フローティング機能を備えたロール機用安全システムの開発*

梅崎重夫^{*1}, 清水尚憲^{*1}, 小林茂信^{*1}, 井土伸彦^{*2}
中村英夫^{*3}, 三平律雄^{*4}, 山下昌弘^{*4}, 鷺崎一郎^{*5}The Development of Safety System for the Rollermill
with the Floating FunctionShigeo UMEZAKI^{*6}, Shoken SHIMIZU, Shigenobu KOBAYASHI,
Nobuhiko IDO, Hideo NAKAMURA, Ritsuo MIHIRA,
Masahiro YAMASHITA and Ichiro WASHIZAKI^{*6} National Institute of Industrial Safety, 1-4-6 Umezono, Kiyose-shi, Tokyo, 204-0024 Japan

In the rollermill used in the industrial field, the worker does not stop the roll and often carries out supplies of sheets and cleaning of the roll. Safety measures by fence or enclosure were difficult for such works, as the worker approaches the rollermill very closely. A new safety system with the floating function was developed in this study to solve these problems. It permits the running of the roll only when the blinded light beam number is less than the set number, and the roll stops when the condition except for it. The safe work became possible not only in automatic operation but also supplies of sheets and cleaning of the roll. It also realized the fail-safe floating control equipment, fail-safe rotational speed monitor and fail-safe safety distance monitor by the diversity controller with the self-checking function. Experimental results are described as follows; 1) The smallest detection diameter M was expressed by $M=bF+\phi_m$, where F is the floating light beam number, b is the interval of the optic axis and ϕ_m is the physical resolution of the photo-electric sensor. 2) The detection of the human body was possible when the sheet was bent or the human body was hidden in the blind area of hand tool.

Key Words: Safety, Safety Control, Floating, Rollermill, Fail-Safe, Diversity, Self-Checking

1. 緒言

産業現場で使用されるロール機には、シートなどの材料をロールが自動的に巻き取る方式がある。この設備の災害防止対策では、柵や囲いの設置によって作業者がロールに巻き込まれないようにする方式が基本である。しかし、現実には、作業者がロールを止めずに行う危険点近接作業（ロールに近接した状態で行う材料の供給や清掃など）があり、柵や囲いの設置が困難である場合も多い。

このため、従来より、柵や囲いに代わるものとして透過形の光線式安全装置の使用が検討されてきた。しかし、光線式安全装置は人体だけでなくシートにも感応するために、当該装置の使用は不可能であった。そこで、本研究では、以上の問題点の解決を目的として、後述するフローティング機能を備えたロール機用の安全システムを開発した¹⁾。

2. フローティングの定義

「フローティング」とは、光線式安全装置の特定光軸の無効化に関連した用語である。この機能を応用して作業者の安全を確保するシステムが「フローティングシステム」である。これは、製品によって遮光された光軸数があらかじめ設定された数（以下「フローティング光軸数」と呼ぶ）以下のときにロールを運転させ、それ以外のときはロールを停止させる機能を持つ（図1参照）。

また、図2のように複数の物体によって光軸が遮光されたときは、図のフローティング開始光軸からフローティング終了光軸までの光軸数が所定の値以内であるときに限ってロールを運転させ、それ以外のときはロールを停止させる機能を持つ。

3. ロール機における安全の条件

一般の機械では、機械の危険な可動部の停止によって作業者の安全を確保する。しかし、ロール機では、材料の供給や清掃などの危険点近接作業が存在するために、ロールを停止させた状態で作業を行うのが困難な場合もある。そこで、ロール機で行われる作業毎に以下の対策を実施した（表1参照）。

1) 自動運転

* 原稿受付 2001年10月22日。

^{*1} 正員、独立行政法人産業安全研究所(〒204-0024 清瀬市梅園1-4-6)。^{*2} 日本大学大学院(〒103-0074 東京都千代田区九段南4-8-24)。^{*3} 日本大学理工学部(〒274-8501 船橋市習志野台7-24-1)。^{*4} ピルツジャパン(株)技術部(〒222-0033 横浜市港北区新横浜3-20-5)。^{*5} 住友化学工業(株)生産技術センター生産加工技術グループ所属(〒792-0001 新居浜市惣開町5-1)。

E-mail: umezaki@anken.go.jp

Fig. 1 Safety system for the rollermill with the floating function.

この運転モードでは、作業者がロールに接近することなくシートの巻き取りを自動的に行う。そこで、運転中のロールに作業者が不用意に接近したときは直ちにロールを停止できるように、図3に示す安全距離Rの位置にフローティング機能を備えた光線式安全装置を設置した。

具体的には、フローティング光軸数Fとシートによる遮光光軸数Nが $N \leq F$ の関係にあるときは、光軸を遮光しているのはシートだけと判断してロールを運転させる。一方、 $N > F$ となったときは、人体が進入したと判断してロールを停止させる。

なお、本システムでは、シートの傾きや撓みによる光軸の遮光を考慮し、 $N \leq 1$ のときにロールを運転させ、 $N > 1$ のときにロールを停止させる構成とした。

2) シートの供給作業

この運転モードでは、作業者はシートを両手で保持しながら、ロールにきわめて接近した状態でロールを低速にしてシート送りを行う。

具体的には、図3に示す安全距離rの位置に、フローティング機能を備えた光線式安全装置を設置する。これにより、万一シート送りに人体がロールに接近し過ぎたときは、光線が遮光されて直ちにロールが急停止するため、作業者の安全を確保できる。

ここでは、シートの傾きや撓みによる光軸の遮光(後

Fig. 2 The shading of the light beam by multiple objects.

Table 1 The safe condition of the rollermill.

Division	The safe condition			
	The relation between N and F		Safety distance D	Condition of the roll
Automatic operation	N ≤ F	N ≤ 1	D ≥ R	High speed
Supply of the sheet		N ≤ 1	D ≥ r	Low speed
Cleaning of the roll		N ≤ 2	D ≥ r	Inversion low speed

Fig. 3 The safety distance of photo-electric sensor.

4.3 回転速度監視装置 本システムでは、ロールを低速とすべきときに誤って高速としてはならない。このため、ロールの回転速度と回転方向を監視するタコジェネレータ（以下「TG」と略記する）を設け、安全確認を行っている。

この装置では、TG内部の断線や、TGとPLCを結合する配線の断線、ロールとTGの間を機械的に結合するベルトの切断・脱落などが発生すると、ロールを低速とすべきときに誤って高速とする可能性がある。そこで、次の対策を実施した（図5参照）。

- ① TGと直列にオフセット電源Eを接続する。
- ② TG出力電圧 V_{TG} とオフセット電源電圧 V_{OF} の両方を常時監視する。
- ③ ベルトの切断・脱落などがないように、TGの駆動軸をロールの回転軸に直結する。

図6に、速度監視の条件を示す。ここでは、オフセット電圧を5Vとし、ロールが正転方向に低速回転するときは+1V、正転方向に高速運転するときは+2V、逆転方向に低速回転するときは-1V、逆転方向に高速運転するときは-2VがTGから発生するようにした。これにより、TGの正常時は出力電圧が3Vから7Vの範囲となるのに対し、TGの故障（断線）

Fig. 5 The composition of the monitor of rotation speed and direction.

Fig. 6 The monitoring of rotation speed.

時は出力電圧が0Vとなるため、両者を区別できる。

4.4 安全距離監視装置 本システムでは、光線式安全装置の安全距離が所定の距離以上確保されていることを、非接触式のパワーリードスイッチを使って確認している。しかし、この構成では、パワーリードスイッチの接点に接触不良や溶着が起こったり、作業者が磁石などを使って接点を意図的にオンすると、安全距離の監視が正しく行われなことがある。そこで、パワーリードスイッチの二重化と不一致検出を行い、この問題の解決を図った。

図3に、本研究で提案するパワーリードスイッチの配置図を示す。ここでは、スイッチ1と2を高速運転許可スイッチ、スイッチ3と4を中間位置確認スイッチ、スイッチ5と6を低速運転許可スイッチとし、この3種類のスイッチのオン/オフ状態によってロールを高速・低速・停止のいずれとすべきかを決定する。また、スイッチを左右に2個ずつ配置し、スイッチ1と2、スイッチ3と4、及びスイッチ5と6の不一致検出によって、スイッチの接点に接触不良や溶着が起こっていないかを確認する。

5. 実験装置及び実験方法

5.1 実験装置 図7に、本研究で使用した実験装置の外観を示す。実験に使用した光線式安全装置は、ドイツ・ジック社製のFGS300シリーズで、防護高さ300mm、光軸間隔7.5mm、連続遮光幅（補足1参照）14mmである。フェールセーフな汎用安全コントローラには、ドイツ・ピルツ社製のPSS3100を使用した。これによって、安全リレーを介することなくコンタクタを直接駆動している。

速度検出用のタコジェネレータには、山洋電気製の11-TG1を使用した。また、光線式安全装置の安全距離の検出には安川コントロール製のパワーリードスイッチR15を使用した。なお、実際の装置では、モータの回転速度を高速/低速で制御するためにインバータを使用し、インバータの二次側を直接コンタクタで遮断する階層化安全制御方式⁹⁾としている。

5.2 実験方法

1) 検知空間における最小検出径の計測実験

この実験では、光線式安全装置のフローティング光軸を0（プランキング光軸なし）から10光軸まで変化させて、そのときの最小検出径を計測する。ここで、最小検出径とは、作業者の指を模擬した丸棒で図1に示す検知空間の全域を走査し、このときにすべての光軸を完全に遮光できる丸棒の最小径である。

Fig. 7 The appearance of the safety system.

2) シートによる遮光光軸数の計測実験

この実験では、表2に示した材質・厚さ・色などが異なるシートをロールに供給した状態で、シートを上下に振らしたり、撓ませたり、傾けたりして、そのときの遮光光軸数の最大値を計測する。

3) 丸棒による遮光光軸数の計測実験

この実験では、人体を模擬した標準部材として直径が10φから50φの丸棒を使用したときの遮光光軸数を計測する。

4) 手工具による遮光光軸数の計測実験

この実験では、作業者が表3に示したドライバー、ニッパ、ペンチ、ブラシ及びスクレーパを持って進入したときの遮光光軸数の最大値を計測する。ただし、手工具は通常想定される方法で進入させるものとする（具体的には、ブラシを逆方向としたり、スクレーパを垂直にしたりしないことを言っている）。

5) シートと人体が一緒に進入したときの検出実験

この実験では、作業者が表2に示したシートを持って進入したときの人体検出状況を観察する。また、既に送給中のシートの上側または下側に人体が進入したときの人体検出状況を観察する。

6) 丸棒と人体が一緒に進入したときの検出実験

この実験では、作業者が丸棒を持って進入したときの人体検出状況を観察する。この場合、人体が光線式安全装置の死角となる位置（丸棒の左側方または右側方）から進入したときの検出状況も併せて観察する。

7) 手工具と人体が一緒に進入したときの検出実験

この実験では、作業者が表3に示したドライバー、

ニッパ、ペンチ、ブラシ及びスクレーパを持って進入したときの人体検出状況を観察する。

8) 複数の丸棒が一緒に進入したときの検出実験

この実験では、複数の丸棒で検知空間を走査したとき（人間の指が検知空間に進入するときは、このような状態となることもある）の検出状況を計測する。

6. 理論値の推定

実験を行うにあたっては、前述した最小検出径と遮光光軸数の理論値を明確にしておく必要がある。以下、前記1)～3)の各実験毎に理論値を推定する。

1) 検知空間における最小検出径の理論値

この実験では、フローティング光軸を設けていないときの最小検出径は、光線式安全装置の連続遮光幅の公称値14mmと考えられる。また、フローティング光軸を設けたときの最小検出径は、フローティング光軸が一光軸ずつ増える毎に光軸間隔（公称値7.5mm）ずつ増加していくと考えられる。

そこで、フローティング光軸数がFのときの最小検出径Mは次式で計算できると仮定した。

$$M = bF + \phi_M \quad (1)$$

ただし、bは光線式安全装置の光軸間隔、 ϕ_M は連続遮光幅である。

2) シートによる遮光光軸数の理論値

この実験では、シートの厚さが連続遮光幅 ϕ_M 以内のときは遮光光軸数は0と考えられる。一方、シートの厚さが連続遮光幅を越えるときは、厚さが光軸間隔

(7.5 mm) 分増大する毎に、遮光光軸数は一光軸ずつ増大すると考えられる。そこで、シートの厚さがTのときの遮光光軸数Nを次式と仮定した。

$$N = \text{INT} [((T - \phi_m) / b) + 1] \quad (2)$$

ただし、 ϕ_m は光線式安全装置の連続遮光幅、bは光軸間隔である。また、INTは[]内の小数点以下の数値を切り捨てる処理を行う関数である。

3) 丸棒による遮光光軸数の理論値

同様に丸棒の直径をRとすると、遮光光軸数Nは次式で計算できる。

$$N = \text{INT} [((R - \phi_m) / b) + 1] \quad (3)$$

Table 2 Various types of sheets and experimental result.

No	Material	Thickness (mm)	Color	N
(a)	Polyethylene	0.05	Transparent and white	0
(b)	Vinyl chloride	0.5		0
(c)		1.0	Transparent and wine color	0
(d)	Polyvinyl acetate	0.18	Transparent and black	0
(e)	Vinyl chloride	0.2	Black	1
(f)		0.5		0
(g)	Urethane	9		7

Table 3 Various types of hand tools and experimental result.

No	Type	The diameter of the pattern (mm)		Overall length (mm)	N
		Max	Min		
(a)	Driver with the transparent pattern	19	18	152	1
(b)	Driver with the opacity pattern	23	22	215	3
(c)	Nippers	11	9	153	5
(d)	Pair of cutting pliers	17	12	214	6
(e)	The wire brush	36	23	318	3
(f)	The brush	18	7	320	2
(g)	The scraper	60	1.5	178	1

7. 実験結果と考察

7.1 実験結果

1) 検知空間における最小検出径の計測結果

図8に実験結果を示す。予想通り、丸棒の最小検出径は(1)式に従って計算できることが判明した。

2) シートによる遮光光軸数の最大値の計測結果

表2に実験結果を示す。予想に反して、黒色など色の濃いシートの場合、厚さが薄いほど遮光光軸数が多くなった。これは、薄いものほどシートの撓みが多く、これが数多くの光軸を遮光するためである。

これに対し、透明や半透明のシートは光を透過してしまうため、遮光光軸数はシートの厚さや撓みなどに依存しなかった。従って、これらの点を考慮してフローティング光軸数を設定する必要がある。

3) 丸棒による遮光光軸数の計測結果

図9に実験結果を示す。予想通り、丸棒が遮光する光軸数は(3)式に従って計算できることが判明した。

4) 手工具による遮光光軸数の最大値の計測結果

表3に実験結果を示す。当初、この実験では、柄が透明なドライバーは光を透過してしまうために遮光光軸数を0と推定した。しかし、実際には、ドライバーを回転させると、柄の中心で起こる光の乱反射や柄の汚れのために、遮光光軸数は0とならなかった。

また、当初、柄の直径が連続遮光幅より小さいニッパやペンチなどは、遮光光軸数を0と推定した。しかし、実際には、2本の柄が同時に検知空間内に進入すると、図2に示す関係から、2本の柄の間はすべて遮光物体と見なされ、遮光光軸数が5や6にもなった。

これに対し、通常使われているブラシやスクレーパは、通常作業時の方向から進入させれば遮光光軸数は

Fig. 8 The experimental result of smallest detection diameter in the detection space.

1 または 2 の範囲内に収まることが確認できた。

5) シートと人体と一緒に進入したときの検出結果

表 4 に実験結果を示す。この実験では、作業者が色の濃い（黒色等の）シートを持って進入したときは、人体がシートの陰に隠れるという問題が認められた。この傾向は、厚さの薄い柔らかいシート（表 2 の (e), (g) 等）で特に顕著であった。しかし、この場合でも、作業者は必ずシートを下側から支えるために、人体を検出できないという問題は生じなかった。

6) 丸棒と人体と一緒に進入したときの検出結果

この実験では、人体の幅が丸棒の直径より小さいときは丸棒の死角に人体が隠れるという問題が認められた。しかし、このような場合でも、必ず（丸棒が遮光する光軸数）>（人体が遮光する光軸数）となるため、人体を検出できないという問題は生じなかった。

7) 治工具と人体と一緒に進入したときの検出結果

表 4 に実験結果を示す。この実験でも、人体の進入時は必ず光軸を遮光するため、人体を検出できないという問題は生じなかった。

8) 複数の丸棒と一緒に進入したときの検出結果

実験の結果、複数の物体が光軸を遮光したときは、図 2 に示すフローティング開始光軸からフローティング終了光軸までの光軸数が所定の値以内であるときに限って運転許可信号を発生し、この値を越えたときは運転許可信号が停止することが確認できた。

7.2 考察

7.2.1 安全距離の検討

1) シート送給時におけるシステムの運用条件

本システムでは、ロールの挟圧危険点と光線式安全装置の設置位置が十分離れていないと、人体が光線を遮光してからロールが停止するまでの間に挟まれ災害が発生することがある。そこで、人体とロールの間に

所定の離隔距離（安全距離）を設けた。この距離は、IEC62046⁴⁾によれば次式で計算できる。

$$D = 2(T_L + T_s) + 8(M - 14) \quad (4)$$

ただし、 D は安全距離 (mm)、 T_L は光線式安全装置の応答時間 (ms)、 T_s はロールの急停止時間 (ms)、 M は最小検出径 (mm) である。

ここで、(4)式に(1)式を代入し、光線式安全装置の光軸間隔を 7.5 mm、連続遮光幅を 14 mm、応答時間を 30 ms とすれば、(4)式は次式となる。

$$D = 2T_s + 60F + 60 \quad (5)$$

(5)式は、フローティング光軸数 F と急停止時間 T_s がいかなる値であっても、安全距離 D さえ十分確保できれば災害が発生しないことを示している。しかし、現実には、安全距離が長くなるとシートが弛み、送給困難になる。そこで、安全距離の上限を 200 mm とした。これより、システムの運用条件は次式となる。

$$T_s + 30F \leq 70 \quad (6)$$

従って、仮に Table 1 にしたがって $F = 1$ とした場合は、ロールの急停止時間の許容最大値は 40 ms となり、ロールの回転速度はきわめて低速に限られる。

2) ロールの清掃作業時におけるシステムの運用条件
この作業では、清掃用手工具の全長に限度があるため、安全距離は最大でも 300 mm 程度が限度と考えられる。このとき、システムの運用条件は次式となる。

$$T_s + 30F \leq 120 \quad (7)$$

従って、仮に表 1 にしたがって $F = 2$ とした場合、ロールの急停止時間の許容最大値は 60 ms となり、ロールの回転速度は比較的低速に限定される。

一方、手工具の工夫によって安全距離を 400 mm 程度まで延長できた場合は、システムの運用条件は

$$T_s + 30F \leq 170 \quad (8)$$

となる。この場合、 $F = 2$ とするとロールの急停止時間の許容最大値は 110 ms であり、ロールの高速運転

Fig. 9 The experimental result of shading light beam number by round bar.

Table 4 Experimental result of detection situation.

N o	The object	Detection situation
1	Human body and the sheet	The human body is hidden in the blind area of the sheet. However, it can be always detected in this case, because the sheet blinds the light beam certainly.
2	Human body and the hand tool	The human body is hidden in the blind area of the hand tool. However, it can be always detected in this case, because the blinded light beam number by the hand tool is larger than that of human body.

も可能である。

3) 自動運転時におけるシステムの運用条件

このモードでは、作業者が介在しないために安全距離を十分大きくとることができる。よって、ロールの高速運転も可能である。

7.2.2 人体検出の確実性の検討 本システムでは、作業者が色の濃い（黒色等の）シートを持って進入したときは、人体がシートの陰に隠れるという問題が認められた。しかし、このような場合でも、作業者がシートを下側から支えたときは必ず光軸を遮光するため、人体を検出できないという問題は生じなかった。

また、人体の幅が丸棒の直径より小さいときは丸棒の死角に人体が隠れるという問題が認められた。しかし、このような場合でも、必ず（丸棒が遮光する光軸数）>（人体が遮光する光軸数）となるため、人体を検出できないという問題は生じなかった。

以上の点からも、本システムは人体検出に関して確実性を持っていると言える。

7.2.3 手工具の選定 (8)式を満足させるには、遮光光軸数を $F \leq 2$ としなければならない。しかし、実験の結果、ニッパ、ペンチ、柄が不透明なドライバーなどの手工具は遮光光軸数が多くなるため使用に適さないことが判明した。したがって、手工具としては、ブラシ、スクレーパ、柄が透明のドライバーなどを使用する必要がある。

7.2.4 他の速度監視方式の検討 本システムでは、ロールの回転速度と回転方向の監視にTGと直流電源を直列接続した方式を採用している。しかし、この方式では、TGの出力端子間の短絡が起これると、高速を誤って低速と通報する場合がある。

また、ロール機の構造によっては、TGをロールの軸に直結できない場合も多い。そこで、ロールの軸とTGを歯付きのタイミングベルトで結合するとともに、TGの二重化と不一致検出を行う方式も併せて検討している。

8. 結言

産業現場で使用されるロール機の災害防止対策として、光線式安全装置の使用が検討されている。しかし、光線式安全装置は人体だけでなく製品にも感応してしまうために、当該装置の使用は不可能であった。そこで、本研究では、製品によって遮光された光軸数があらかじめ設定された数以下のときに限ってロールの運転を許可するフローティングシステムを開発した。

これによって得られた成果は次の通りである。

- 1) ロールの自動運転時だけでなく、シートの送給やロールの清掃も考慮した安全システムを構築できた。
- 2) 異種冗長化と自動監視を備えた汎用安全コントローラを用いて、フェールセーフなフローティングシステムを実現した。
- 3) 上記のコントローラを応用して、フェールセーフな回転速度監視装置や安全距離監視装置を実現した。
- 4) フローティング光軸数がFのときの最小検出径Mは、光線式安全装置の光軸間隔をb、連続遮光幅を ϕ_M とすると、 $M = bF + \phi_M$ となることが判明した。
- 5) 作業者が色の濃い（黒色等の）シートを持って進入したときは、人体がシートの陰に隠れるという問題が認められた。しかし、このような場合でも、作業者がシートを下側から支えたときは必ず光軸を遮光するため、人体を検出できないという問題は生じなかった。
- 6) 人体の幅が手工具の直径より小さいときは手工具の死角に人体が隠れるという問題が認められた。しかし、このような場合でも、必ず（手工具が遮光する光軸数）>（人体が遮光する光軸数）となるため、人体を検出できないという問題は生じなかった。

今後は、以上の結果を国際規格であるIEC62046などに提案して行くのが課題である。

最後に、本研究で開発した装置の製造にあたっては、株式会社日邦エレクトックス 植田泰久主任に相当な御尽力を頂いた。また、中央労働災害防止協会の桑川壮一 次長と、北九州市立大学の杉本旭教授の御指導を受けた。紙上を借りて深い謝意を表する。

文 献

- 1) 梅崎・井土・中村他4名, フローティング機能を備えたロール機用安全システムの開発, 第31回安全工学シンポジウム(2001-7) pp.161-164
- 2) 梅崎・杉本・中村, 産業機械の安全方策に関する基礎的考察ーリスク評価に含まれる不確定性を考慮した安全方策の提案ー, 日本信頼性学会誌, Vol.23, No.7 (2001) pp.659-675
- 3) 井土・中村・梅崎・小林, 物流機械を対象とした階層化安全制御システムの開発, 日本機械学会第9回交通・物流部門大会予稿集(2000-12) pp.161-164
- 4) Draft IEC62046, Application of presence sensing protective equipment to machinery (2001)

[補足1] 連続遮光幅とは、一定の直径の遮光棒で光線式安全装置の検知空間内を遮光した場合、常に一光軸以上が遮光できる丸棒の最小直径をいう。