

# 人体通信による装着物の着用検知機構の提案 —当該機構をセーフティシステムに付加するための —考察

藤川 真樹<sup>†1</sup> 青木 洋之<sup>†2</sup> 西垣 正勝<sup>†3</sup>

工作機械を使用する作業員の安全を確保することは必須の要件である。このため、作業員が受傷防止のために着用する「手袋」や「ヘルメット」が危険領域に入ったときに、工作機械を停止させる「セーフティシステム」が提案されている。ところで、当該システムに「作業員が装着物を着用しているか否かを検知できる機構」が組み込まれていれば、着用忘れや着用懈怠時に工作機械を作動させないなど、安全性を高めることができるが、筆者らが調査した限りにおいては、十分な着用検知機構を付加しているセーフティシステムは存在しなかった。そこで本論文では、当該システムに上記の機構を組み込むことを目指し、そのための基礎研究として、人体通信技術を用いた「装着物の着用検知機構」を提案する。

## Study of a Safety System with Garment-wearing Detecting Mechanism Using Intra-body Communication Technology

MASAKI FUJIKAWA,<sup>†1</sup> HIROYUKI AOKI<sup>†2</sup>  
and MASAKATSU NISHIGAKI<sup>†3</sup>

For operating vehicles and machine tools, safety is an essential requirement. Nowadays the electronics and information technologies enable us to build a safety device into the gloves and helmets etc. to stop the vehicles and the machines when these garments break into dangerous area. In this garment detection system, it is important to prevent the mistake that the operator forget to wear the garment. But according to our investigation, enough garment-wearing detection doesn't exist so far. Therefore, in this paper, we propose to use intra-body communication technology to realize a safety system with garment-wearing detection which detects when "the human body with garment" breaks into dangerous area.

### 1. はじめに

電子情報技術の進展にともない、工作機械や車両を使用する作業員の安全を確保するためのセーフティシステムが開発されている。たとえばプレス機には、作業員が手をプレスされることがないようにシステムが組み込まれている<sup>1)</sup>。当該システムでは、作業員とプレス機との間に、複数の光線を照射・受光させる装置を取り付ける。そして、金型が下降しているときに、光線が1つでも受光できないときには、手が光線を遮っているものと判断してプレス機を停止させる。

作業員は、作業効率を向上させるために、次にプレスをする材料を手を持って待機するのだが、ときどき、手にしている材料が光線を遮ることがある。また、汗を拭うためのタオルや作業着の裾が光線を遮ることがある。これにより、プレス機は停止するのだが、これを快く思わない作業員は、故意にセーフティシステムを停止させてプレス機を稼働させている<sup>2)</sup>。これは悪いことではあるが、反面、何にでも反応してしまうセーフティシステムにも問題があるといえる。このため、当該システムには、「人体」が危険な領域に入ったことを検知できることが求められる。

ゴミ収集車においては、上記のコンセプトを持つセーフティシステムが提案されている<sup>3)</sup>。具体的には、作業員が受傷防止のために着用する「手袋」にRFIDタグを、「ゴミ投入口」にRFIDリーダを組み込む。そして、タグとリーダとの距離が、あらかじめ決められた距離よりも近づいたとき（つまり、手が危険な領域に入ったとき）に、ゴミを取り込む回転板を停止させる。しかしながら、上記システムは、正確には「手袋」を検知しているのであって「手袋を着用した手」を検知しているわけではない。このため作業員が、受傷防止のための手袋の着用を「失念」または「懈怠」した場合には回転板は停止しない。したがって、当該システムには「受傷防止のための手袋（装着物）を着用した手（人体）」が危険な領域に入ったことを検知できることが求められる。

筆者らが、既存のセーフティシステムを調査したところ、安全確保のための装着物を着用しているか否かを検知できる仕組みまでを備えているものは少ないという状況であった。ま

†1 総合警備保障株式会社 (ALSOK)  
Sohgo Security Services, Co., Ltd.

†2 静岡大学大学院情報学研究所  
Graduate School of Informatics, Shizuoka University

†3 静岡大学創造科学技術大学院  
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

た、装着物の着用を検知する仕組みを備えているセーフティシステムにおいても、十分なレベルの検知機構を有しているものは、筆者らが調べた限りにおいては存在しなかった。そこで本論文では、セーフティシステムに上記の仕組みを組み込むことを目指し、そのための基礎研究として、人体通信技術を用いた装着物着用検知機構を提案する。ここで、筆者らが人体通信技術に注目した理由は、人そのものを媒介とした通信路が形成されるために「人」と「装着物」のコネクションを実現する装着物着用検知との相性が良く、また、最近の技術革新によって人体通信が実用レベルの技術となってきたためである。

なお、本論文では特に、工作機械や車両を使用する作業員の安全を確保するための機構として人体通信技術を利用した装着物検知機構を扱っていくが、本機構は種々のセーフティシステムへの組み込みが可能であると考えている。

## 2. 既存システムに対する考察と指標の設定

本章では、既存のセーフティシステムを考察することにより、筆者らが提案しようとしている装着物着用検知機構が備えるべき指標を整理する。

### 2.1 ヘルメットの着脱検知

ハンドヘルドタイプのレーザ加工機では、防護ヘルメットの着用を検知するシステムが提案されている<sup>4)</sup>。

ヘルメット内側の額部分には「感圧スイッチ」と「赤外線センサ」が、顔を保護するフェイスシールドには「マイクロスイッチ」が取り付けられている。そして、(1) 感圧スイッチが額により押下されていること、(2) 赤外線センサが体温を検知していること、(3) フェイスシールドが下りていること(マイクロスイッチが押下されていること)、を検知したときに、作業員がヘルメットを着用していると判断して、レーザを発振させる。

しかし、当該システムでは、フェイスシールドを下ろした状態のヘルメットを手にした作業員が、誤って手でヘルメット内側の額部分に触れた場合、上記(1)~(3)の成立によりレーザが発振される可能性があるため、これによる作業員の受傷が懸念される。このような事故を防止するためには、誤検知(着用していないのに着用していると判断すること)を防止する仕組みが求められる。

### 2.2 シートベルトの着脱検知

文献<sup>5)</sup>では、「バックル」と「共振タグ」を用いた、自動車用シートベルトの着用検知システムが提案されている。このシステムでは、(1) ストラップがバックルに接続されているか否か、(2) ショルダストラップ(着用者の胸部を肩から腰にかけて斜めに固定するペル

ト)に取り付けられている「共振タグ<sup>\*1</sup>」が、座席に組み込まれているループコイルによって生成された磁場を擾乱するか否か、を調べることで着用検知を行う。

磁場の大きさは、人体を貫通しない程度に設定されている。このため、座席に座ったあとにストラップをバックルに接続した場合、共振タグにまで磁場が到達しないため、磁場は攪乱されない。一方、ストラップをバックルに接続したあとにその上から座席に座った場合、ショルダストラップと座席との間に人体がないため、磁場が擾乱される。

しかし、共振タグが故障または落脱した場合も磁場は擾乱されないため、その際にはシートベルトを着用していなくても着用していると判断される。このことは、当該システムが故障したときに自動車のエンジンを始動できないようにする、といった設計思想(フェールセーフ<sup>6)</sup>)に立脚していないことを意味している。

また、磁場の擾乱は、座席の周辺に金属があると発生することがあるため、工事現場で使用される車両のように、金属製の部品や工具などが持ち込まれる車両に対しては適用が難しい。セーフティシステムは万一のときに安全を確保するための仕組みであるため、ノイズなどの外乱に強く、使用環境が限定されることのないロバストな機構であることが望ましい。

### 2.3 指標の設定

筆者らは、既存システムに対する考察をもとにして、セーフティシステムに組み込まれる「装着物着用検知機構」が持つべき3つの指標を設定した。

指標1: 着用の検知に関すること

a: 着用の検知性	装着物の着用を検知できる。
b: 誤検知防止性	誤検知(着用していないのに着用していると判断すること)を防止できる。
c: 検知漏れ防止性	検知漏れ(着用しているのに着用していないと判断すること)を防止できる。

指標2: フェールセーフに関すること

フェールセーフ性	セーフティシステムでは、フェールセーフであることが原則となっている <sup>7)</sup> 。このため、着用検知機構が故障したときには、車両や工作機械を始動できなくする。
----------	---

\*1 CD ショップや図書館などで盗難防止対策として使用されている。CD や本にタグを付けておき、出入口に磁場発生装置と磁場センサを設置する。このタグが磁場に近づくと、磁場が擾乱され、タグの通過が検知できる。

指標 3：ロバストに関すること

ロバスト性	着用検知機構は、環境の変化といった「外乱」に影響されない。
-------	-------------------------------

3. 人体通信技術を用いた着用検知機構

本章では、上記の指標を満たすことができる、人体通信技術を用いた着用検知機構について説明する。

3.1 コンセプト

装着物と人体との関係に着目すると、装着物を着用したときには、装着物は人体と密着または近接しているが、装着物を脱いだときには、装着物と人体は密着または近接していない。そこで筆者らは、「装着物」と「着用検知手段」とを「人体」を用いて紐づける、というコンセプトのもとに、システムを設計する。

このコンセプトを、手袋と腕時計を用いて説明する(図1参照)。着用検知手段は、あらかじめ腕時計に組み込んでおく。図1(a)のように、手袋をはめたときには、手と手袋が密着する。このとき、手袋と着用検知手段は、人体によって紐づいているととらえられる。一方、図1(b)のように、手袋を脱いだときには、手と手袋は密着していないため、紐づけが切れているととらえられる。

筆者らは、上記のコンセプトを具現化するために、人体通信技術を用いて「装着物」と「着用検知手段」との物理的な紐づけを行う。



図1 着用検知機構のコンセプト

Fig. 1 The concept of wear/remove detection system.

3.2 人体通信技術

人体通信技術とは、情報を伝送する通信路として、人体を用いる通信技術である。これまでにいくつかの方式が提案されているが、通信メカニズムの解釈のしかたによって、研究者ごとに方式の分類方法が異なっている<sup>8)-11)</sup>。このため筆者らは、議論をスムーズに展開させるために、(1) 閉回路の構成(表1)、(2) 電極の接続方法(表2)、(3) 信号のセンシング方法(表3)という観点から、それぞれの方式を整理する。これによると、光センサ型レッドタクトン<sup>9)</sup>は「大地アース方式・非接触型接続方式・フォトリックセンシング

表1 閉回路構成による大別  
Table 1 General classification based on the loop structure.

方式名	特徴
共通アース方式	「アース線→送信部→人体→受信部→アース線」という閉回路で人体通信が行われる。 メリット：装置構成がシンプル。全体が独立した閉回路として構築されるので、大地アース方式と比べてSN比がよい(信号レベルが小さくても動作する)。よって、外部環境からのノイズにも強い。 デメリット：アース線を設ける必要があるため、発信器と受信器の距離が離れるような実装に不向き。
大地アース方式	「大地→送信部→人体→受信部→大地」という閉回路で人体通信が行われる。 メリット：アース線を設ける必要がないため、発信器と受信器の距離に実装上の制約はない。 デメリット：大地に対する浮遊回路となるので、共通アース方式と比べてSN比が悪い(信号レベルが大きくなると動作しない)。よって、外部環境からのノイズに弱い。
回路分離方式	送信部の閉回路で発生させた電磁波が、人体を経由して受信部の閉回路で受信されることによって人体通信が行われる。 メリット：上記の2つの方式とは異なり、発信機・受信機から電極までの配線が不要。 デメリット：発信器・受信器と大地の間の容量結合を十分に遮断しないと、伝送路に流れる信号レベルが小さくなってしまい、SN比が低下する。

表 2 電極の接続方法による大別

Table 2 General classification based on the electrode connection method.

方式名	特徴
接触型接続方式	電極は、人体と接触している必要がある。交流信号または直流信号が伝搬する。 メリット：非接触型接続方式と比較すると SN 比がよい。 デメリット：接触により電極が劣化したり、金属アレルギーにより皮膚に炎症ができたりする。
非接触型接続方式	電極は、人体と接触している必要はない。静電容量成分を介し、交流信号が伝搬する。 メリット：接触により電極が劣化したり、金属アレルギーにより皮膚に炎症ができたりすることがない。 デメリット：電極と人体との距離が離れるほど SN 比が低下する。

表 3 信号のセンシング方法による大別

Table 3 General classification based on the signal sensing method.

方式名	特徴
電気信号センシング方式	電圧または電流の変化を、信号として読み取る。 メリット：機器のコストが低い。 デメリット：高速な信号の送受信には適していない。フォトニックセンシング方式と比較すると SN 比が悪い。
フォトニックセンシング方式	電荷の変化を、信号として読み取る。 メリット：高速な信号の送受信に適している。電気信号センシング方式と比較すると SN 比がよい。 デメリット：機器のコストが高い。

方式」, Firmo<sup>10)</sup> は「大地アース方式・非接触型接続方式・電気信号センシング方式」, 文献 11) の方式は「共通アース方式・非接触型接続方式・電気信号センシング方式」と整理される。

表 1 から表 3 におけるメリットおよびデメリットを吟味すると、作業環境において好適な人体通信方式は、「共通アース方式・非接触型接続方式・電気信号センシング方式」となる。その理由は、汗や埃などで汚れるような環境での作業において、(1) 外部環境からのノ

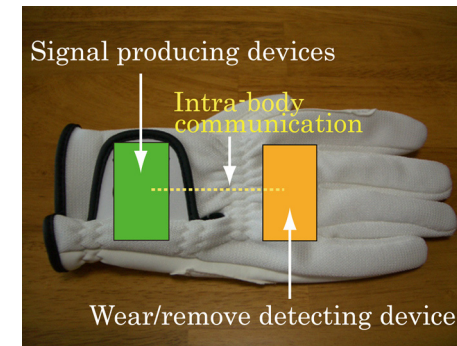


図 2 人体通信による着用検知

Fig. 2 Wear/remove detection mechanism by using Intra-body communication.

イズに強く、(2) 電極と人体が直接接触しなくてよく、(3) オンオフ（着脱）の制御だけではないため高速な信号の送受信を必要としない、からである。

### 3.3 人体通信による着用検知

本節では、人体通信技術を用いた装着物の着用検知方法について説明する。

図 1 において、装着物（手袋）に「信号送信装置」を、着用検知手段（腕時計）に「信号受信装置」を組み込む。信号送信装置は、装着物と着用検知手段とを結びつけるための「固有の信号」を発生するとともに、これを、人体を介して着用検知手段の信号受信装置に送信する。着用検知手段は、「固有の信号」を受信できるか否か（つまり、装着物と着用検知手段が、人体を介して結びいているか否か）を調べることによって、装着物を着用しているか否かを判断する。

また、図 2 に示すように、装着物に信号送信装置と信号受信装置の両方を組み込むことで、装着物と着用検知手段を一体化できるため、装着物のみで着用検知（送信装置と受信装置とが人体を介して結びいているか否か）の判断が可能である。

このように、人体通信技術は、装着物と着用検知手段との結びつけの有無（すなわち、装着物を着用しているか否か）を判断する手段として利用できる。

### 4. プロトタイプ製作

筆者らは、基礎研究の一環として、着用検知機構を有する装着物のプロトタイプを製作した。今回は、「共通アース方式・非接触型接続方式・電気信号センシング方式」を採用し、

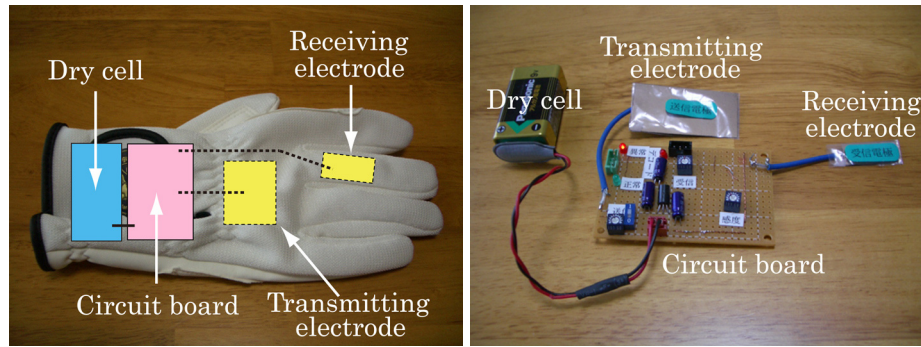


図 3 機構の実装イメージ(左)と着用検知機構(右)  
Fig. 3 System implementation image (Left) and experimental system (Right).

図 2 に示すような、装着物と着用検知手段とを一体化した着用検知機構を構築した。装着物には「手袋」を用いた。これは、受傷防止のために使用される機会が、他の装着物よりも多いと考えられるからである。なお、本プロトタイプは 1 つの実装例にすぎないことに留意されたい。

#### 4.1 システムの仕様

図 3 に、実装イメージと製作した実装システムを示す。送信電極 (25 mm × 50 mm) と受信電極 (25 mm × 10 mm) は手袋の裏地に、基盤は表地に取り付けた。なお、電極と基盤とを結ぶ配線が「電極」として振る舞うことを防止するために、配線には電磁シールド線を用いた。

電極には銅箔を使用し、表面を薄い絶縁体 (塩化ビニル) でコーティングした。手袋には、工作機械のオペレーションを用途とした牛皮革の手袋 (生地の厚さ: 約 1.0 mm) を使用した。

図 4 に、実装システムのブロック図を示す。今回は、信号送信装置と信号受信装置を 1 つの基盤上に実装している。送信電極には、100 kHz の方形波信号を発振させる発振器が接続されており、手が 2 つの電極に近接しているときに、受信電極に信号が伝播する。受信した信号には信号処理を施し、100 kHz の方形波信号が取り出せることを確認する、もし、確認できたときには、図 5 に示すように、Decoding と Receiving とラベル付けされた LED を点灯させる (今回は例として 100 kHz の信号を使用した、その他の高周波帯域の信号を用いてもよい)。

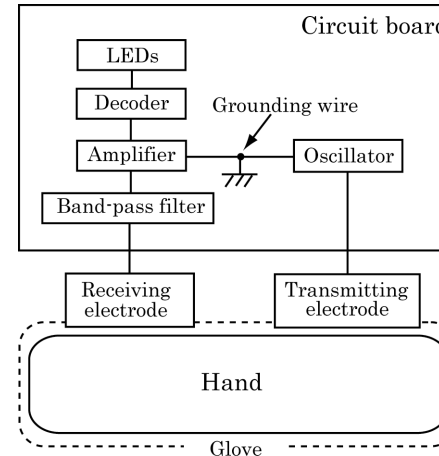


図 4 着用検知機構 (ブロック図)  
Fig. 4 The block diagram of experimental system.

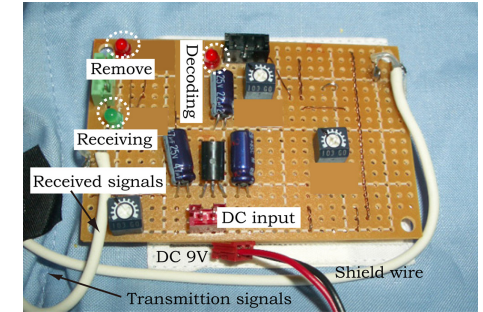


図 5 着用検知システム (基盤)  
Fig. 5 The circuit board of experimental system.

回路と人体にはアナログ特性があるため、手袋をはめていても受信信号が断続的になることがある。このため、プロトタイプではシステムにタイマを組み込み、手袋を着用している間に受信信号が途切れたとしても、タイマにより設定された時間内に信号が再度受信できた場合には、手袋を装着していると判定するようにする。

装着と判定したときには「Receiving」とラベル付けされた LED を点灯させ、そうでないと判断したときには「Remove」とラベル付けされた LED を点灯させる<sup>\*1</sup>。なお、今回はプロトタイプを用いた基礎実験であるため、以下に示す「やわらかい仕様」のもとで実験を行う。

- (1) 「共通アース方式」を採用しており、送信部と受信部を 1 つの基盤に実装するため、送信部と受信部を共通のアース線で接続する。
- (2) 1 つの手袋に送信部と受信部があるため、着脱の検知は 1 つずつの手袋に対して行わ

\*1 タイマの設定時間の間に 1 度でも人体通信による通信が確立した場合に「Receiving」の LED が点灯する。このため、手袋の装着については、手袋をはめて人体通信が確立した瞬間に「Receiving」の LED が点灯するが、手袋の脱衣については、手袋を脱いでからタイマの設定時間を過ぎた時点で「Remove」の LED が点灯することになる。

れる\*1。

- (3) 受信電極の感度調整は、基盤に組み込んだポリウム抵抗を用いて行う。
- (4) タイマの設定時間は7秒間とした\*2。
- (5) 送信信号は、符号化しない。

#### 4.2 動作の確認

筆者らは、プロトタイプが仕様どおりに動作することを確認した。

- (1) 手袋をはめていないときは、「Remove」とラベル付けしたLEDが点灯した。
- (2) 手袋をはめているときは、「Receiving」と「Decoding」とラベル付けしたLEDが点灯した。
- (3) 手袋を脱いでから7秒経過したとき、上記2つのLEDが消灯するとともに、「Remove」とラベル付けしたLEDが点灯した。
- (4) 再度手袋をはめたときには、「Remove」とラベル付けしたLEDが消灯するとともに、「Receiving」と「Decoding」とラベル付けしたLEDが点灯した。

### 5. 指標の担持に関する考察

人体通信技術を用いた着用検知機構は、2.3節で述べた3つの指標を担持できる。本章では、その理由を述べるとともに、従来方式との比較により提案方式の優位性を述べる。なお、理解を容易にするために、4章の実装システムを具体例として採り上げて説明する。

#### 5.1 指標を担持できる理由

指標 1-a (着用の検知性):

3.3節において解説しているように、人体通信技術を用いることより、装着物と着用検知手段との紐づけの有無(すなわち、装着物を着用しているか否か)が判断できる。

指標 1-b (誤検知防止性):

- (1) 送信電極と受信電極が近接した場合、非着用時であっても偶発的に通信が発生する可能性がある(たとえば、脱いだ手袋が重ねて置かれているとき、など)。しかし、

\*1 大地アース方式を採用した場合は、右手袋に送信器と送信電極を、左手袋に受信器と受信電極を組み込む。これにより、両方の手袋を装着した際に「右手袋(送信部)→人体→左手袋(受信部)」という通信路が確立されるため、両方の手袋の装着が検知できる。

\*2 今回はプロトタイプであるため、余裕を持たせて7秒間と設定した。実際のタイマの設定秒数については、作業内容を考慮するとともに、フィールドテストによる検証を積み重ねて決定する必要がある。

非接触型接続方式を採用している場合、受信電極を覆う絶縁物の材質や厚さを変えたり\*3、印加する電流や電圧を変えたりすることにより、電極の受信感度を調整することが可能である。したがって、これらを適切に設計することにより、送信電極と受信電極が近接したとしても、非着用時の通信が発生しないようにすることができる。

- (2) 非接触型接続方式を採用している場合、人体と電極が近接することにより通信が発生するため、非着用時であっても偶発的に通信が発生する可能性がある(たとえば、脱いだ手袋を手で握ったとき、など)。

しかし、当該方式では、装着物の材質や厚さを変える\*4ことにより、電極の受信感度を調整することが可能である。したがって、これらを適切に設計することにより、人体と電極が近接したとしても、非着用時の通信が発生しないようにすることができる。

- (3) 「信号を符号化し、受信した信号を確認する」という方法を採用しても、当該指標は担持可能である。たとえば、右手袋では「010101」を、左手袋では「101010」を受信したときに、それぞれの手袋が「手袋を装着している」と判断する機構を個別に設けたとする。このとき、(1)のように偶発的に左右の手袋が接触したときに、左右の手袋間において電流が流れ、右手袋では「101010」を、左手袋では「010101」を受信することがあるかもしれないが、本来受信すべき信号とは異なっているため、誤検知には至らない。

指標 1-c (検知漏れ防止性):

- (1) 4.1節で述べているように、回路と人体にはアナログ特性があるため、人体通信の瞬断が発生する可能性がある。しかし、システムにタイマを組み込むことにより、人体通信の瞬断を補い検知漏れを防止できる(提案方式では、7秒の間に信号が再度受信できた場合には、手袋を装着していると判定するようにしている)。
- (2) 信号を符号化した場合には、人体通信の瞬断によって符号列の受信が阻害される。これに対しては、十分な誤り訂正能力を持つ誤り訂正符号を用いたり、データの再送信機能を充実させたりすることにより、検知漏れを防止できる。

\*3 実験(6章参照)では、電極間に牛革生地2枚(約2mm)が介在すれば、電極どうしによる直接的な通信は発生しないという結果が得られている。

\*4 実験(6章参照)では、電極と人体との間に牛革生地1枚(約1mm)が介在すれば、人体通信は発生しないという結果が得られている。

指標 2 (フェールセーフ性):

- (1) 装着物非着用時: 送信部または受信部が故障した場合, たとえ送信電極と受信電極が導通したとしても, 信号の受け渡しはできない. これにより, 装着物を着用していないのに着用していると判断される, という事はないため, 工作機械などを始動させないようにすることができる.
- (2) 装着物着用時: 送信部または受信部が故障した場合, 信号の受け渡しができなくなるため, 装着物を脱いだと判断される. これにより, 運転中の工作機械などを停止させることができる.

指標 3 (ロバスト性):

- (1) 電気ノイズまたは環境ノイズによって, 送信部が信号を送信していないにもかかわらず, 受信部が信号を受信した状態になる可能性がある. このため, 送信部で信号を適切に符号化し, 受信部で符号を検査する仕組みを追加することにより, 上記事象を回避することができる (たとえば, 通信システムにおいて採用されている前方誤り訂正方式 (Forward Error Correction: FEC) を用いて, 伝送路上で発生した誤りを受信部側で検出・訂正することが考えられる).
- (2) 装着物ごとに符号化方法を変えることにより, 送信部が送信した信号と受信部が受信した信号が 1 対 1 対応になる. このため, たとえば作業員 A と作業員 B の身体が接触したとしても, 作業員 A が着用している装着物 A の受信部が, 作業員 B が着用している装着物 B の送信部から送信された信号を処理することはない.
- (3) 体内の環境変化が, 人体通信に影響を与える可能性は否定できない (人体の導電特性には個人差があるだけでなく, 同じ人でも身体の部位や発汗状態などによって当該特性が変化するため). しかし, たとえば文献 12) のように, 人体の導電特性の変化をリアルタイムに検知してフィードバックさせる機構を組み込むことで, この人体の導電特性の変動を補正し, 人体通信を安定化させることは可能であると考えられる.

5.2 従来方式との比較

2.3 節で述べた各指標の担持について, 表 4 に従来方式と提案方式の比較を示す.

指標 1-a (着用の検知性) については, いずれの方式も装着物の着用検知ができる. 指標 1-b (誤検知防止性) については, 2.1 節で述べたように, 文献 4) の方式は誤検知の可

表 4 従来方式との比較

Table 4 Comparison between existing method and proposed method.

指標 \ 方式	従来方式 (文献 4)	従来方式 (文献 5)	提案方式
1-a (着用の検知性)	◎	◎	◎
1-b (誤検知防止性)	△	◎	◎
1-c (検知漏れ防止性)	◎	◎	◎
2 (フェールセーフ性)	◎	×	◎
3 (ロバスト性)	◎	△	○

能性があるために文献 5) の方式よりも担持水準は低いといえる. これに対し, 提案方式は 5.1 節で述べたように, 偶発的な事象による誤検知の可能性はあるものの, システムの調整や信号の符号化によってそのような誤検知の発生を回避できる. よって, 提案方式の 1-b に関する担持水準は, 文献 4) の方式よりも高く, 文献 5) の方式とほぼ同等といえる. 指標 1-c (検知漏れ防止性) については, 文献 4) の方式も文献 5) の方式も通常, 検知漏れは発生しない. 提案方式においては, 5.1 節で述べたように, タイマや符号化方式を適切に実装すれば検知漏れを回避できる. このため, いずれの方式も高い水準で指標を担持しているといえる.

指標 2 (フェールセーフ性) については, 2.2 節で述べたように文献 5) の方式はこれを担持していない. 一方, 提案方式は 5.1 節で述べたようにこれを担持しており, その水準は文献 4) の方式と同等に高いといえる.

指標 3 (ロバスト性) については, 2.2 節で述べたように文献 5) の方式は作業員が作業する環境によっては担持されない場合もありうる. 提案方式は文献 4) の方式と比べるとその担持水準は低い, 5.1 節で述べたように適切な符号化やフィードバック機構の組み込みによってロバスト性を担持できるため, 文献 5) の方式よりも高いといえる.

「装着物着用検知機構」はセーフティシステムに組み込まれるものであり, 万一の際における作業員の安全にかかわるものであるため, 担持水準が低いこと (すなわち, 1 つでも △ や × があること) は望ましくない. 提案方式は, 従来方式と比較するとすべての指標においてある程度の高いレベルで指標を担持しているといえる.

6. 実験による検証

本章では, 前章で述べた考察を裏付けるために, 4 章で製作したプロトタイプを用いた検証実験を行う. ここで, 指標 1-a (着用の検知性) については 4.2 節において確認を実施し

ており、指標 1-c (検知漏れ防止性) についてもタイマを用いることによって正しく着用の検知ができていることが 4.2 節で確認できている。また、指標 2 (フェールセーフ性) は成立することが自明である。よって、これらについては実験を割愛する。なお、5.1 節の「指標 1-b (誤検知防止性)」に関する考察 (3)、および、「指標 3 (ロバスト性)」に関する考察 (1)、(2) において、信号の符号化に関して述べているが、今回はプロトタイプによる検証実験であることから、信号の符号化は実装せず、着脱検知における人体通信自体の通信性能を評価することとした。

### 6.1 指標 1-b に関する検証実験

#### 実験 1 :

送信電極と受信電極が近接すると、非着用時であっても (人体を介さなくても) 通信が発生する。そこで、近接させた送信電極と受信電極を少しずつ遠ざけ、通信不能となったときの電極間の距離を測定した。具体的には、2つの電極でティッシュペーパーを挟み、ティッシュペーパーを 1枚ずつ増やしていき、通信不能となったときの枚数を調べた。

#### 結果 :

電極間にティッシュペーパーが 8枚 (約 1.0mm) 以上存在したときに、通信は不能となった。このことから、プロトタイプの場合、電極間に厚さ 1.0mm 以上の絶縁物があれば、非着用時の通信は発生しないといえる。

ただし、絶縁体の絶縁特性は誘電率によって変化する。たとえば、紙の誘電率は空気 (1.000586) の約 2 倍 (2.0) である<sup>13)</sup> ため、プロトタイプの場合、電極を空気と同じ誘電率の絶縁体で覆ったとすると、電極間の距離が約 0.5mm 以下にまで近づかなければ非着用時の通信は発生しないと考えられる。

#### 実験 2 :

プロトタイプでは、電極間に厚さ 1.0mm 以上の絶縁物 (ティッシュペーパーの場合) があれば非着用時の通信は発生しないことが確認されたが、ここでは、実運用を想定した実験を行うことで、実験 1 の結果を補強する。実運用では、以下のようなケースが想定される。

- (1) 図 6(a) に示すように、作業員が、机の上に脱いだ手袋を重ねて置いたときに、右手袋の送信電極と、左手袋の受信電極が近接する。
- (2) 図 6(b) に示すように、作業員が、机の上に脱いだ手袋を折りたたんで置いたときに、右手袋の送信電極と受信電極が近接する。

そこで、以下に示す 2つの実験を行った。なお、プロトタイプでは、電極は手袋の裏地に



図 6 想定されるケース (イメージ)  
Fig. 6 Envisioned case (image).

取り付けられているため、実験 (a) の場合も実験 (b) の場合も、電極と電極との間には手袋の生地 2枚分 (牛革: 厚さ約 1.0mm × 2枚) が存在する。

実験 (a): 右手袋の送信電極と左手袋の受信電極とを接近させる。

実験 (b): 右手袋を折りたたみ、上から 500g の圧力をかけて電極どうしを近接させる。

#### 結果 :

実験 (a)、実験 (b) とともに、通信が発生することはなかった。このことから、プロトタイプを実際に運用させても、誤検知が発生することはないと考えられる。

#### 実験 3 :

手袋を取り扱う中で起こりうる、偶発的な通信の発生による誤検知 (たとえば、脱いだ手袋を手で握ったときに、通信が発生するか否か) について検証した。ここでの実験では、手袋の表地に手のひらを押しあてたときに、人体通信が発生するか否かを観察した。なお、プロトタイプでは、電極は手袋の裏地に取り付けられているため、電極と手のひらとの間には、手袋の生地 1枚分 (牛革: 厚さ約 1.0mm) が存在する。

#### 結果 :

通信が発生することはなかった。このことから、プロトタイプを実際に運用させても、上記のような偶発的な通信の発生による誤検知は低いと考えられる。



6.2 指標 3 に関する検証実験

プロトタイプでは信号を符号化していないため、100 kHz 近傍の電気ノイズが入来した場合、何らかの影響を受ける可能性がある。そこで、電気ノイズが発生している環境下でプロトタイプを動作させることにより、影響の有無を調査する。

**実験 1:**  
電磁波を発生させる家電製品（テレビ、電子レンジ、携帯電話）にプロトタイプを組み込んだ手袋を密着させ、家電製品を始動させた。なお、手袋には手をはめないものとする。  
**結果:**  
「Remove」とラベル付けされた LED が点灯しつづけた（つまり、誤検知は発生しなかった）。このことから、プロトタイプを実際に運用させても、上記家電製品には影響を受けないことが分かる。

**実験 2:**  
100 kHz 近傍の電気ノイズによる影響の有無を調査した。今回は、プロトタイプにおいて、左手袋に組み込まれている信号送信装置を「ノイズ発生源」として使用した。そして、100 kHz の周波数を使用している右手袋の受信電極に、100 kHz の周波数を使用している左手袋の送信電極を近接させたときに、右手袋が影響を受けるか否かを調査した。また、左手袋の周波数を 100 kHz 近傍で変更した場合についても、同様の方法で、右手袋への影響を調査した。なお、手袋には手をはめないものとする。  
**結果:**  
表 5 に実験の結果を示す。右手袋は、100 kHz および 98.8 kHz の周波数を使用している左手袋に影響を受けた（つまり、誤検知が発生した）が、97.7 kHz の周波数を使用している左手袋には影響を受けなかった。このことから、プロトタイプを実際に運用させた場合、入来した電気ノイズの周波数が、システムが使用している周波数から 3%以上離れていれば、影響は受けないと考えられる。

**実験 3:**  
手袋ごとに符号化方法を変えることにより、作業員 A が着用している手袋と作業員 B が着用している手袋が接触したとしても、お互いの装着検知システムが混線するような誤動作を防ぐことが可能である。今回は、プロトタイプにおいて、右手袋を作業員 A の手袋に、左手袋に作業員 B の手袋にみたてる。そして、左右の手袋に組み込まれているプロト

表 5 100 KHz 近傍のノイズ源による影響

Table 5 Effects by noise sources.

	左手袋 100KHz	左手袋 98.8KHz	左手袋 97.7KHz
右手袋 100KHz	右手袋の受信電極から 0.5mm の距離以内に左手袋の送信電極が近づいたときに誤検知（信号を受信）あり。	右手袋の受信電極に左手袋の送信電極が密着したときに誤検知（信号を受信）あり。	右手袋の受信電極に左手袋の送信電極を密着させたが誤検知なし。

タイプにそれぞれ異なる周波数を設定したあと、右手袋の受信電極に左手袋の受信電極を近接させたときに、両手袋が影響を受けるか否かを調査した。なお、手袋には手をはめないものとする。  
**結果:**  
プロトタイプの周波数を、実験 2 で得られた周波数差程度以上に離れたところ、両手袋は互いの影響を受けない（つまり、誤検知が発生しない）ことが確認された。

7. おわりに

人体通信技術を用いて装着物の着用検知を行う機構をセーフティシステムに組み込むことで、セーフティシステムが持つ安全性を高めることができることを示した。

本論文では、既存のセーフティシステムの問題点を洗い出すことで、セーフティシステムに組み込まれる「装着物着用検知機構」が備えるべき 3 つの指標を抽出したあと、人体通信を利用した提案方式が 3 つの指標を担持できることを述べた。また、「共通アース方式・非接触型接続方式・電気信号センシング方式」の人体通信技術によるプロトタイプを作成し、基礎的な実験による評価と考察を通じて、当該着用検知機構の有用性を確認した。

しかしながら、本論文で報告した内容はあくまでもプロトタイプによる評価であるため、今後は、実運用に耐えうるシステムへの昇華を目指して研究を進めていく。具体的には、人体通信をより安定させるためのシステム上の工夫や、通信の際に利用する符号化方式の検討を実施するとともに、実際の作業現場や作業環境を再現したフィールドテストを重ね、当該機構をセーフティシステムに組み込んで評価試験を行ったりしていく予定である。また、

ヘルメットやシートベルト、ゴーグルなどといった、グローブ以外の装着物を用いたセーフティシステムの構築についても取り組んでいきたい。

また、ひとくちに「セーフティシステム」といっても、求められる機能や安全性の要件は多種多様であると考えられる。このため今後の課題として、それぞれの業務や作業環境ごとにセーフティシステムが具備すべき仕様や指標を検討したうえで、提案方式がそれらを満たすか否かについて評価していきたい。

謝辞 日本電信電話株式会社マイクロシステムインテグレーション研究所・品川満様、川野龍介様、株式会社カイザーテクノロジー・加藤康男様には、人体通信方式に関してご教授をいただいた。筑波大学・碓川友宏准教授には、本方式の実装に関してのご助言をいただいた。株式会社三矢研究所・古澤健治様には、本方式を試作いただくとともに、本研究についてご指導をいただいた。東京都立産業技術高等専門学校・吉沢昌純教授には、本研究についてご助言をいただいた。ここに深く謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 永井俊一，天野 勝：制御機能付き光線式安全装置，特許公開 2000-167700 (2000).
- 2) いわき民報，遠野の工場を労働安全衛生法違反で書類送検，2007 年 6 月 18 日，入手先(<http://www.abc-iwaki.com/news/2007-6-11738.html>) (参照 2009-07-15).
- 3) 上野直広，秋山守人，井上智彦：安全管理システム，特許公開 2006-316862 (2006).
- 4) 小野寺宏：レーザ加工機における安全装置，特許公開平 9-220681 (1997).
- 5) 平岩良規：シートベルト装着検出システム，特許公開平 10-181531 (1998).
- 6) 向殿政男：フェールセーフの理想と安全の国際規格化，日本信頼性学会誌，Vol.20, No.2, pp.137-144 (1998).
- 7) 中村英夫：安全確保の思想：フェールセーフから安全性立証まで，電子情報通信学会技術研究報告 DC2005-68, pp.19-24 (2005.12).
- 8) 蜂須賀啓介ほか：人体を伝送路として利用した通信システムのモデル化に関する検討，人体を伝送路とした情報通信デバイスの開発，日本時計学会誌，Vol.46, No.2, pp.53-64 (2002).
- 9) NTT：レッドタクトン，入手先(<http://www.redtacton.com/jp/index.html>) (参照 2009-07-25).
- 10) NTT：Firmo (報道発表資料)，入手先(<http://www.ntt.co.jp/news/news08/0804/080423a.html>) (参照 2009-08-21).
- 11) KDDI 研究所：人体通信について，入手先(<http://www.kddi.com/business/oyakudachi/square/labo/004/index.html>) (参照 2009-08-07).
- 12) パナソニック電工：人体通信技術応用「タッチ通信システム」，

入手先([http://panasonic-denko.co.jp/corp/tech/report/532j/pdfs/532\\_t06.pdf](http://panasonic-denko.co.jp/corp/tech/report/532j/pdfs/532_t06.pdf)) (参照 2009-08-07).

- 13) 山本電機インスツルメント株式会社：誘電率表，入手先(<http://www.yei-jp.com/techinfo/techinfo-2.htm>) (参照 2009-07-25).

(平成 22 年 12 月 1 日受付)

(平成 23 年 6 月 3 日採録)



藤川 真樹 (正会員)

1996 年徳島大学工学部知能情報工学科卒業。1998 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2004 年中央大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。セキュリティとセーフティに関する研究に従事。IEEE, 日本セキュリティ・マネジメント学会各会員。情報処理学会全国大会奨励賞, 日本セキュリティ・マネジメント学会賞(現, 論文賞), IFIPTM2010 Best Demonstration Award 等受賞。



青木 洋之

2006 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2008 年同大学大学院情報学研究科修士課程修了。同年アイシン精機株式会社入社。在学中は、情報セキュリティに関する研究に従事。



西垣 正勝 (正会員)

1990 年静岡大学工学部光電機械工学科卒業。1992 年同大学大学院修士課程修了。1995 年同博士課程修了。日本学術振興会特別研究員(PD)を経て、1996 年静岡大学情報学部助手。同講師、助教授の後、2006 年より同創造科学技術大学院助教授。2007 年同准教授、2010 年同教授。博士(工学)。情報セキュリティ、ニューラルネットワーク、回路シミュレーション等に関する研究に従事。