

J : 評価関数

t_i : 初期時間

t_f : 最終時間

により展開すると α の切替パターンは Fig. 4 に示す 2 種類の Bang-Bang 型の切替パターンとなることが一般的に知られている³⁾。Fig. 4 において、タイプ 1 は横行目標位置到達時点で吊荷の振れを止めるパターン、タイプ 2 は最大横行速度到達時点で吊荷の振れを止めるパターンである。本自動化ではタイプ 2 を採用した。その横行速度パターン、 $\dot{l}=0$ での振れの状態推移および位相軌跡を Fig. 5 に示す。

ここで、振れの位相軌跡について解説する。 $\dot{l}=0$ として (1) 式

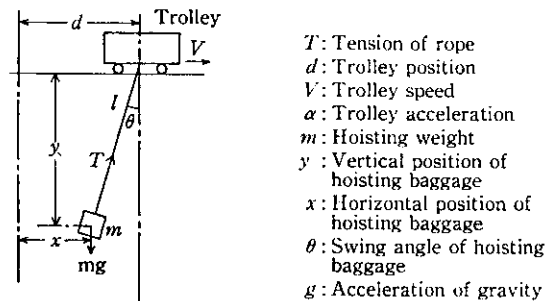


Fig. 3 Crane model

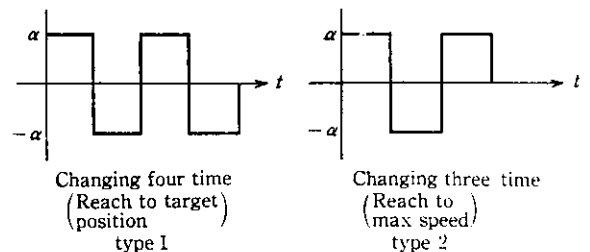


Fig. 4 “ α ” changing pattern for swing prevention

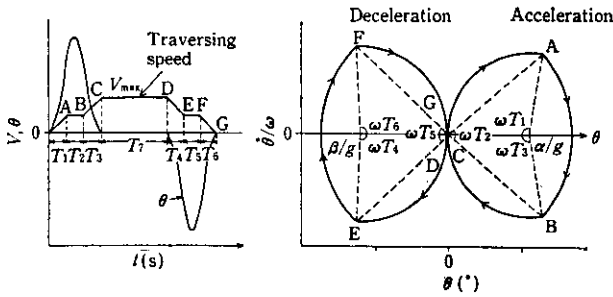


Fig. 5 Transition of swing condition and phase trace

を積分すると (3) 式が得られる。

$$(\theta - \alpha/g)^2 + \dot{\theta}^2/\omega^2 = \text{const} \dots \dots \dots (3)$$

$$\omega = \sqrt{g/l}: \text{振り子系の固有周期}$$

すなわち、 $(\theta - \dot{\theta}/\omega)$ の位相平面上では、 $(\alpha/g - 0)$ を中心とし ω の速度で移動する円を描く。したがって、位相平面上の軌跡が原点に戻る $\alpha(V)$ の切替パターンとすれば振れ止めが可能を示している。Fig. 5 の加速側においては $A \rightarrow B \rightarrow C$ 、減速側においては $D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ の軌跡を描き、加減速終了時点の振れを収束させている。その解の切替条件を (4) および (5) 式に示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{加速側} \quad & \omega T_1 + \omega T_2 = \pi \\ & 2\alpha T_1 = V_{\max} \\ & T_1 = T_3 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{減速側} \quad & \omega T_4 + \omega T_5 = \pi \\ & 2\beta T_4 = V_{\max} \\ & T_4 = T_6 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここで

- α : 横行加速度
- β : 横行減速度
- V : 横行速度
- $T_1 \sim T_6$: 切替時間

なお、タイプ 2 の選定理由は

- (1) つかみ位置 (横行目標位置) の変更に対する制御の容易さ
横行最大速度 V_{\max} の時間を制御することにより、つかみ位置の変更に対応できる。
- (2) 後述するシミュレーションでの解析の容易さを目的としている。

3.1.3 シミュレーション

これまでの展開はロープ長一定 ($i=0$) を前提としている。ロープ長が振れ止め制御中変化すると (1) 式が非線形となり、解の理論解析が非常に困難となる。しかし、海側での横行と巻上下の複合動作は、荷役能率上不可欠である。これに対しては、(1) 式をモデルとしたシミュレーションを行い、最適解を導出することに成功した。

シミュレーションの目標および前提は次のとおりである。

- (1) 海側ロープ長 l_1 、陸側ロープ長 l_2 の任意の組み合わせに対し、最適な振れ止めパターンが簡易に設定でき、実用範囲の振れ角 2° (ロープ長 30 m にて振れ幅約 ± 1 m) に収める。
- (2) 加減速時間は設備上許容できる最短時間とし、オペレータと同等の荷役能率を確保する。
- (3) 初期振れの発生については考慮しない。

3.1.4 シミュレーション結果

海側の $i \neq 0$ のケースについては、Fig. 5 における T_2 または T_5 を海側ロープ長 l_1 と陸側ロープ長 l_2 の関数、 $T_2 = f_1(l_1, l_2)$ 、 $T_5 = f_2(l_1, l_2)$ として表す演算式を導出した。その結果、任意のロー

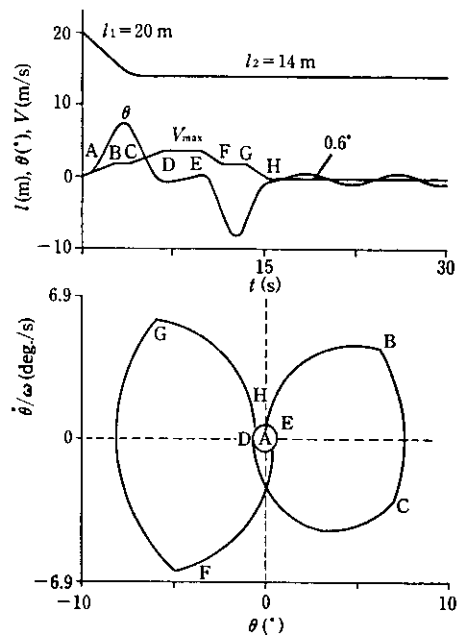


Fig. 6 Example of simulation of swing prevention

プ長およびロープ長差に対して、実用範囲内の振れに収束させることが可能である。シミュレーション結果の一例を Fig. 6 に示す。ロープ長変動の影響により、位相軌跡は制御終了時に原点に戻らないが、実用可能範囲の振れに収束している。

この結果から、振れ止め基本手法は次のとおりとした。

- (1) 海側 ($i \neq 0$)
シミュレーション結果に基づく演算式から、最適な振れ止め加減速パターンを形成する。
- (2) 陸側 ($i = 0$)
(4) および (5) 式を基本とした振れの位相軌跡からの理論式より、最適な振れ止め加減速パターンを形成する。

3.1.5 実機調整結果

実機では駆動系の遅れなどにより、速度指令と完全に一致する動作とはならない。その補正および実機とシミュレーションとの差異を検証するため、Fig. 5 での T_2 および T_5 の値を変更し、振れ方と振れ幅を分析した。その結果、 T_2 および T_5 の値を、海側はシミュレーション値、陸側は理論値に近づけると、振れ幅抑制につながる知見を得た。調整後、最終振れ幅は ± 50 cm 以下の制御精度を達成している。

3.1.6 その他制御内容

プログラム制御方式の GB 振れ止め制御を実機にて実用化するため、以下の制御の開発を行った。

- (1) 初期振れ抑制制御
トロリと GB の相対位置が鉛直とならない船倉内に着地した時、GB 閉動作時におけるトロリと GB 間の開閉ロープのテンションを利用し、トロリを GB の鉛直上に移動させる。これによって船倉内から GB を巻き上げる時の初期振れを抑制している。
- (2) 横行位置決め制御⁴⁾
振れ止めの加減速パターンを時間で制御した場合、実機では速度偏差の累積による横行停止位置の誤差が発生する。それを補正するため Fig. 5 における横行速度の切替点 A ~ F を、あらかじめ計算された位置で切り替える制御を行っている。横行停止位置精度は目標 ± 10 cm 以内であった。

(3) GB 重心位置補正制御

GB 開閉時の重心変化を考慮し、振れ止め制御演算用ロープ長の補正を行っている。

3.2 定格つかみ制御

GB の原料面上への軟着地制御、原料つかみ量制御を、著者らは定格つかみ制御と名付け、その開発を行った。その基本的な考え方を Fig. 7 に示す。定格荷重以上の過荷重比率を抑制して、アンローダの機械装置を保護し、かつ平均つかみ量を定格荷重近傍として荷役能率を向上させることを目的としている。

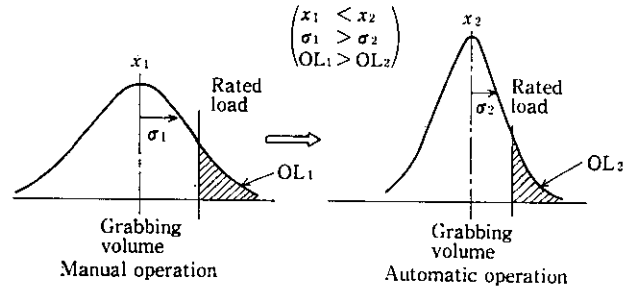


Fig. 7 Distribution of grabbing volume

3.2.1 グラブバケット軟着地制御

(1) 巻下速度パターンを設定

着地検出後の巻下減速停止中に発生する支持・開閉ロープのたるみ量を少なくすること、荷役能率を損なわないことの二つの観点より、最高速度で巻き下げ、減速点通過後 20% 速度に減速し、着地検出後減速停止させるパターンとした。

(2) 着地検出方法^{3),6)}

支持・開閉ロープにかかる荷重変化を歪みゲージによって検出する方法、制動中の電流増減の影響を除去した負荷電流の着地による変化を検出する方法の二つを開発した。測定チャートの一例を Fig. 8 に示す。目視の着地点に対して、100 ms 以内の誤差で両者検出しており、オペレータと同等の着地検出を達成している。

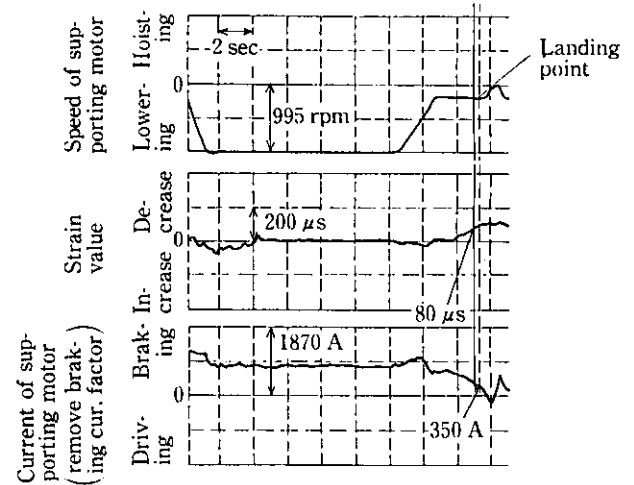


Fig. 8 Example of landing detection chart

(1) (2) を Fig. 1 の軌跡 No. ② に適用し、GB の軟着地制御を行っている。

3.2.2 原料つかみ量制御方法⁷⁾

原料つかみ中の支持ロープのゆるめ動作をシンキング (沈み) と称し、この動作により GB が閉動作と共に原料内に沈み、十分な量の原料をつかんでいる。この沈み量を自動制御することによりつかみ量の制御に発展させた。制御の全体構成図を Fig. 9 に示し、その特徴について以下述べる。

- (1) 一定速度巻き上げ中の支持・開閉電流からつかみ量を求め、過去数回分のシンキング制御後の平均つかみ量と目標つかみ量との偏差より、原料の特性に応じたシンキング量を補正する大きなループの PI 制御によって構成した。いわゆる、長いスパンでの全体的なつかみ量のバラツキを抑えることをねらいとしている。
- (2) 制御状況・実績はアンローダ作業管理システムにて監視可能とし、制御の良否判定と調整を容易とした。

4 安全対策

アンローダにおいては、潮位変動、船型の違い、GB の慣性等により、絶対的な安全位置あるいは処置方法がない。よって自動運転の実施に際しては、安全確保に細心の配慮を払っている。安全確保のためのソフト、ハードおよびオペレータの分担概念図を Fig. 10 に示す。

基本分担は次のとおりである。

- (1) 各自動機能における制御上の合理性監視, 異常検出
..... PLC ソフト処理

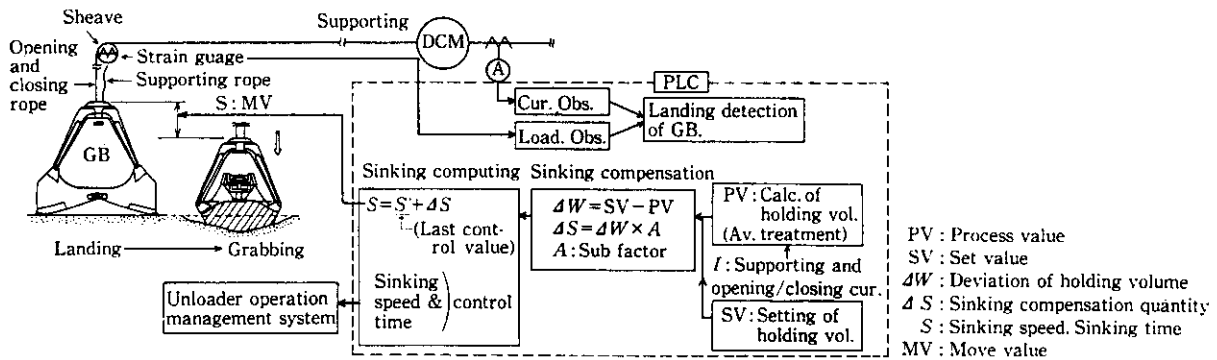


Fig. 9 Total flow of controlling grabbing volume

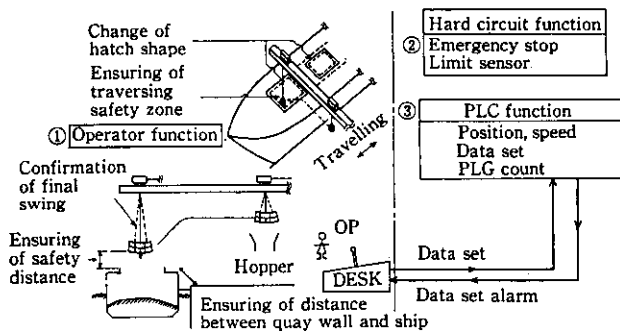


Fig. 10. Safety measures (①~③) for unloading operation

- (2) 非常停止, 極限 LS 等の信号処理……………ハード回路処理
- (3) 船型・潮位変動等のアンローダ特有の外乱要素, GB 振れに対する最終判断……………オペレータ

自動運転を実行するための安全な目標三次元位置は, 船の高さおよびハッチ寸法に応じてオペレータが設定する。その設定データに基づき PLC は制御を実行するとともに, GB の位置・速度のトラッキング等の制御の合理性判定を行う基本分担をとっている。

前述のトラッキング監視による制御の間接的な判定後(制御終了時点), 振れ状態の最終判断はオペレータとなる。よって船との接触防止が問題となる自動運転の重要ステップ (Fig. 1 の軌跡 No. ①→②の移行部分, ④)は, 安全確認後の自動運転継続操作なしでは, 次ステップに移行しない対策を講じている。

また, 緊急時の安全確保のため, 自動運転中においても手動操作介入が可能かつ最優先の制御構成としている。

すなわち, PLC ソフト, ハード回路およびオペレータの三者相互分担によって全体の安全確保を図ることを基本思想としている。これらの安全対策を実施することにより, 制御, 安全および運用面でのバランスの取れたシステムの構築を図った。

5 運用実績

自動運転の運用から約1年経過した現状における平均的な運転実績を Table 1 に示す。サイクルタイムに若干の遅れはあるものの, つかみ量の制御結果は手動運転と比較して良好な結果を示してお

Table 1 Operation results of rope-trolley unloader at Mizushima raw material wharf

		Automatic operation	Manual operation
Cycle time	(s)	64.6	61.6
Grabbing volume*1			
Average	(t/once)	19.7	18.6
Over rate	(%)	22.7	27.8
Deviation	σ (t)	4.1	6.2
Availability	(%)	64.0	36.0

*1 Target 20 t/once

り, 自動運転率についても計画どおりの実績を維持している。

6 結 言

水島製鉄所原料岸壁のロープトロリ式アンローダ (1500 t/h) に自動運転制御システムを開発し, 実用化に成功した。本システムはグラブパケット (GB) の振れ止め制御, GB の軟着地制御および原料つかみ量制御の三大要素技術から構成されており, 全工程の自動運転および部分的自動運転を可能とした。自動運転の要素技術として次の成果を収めた。

- (1) GB の振れ止め制御は, 最適制御理論を基本としたプログラム制御で構成し, 理論解析が困難な海側の横行と巻上下の複合動作時に対しても振れ止め制御を可能とし, 振れ幅 ± 50 cm 以内の精度を達成した。また, 横行の位置制御は目標に対し ± 10 cm 以下の精度に収めた。
- (2) GB の軟着地技術は, 着地検出技術と巻下速度パターンの組み合わせにより構成し, オペレータと同等の結果を得た。
- (3) 原料つかみ量制御は, GB の沈み (シンキング) 量を支持ロープの繰り出し量で制御し, 目標の定格荷重近傍のつかみ量とする。これによって, 過荷重とつかみ量のバラツキ低減および平均つかみ量の増大が可能となった。

現在, 所期の目的とした自動運転率を維持し, オペレータ運転負荷の軽減, 運転技能の個人差解消, 過荷重抑制等の荷役作業改善に寄与している。今後, 他のアンローダあるいは製品クレーンへの適用が期待される。

参 考 文 献

- 1) 吉木堅一: 機械の研究, 23 (1971) 1, 40
- 2) 後藤次巨, 久良修郭: 「グラブパケット式アンローダの振れ止め制御」, 安川電機, 37 (1973), 148
- 3) 光岡豊一, 林 和彦: 「天井クレーン型搬送装置の制御技術の研究」, 機械技術研究所研究発表会, (1981)
- 4) 旧新栄太郎, 荒川栄一: 「天井クレーンの振れ止め制御」, 住友重機械技報, 31 (1983), 7
- 5) 川崎製鉄(株): 特公昭 62-22917
- 6) 川崎製鉄(株): 特公昭 62-47791
- 7) 川崎製鉄(株): 特公昭 59-39016