

Research Report of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-88, 1988.
UDC 519.21:62-192:605.52.007

知能移動ロボット制御の基本安全設計*

佐藤吉信**

The Basic Safety Design for Control of Intelligent Mobile Robots

by Yoshinobu SATO**

Abstract; Robots are composed of wide-ranged engineering systems covering not only hardware but also software creating artificial intelligence. An overall safety plan must be carried into execution for the safety improvement of robotics. The safety plan consists of the following stages:

- (1) Hazard identification,
- (2) Conceptualization of hazard-restraint measures,
- (3) Qualitative and quantitative systems analyses, and
- (4) Specification of system design.

A systematic methodology for stage (1) and (2) analyses, which enable us to identify hazards and to conceptualize hazard-restraint measures involving hazard-control systems, have been developed. In this paper, hazards typically produced by autonomous mobile robots are identified and the structure of hazard-control systems for the hazards is discussed based on the methodology.

First, hazards 'a robot collides with a static object' and 'a robot collides with a mobile object' are identified using A-C models [Fig. 1 and 2].

Second, hazard-restraint principle 3 is applied to the both hazards, and hazard-control systems are conceptualized, given that the robot is initially in an area where there is no possibility of collision [Control Chains (1) and (6), and Fig. 3 and 4].

Next, the fundamental difference between a safety-confirmation information-processing system and a danger-detection information-processing system is defined [Control Chains (2) and (3), and Reversal Chain (4) and (5)].

Then, hazard-control systems, which materialize hazard-restraint principle 4 under the condition that the system phase is in the modes 'a robot is moving' or 'a robot exists on a collision course', are structured based on the dissociation theory of action linkage. These hazard-control systems involve the following control forms:

- (1) Stop by simply braking [Control Chain (7), and Fig. 5],
- (2) Stop by braking control against a skid [Control Chain (8), and Fig. 6 and 7],
- (3) Stop by multiple control against a turnover [Control Chain (9), and Fig. 8 and 9],
- (4) Course control against a single static object [Control Chain (10), and Fig. 10],
- (5) Course control against multiple static objects [Control Chain (10), and Fig. 11], and
- (6) Multiple control against multi-mobile objects [Control Chain (11), and Fig. 12],

* 本報は、日本機械学会論文集55巻518号C編2663~2671ページに「人間-ロボット系の安全性評価（移動ロボットにおける潜在危険制御系の構成について）」と題して掲載した論文に若干の加筆を行ったものである。

** 機械研究部 Mechanical Safety Research Division

Last, the applicability of safety-confirmation information-processing systems and danger-detection information-processing systems is examined. And the relationships among the identified hazards, the whole hazard-space, and the domains in which the conceptualized hazard-control systems are applicable, are schematically represented[Fig. 13].

Keywords; Intelligent Mobile Robot, Control System, Conceptual Design, Fail Safe, Fault Tolerance, System Safety.

1. 緒言

知能移動ロボットは、炉内作業などの危険有害作業を人に代替して行ったり、緊急時の救援システムとして利用されるなど安全性や保全性への積極的な貢献が期待されている¹⁾。また、将来、我々の日常生活にもロボットの普及が考えられている²⁾。

一方、こうしたロボットへの期待の高まりの一方でロボットと環境との干渉に危険性が潜在していることも見逃がせない事実である。安全性の観点からみたとき、従来のシステムとロボットとの本質的な相違点はロボットのもつ柔軟性にある。従来のシステムが単一の機能目的に限定されて使用されるのに対して、ロボットは製造者の予想を超えた使われ方をすることもあり得る。こうした柔軟性を有するロボットの事前安全計画は、(1)潜在危険の同定、(2)潜在危険抑制手段の検討、(3)定性的安全性解析、(4)定量的安全性解析などの手順に従い、その各段階が系統的な方法論に基づいて行われる必要がある³⁾。

本研究では、ロボットシステムの事前安全計画に資するために、潜在危険同定モデル⁴⁾、ロボットの腕に打たれる災害発生 of 包括的論理モデル⁵⁾、安全性評価のための数量化モデル⁶⁾、実システムの評価事例⁷⁾、などの報告を行ってきた。また前報では、潜在危険の抑制過程を潜在危険抑制原理(H. R. P.)として体系化するとともに、潜在危険制御系(H. C. S.)の構成原理を作用鎖の解離理論として一般化し、H. C. S.の概念設計法を提案した⁸⁾。

H. C. S.の重要な要素となる、センサや信号処理部などからなるいわゆる情報処理系(I. P. S.)において、動力源遮断インタロックや非常停止などによる潜在危険の回避を、I. P. S.の出力ゼロのみで行うことのできるいわゆる安全確認形I. P. S.(S. I. P. S.)と出力ゼロのみでは行わない危険検出形I. P. S.(D. I. P. S.)とでは安全性の観点から大きな相違がある。S. I. P. S.は、いわゆる信号系の狭義のフェイル

セーフをめざした構成法となり、D. I. P. S.ではいわゆる多重設計などによる機能維持が基本となる。前者では、一般に構造が単純で、後者に比して冗長系の同時故障を考慮する必要性が少ないなど安全上優れた特質を有している。しかし、どちらのI. P. S.を採用するかなどは、対象とする潜在危険と系の全体的構造に依存することとなる⁹⁾。

本報では、知能移動ロボットにおいて想定される潜在危険のうち主要なもの2種類を取りあげ、A-CモデルH. C. S.概念設計法を用いてそれらの潜在危険に対するH. C. S.の構成を論じる。

2. A-Cモデルと作用鎖の解離理論

2.1 記号の定義

2.1.1 系の構成要素

R	: 知能移動ロボット
ST	: Rの構造系要素
ES	: Rの動力源
SE	: Rの外界センサ系
SI	: Rの内界センサ系
CP	: RのI. P. S.処理部
CA	: RのI. P. S.出力部
DR	: Rの駆動部
BR	: Rの制動部
SR	: Rの操舵部
BL	: Rの平衡機能系
TR	: Rの移動機能系
RS	: Rの滑り状態
RB	: Rの平衡状態
RM	: Rの運動状態
O	: 静止対象物
M	: 移動対象物
G	: 重力
D	: 路面状態などの外乱要素
S	: スキッド促進要因

T：転倒促進要因

2.1.2 作業鎖とその解離モデル

$Xu_{i-m} \rightarrow W$ ：作用 u_i が作用要素 X から被作用要素 W へ授受される ($u_1=a, u_2=b, u_3=c, u_4=d, u_5=e, u_6=f$)

$Xu_{i-0} \rightarrow W(\cdot)$ ：直接原因作用 u_i により W にき損 (\cdot) が生じる。

$Yu'_j \rightarrow X$ ：解離作用 u'_j が解離要素 Y から X へ授受される ($u'_1=a, u'_2=b, u'_3=c, u'_4=d, u'_5=e, u'_6=f$)。

$(Yg'_m \rightarrow X) \& (Yg'_{-m} \rightarrow Yg''_{m+1} \rightarrow W)$ ：解離作用 $g' \& g''$ が Y から X および W へ授受される。

$Y_1u''_k \rightarrow Y_2$ ：抑制作用 u''_k が抑制要素 Y_1 から Y_2 へ授受される ($u''_1=a'', u''_2=b'', u''_3=c'', u''_4=d'', u''_5=e'', u''_6=f''$)。

$Xu_{i-m} \xrightarrow{P_\xi} W$ ：作用鎖 ($u_{i-m} \rightarrow$) が解離原理 P_ξ ($\xi \in 1, 2, 3, 4$) で解離される。

$Yu_{i-1} \rightarrow Y_2$ ：反転作用 \bar{u}_i が抑制要素 Y_1 から Y_2 へ授受される ($\bar{u}_1=\bar{a}, \bar{u}_2=\bar{b}, \bar{u}_3=\bar{c}, \bar{u}_4=\bar{d}, \bar{u}_5=\bar{e}, \bar{u}_6=\bar{f}$)。

m, n, q：その鎖の直接原因作用鎖 ($n=0$) からの連鎖順位 ($m, n, q=1, 2, 3, \dots$)。

$Ya' \xrightarrow{m} X, Y_1b'' \xrightarrow{n} Y_2, \text{ etc.}$ ：解離または抑制作用鎖が単方向抑制作用鎖 (S, F, A, L) である。

$Ya' \xrightarrow{m} X, Y_1b'' \xrightarrow{n} Y_2, \text{ etc.}$ ：解離または抑制作用鎖が複方向制御作用鎖 (D, F, A, L) である。

2.1.3 略語

- A-Cモデル：作用-変化と作用連鎖モデル
- D, F, A, L：複方向制御作用鎖
- D, I, P, S：危険検出形情報処理系
- D, P：解離原理
- E, D, F, A, L：外依複方向制御作用鎖
- H, C, S：潜在危険制御系
- H, R, P：潜在危険抑制原理
- I, P, S：情報処理系
- S, F, A, L：単方向制御作用鎖
- S, I, P, S：安全確認形情報処理系

2.2 H, C, S の構成原理

文献 8) で得られた知見のうち、本報で用いる主要な定理を示す。

[補助定理 1] 潜在危険の抑制過程は、(1)作用源の排除、(2)変化の抑制、(3)作用連鎖生成相遷移の禁止、

(4)生成相遷移後発現しつつある連鎖の解離、の各潜在危険抑制原理 (H, R, P) に分類・体系化される。

[定理 1] a (エネルギー伝ば), b (情報伝達) c (作因物転移), d (供給阻害), e (存在形態) 形の作用鎖は、原理的に解離原理 (D, P) P_1 (作用源の制御), P_2 (作用経路の制御), P_3 (作用源と作用経路の制御), のいずれかによって解離され、f (機能不履行) 形の作用鎖は D, P, P_4 (不履行機能の代替制御) によってのみ解離される。

[定理 2] D, P, P_1, P_2, P_3 は、原理的に a' (エネルギー伝ば), b' (存在形態), c' (作因物転移), d' (供給阻止), e' (存在形態), または / および f' (機能停止) 形の解離作用によって実現され、D, P, P_4 は g' & g'' (機能代替) の形の解離作用によってのみ実現される。

[定理 3] 解離作用 u'_i ($i \in 1, 2, \dots, 5$), g' & g'', または抑制作用 u''_j ($j \in 1, 2, \dots, 5$), によって構成される作用鎖が反転する反転作用 \bar{f} が生じ、f' または f'' による作用鎖が反転すると一つまたは複数の反転作用 \bar{u}_k ($k \in 1, 2, \dots, 5$), が生ずる。

[定理 5] a, b, c, d, e 形の反転作用鎖は原理的に解離原理 P_1, P_2, P_3 のみによって、また \bar{f} 形の反転作用鎖は原理的に P_4 のみによって解離される。

[補助定理 2] H, C, S に外依複方向制御作用鎖 (E, D, F, A, L) が存在するとき、それとそれが依存する D, F, A, L を結ぶ、D, F, A, L からなる抑制連鎖が H, C, S の中に少なくとも 1 本存在しなければならない。

[定理 7] S, F, A, L は原理的に任意の抑制または解離作用鎖から構成され得るが、D, F, A, L は f' または f'' 形の解離または抑制作用鎖からは構成できない。

[補助定理 3] H, C, S において、原理的に S, I, P, S を構成できるための必要条件は、I, P, S を構成する要素間での信号 (または情報) の授受に閑験した作用鎖が全て S, F, A, L として構成できることである。

3. 潜在危険の同定

知能移動ロボットには多様な潜在危険が同定されている¹⁰⁾。本報では、移動ロボットが自律的移動を行う過程で：

(1) 静止対象物 O と衝突する潜在危険；

$$Oe \xrightarrow{T} Ra \xrightarrow{0} O(\cdot)$$

(2) 移動する対象物 M が衝突する潜在危険；

$$Re \xrightarrow{T} Ma \xrightarrow{0} R(\cdot)$$

を特定し、それぞれ潜在危険(1), (2)と定義する。これらの潜在危険はA-Cモデルにより Fig. 1, Fig. 2のように同定される。

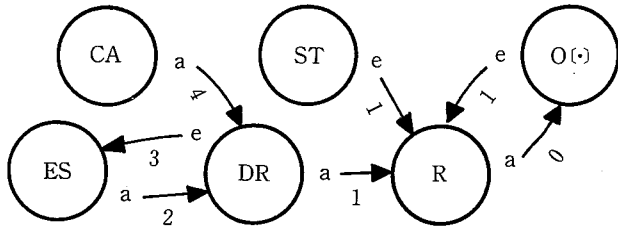


Fig. 1 Identification of Hazard (1)
潜在危険(1)の同定

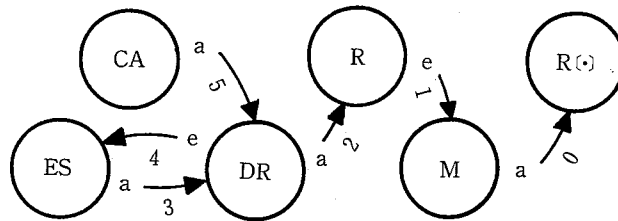


Fig. 2 Identification of Hazard (2)
潜在危険(2)の同定

Fig. 1では、I. P. S. 出力部 DR をロボットの移動側に制御する (CAa-4) ことにより、駆動部が動力源 ES から駆動のためのエネルギーを受け入れる状態となり (DRe-3), 動力源 ES から駆動エネルギーが伝播され (ESa-2), 駆動部がロボットを動作させる (DRa-1)。このとき、対象物 O が移動経路上に存在する (Oe-1) ため、ロボットが対象物と衝突し (Ra-0), ロボットの構造 ST が十分強靱である (STe-1) のでき損 (・) が生ずる。

Fig. 2では、I. P. S. の出力部が駆動部をロボットの移動側に制御する (CAa-5) することにより、駆動部が動力源 ES から駆動のためのエネルギーを受け入れる状態となり (DRe-4), 動力源から駆動エネルギーが伝播され (ESa-3), 駆動部がロボットを作用させる (DRa-2)。このため、ロボットは移動対象物 M の移動経路に存在する (Re-1) こととなり、移動対象物と衝突して、き損 (・) が生ずる。ここでは、系の初期状態として、ロボットが移動対象物と衝突する可能性のない場所に存在していることを仮定している。

4. H. C. S. の構成

4.1 H. R. P. (3)の適用

4.1.1 潜在危険(1)

系の相は：(1)ロボットの停止モード、(0)運動モード、とに分割される。自律的運動の結果生ずる衝突のみを考えているので、Fig. 1において誘因作用鎖 (DRa-1), (ESa-2), (DRe-3) は (Ra-0) の必要条件となっている。(DRe-3) は原理的に D. P. P₁ で解離可能である [定理 1]。動力源遮断インタロック系が次の制御連鎖などからなる H. C. S. として構成される：

$$Ou''_{i-7} \rightarrow SEu''_{i-8} \rightarrow CPu''_{k-5}$$

$$CAu'_i \xrightarrow{-4} DRe \xrightarrow[3]{P_1} ES \quad \dots\dots(1)$$

解離作用鎖 (CAu'_i -4) は動力源の遮断方向のみの S. F. A. L. とでき、他の抑制作用鎖も同様である。この H. C. S. は原理的に S. I. P. S. を構成可能とする必要条件を満足する [定理 7]。

制御連鎖(1)に S. I. P. S. を構成すると、

$$Ou''_{i-7} \rightarrow SEf''_{i-8} \rightarrow CPl''_{i-5}$$

$$CAf'_i \xrightarrow{-4} DRe \xrightarrow[3]{P_1} ES \quad \dots\dots(2)$$

D. I. P. S. を構成すると、

$$Ou''_{i-7} \rightarrow SEb''_{i-8} \rightarrow CPb''_{i-5}$$

$$CAa'_i \xrightarrow{-4} DRe \xrightarrow[3]{P_1} ES \quad \dots\dots(3)$$

となり、共に作用鎖 (e-3) を D. P. P₁ で解離している点は同様である。ここで、例えば、CPにそれぞれ変化 x₁ (フェール) と x₂ (フォールト) が発生すると、(2)と(3)はそれぞれ

$$Ou''_{i-7} \rightarrow SEf''_{i-8} \rightarrow CP(x_1)b_{i-5}$$

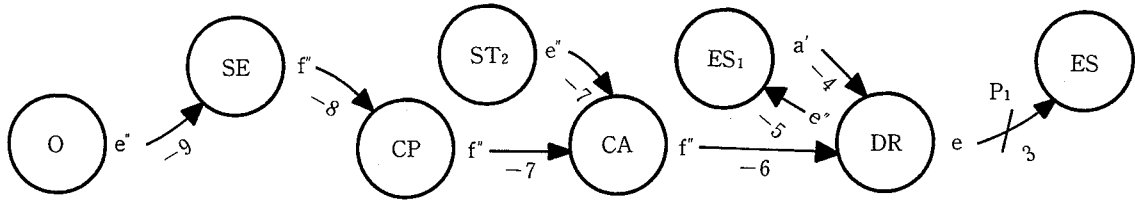


Fig. 3 Conceptualization of an H. R. P. 3-applied H. C. S. with an S. I. P. S. for Hazard (1)
 潜在危険(1)に対して H. R. P. (3)適用の H. C. S.主要部 (S. I. P. S.)

$$CA\bar{b} \xrightarrow{-4} DRe \xrightarrow{-3} ES \quad \dots\dots(4)$$

$$Ou''_i \xrightarrow{-7} SEb'' \xrightarrow{-6} CP(x_2)\bar{f} \xrightarrow{-5}$$

$$CA\bar{f} \xrightarrow{-4} DRe \xrightarrow{-3} ES \quad \dots\dots(5)$$

と反転連鎖を形成して解離が実現されなくなる [定理 3]。しかし、 $(\bar{b} \xrightarrow{-5})$ は X_1 に対するフェールト・セーフ機能を、 $(\bar{f} \xrightarrow{-5})$ は X_2 に対するフェールト・トレランス機構を構成することにより解離され [定理 5]、再び $(e \xrightarrow{-3})$ の解離が可能となる。すなわち、S. I. P. S. ではフェール・セーフ機能により、また D. I. P. S. ではフェールト・トレランス機構により潜在危険が抑制される点が基本的に異なる。

Fig.3 には、S. I. P. S. を用いた H. C. S. の構成を示す。

ここで、 ST_2 は I. P. S. 出力部の構造系下位要素、 ES_1 は駆動部の制御系下位要素の動力源である。ロボットが移動し始めようとしたとき対象物の存在形態形作用 ($Oe \xrightarrow{-9}$) により外界センサ、処理部、出力部が次々と出力を停止する。すると、駆動部は、その制

御系下位要素の動力源 ES_1 が作用して ($ES_1 a' \xrightarrow{-4}$)、駆動部は動力源 ES から完全に遮断された状態となる。

4.1.2 潜在危険(2)

系の相は、ロボットが対象物 M との干渉可能領域に (イ) 存在しないモードと (ロ) するモードとに分割される。はじめ系の相は (イ) のモードにあってそこに留まる限り M と干渉しないことを仮定しているの、誘因作用鎖 ($DRe \xrightarrow{-4}$) は ($Ma \xrightarrow{-0}$) の必要条件となっている。潜在危険(2)を抑止するには ($DRe \xrightarrow{-4}$) を解離すればよいので次の制御連鎖などからなる H. C. S. が構成される [定理 1] :

$$Mu''_i \xrightarrow{-8} SEu''_j \xrightarrow{-7} CPu''_k \xrightarrow{-6}$$

$$CAu'_1 \xrightarrow{-5} DRe \xrightarrow[-4]{P_1} ES \quad \dots\dots(6)$$

前節と同様に制御連鎖は動力の遮断方向のみの S. F. A. L. とすることができるので原理的に S. I. P. S. および D. I. P. S. いずれも構成可能とする必要条件を満足する。

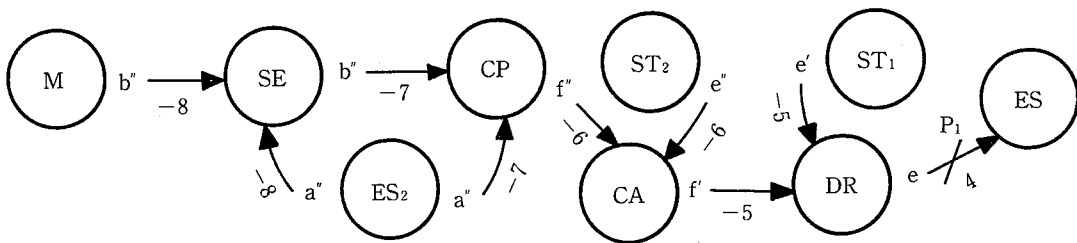


Fig. 4 Conceptualization of an H. R. P. 3-applied H. C. S. with an D. I. P. S. for Hazard (2)
 潜在危険(2)に対して H. R. P. (3)適用の H. C. S.主要部 (D. I. P. S.)

Fig. 4 には D. I. P. S. を用いた H. C. S. を概念設計する。

ES₂ は I. P. S. の動力源, ST₂ は処理部の構造系下位要素, ST₁ は駆動部の構造系下位要素である。移動対象物からの抑制作用 (Mb" $\xrightarrow{-8}$) によってセンサが処理部へ出力し (SEb" $\xrightarrow{-7}$), 処理部が移動対象物の存在を判定して出力部への出力を見合わせる。すると, 出力部も駆動部への出力を見合わせる (CAf' $\xrightarrow{-5}$) ので駆動部は駆動できる状態へ移行できない。ここで抑制作用 u" _i を f" とすると, センサは移動対象物がロボットと干渉しない空間に存在することを常時監視するシステムとなり, それ以外では, 移動対象物がロボットと干渉する空間に存在することを検出するシステムとなる。

4.2 H. R. P. (4) の適用

系の相がすでにロボットが運動するモード, またはロボットが M との干渉可能領域に存在するモードに遷移した後の H. C. S. を検討する。

4.2.1 潜在危険(1)

a. 制動衝突回避

a-i 単純制動衝突回避

直接原因作用鎖 (Ra $\xrightarrow{0}$) は原理的に P₁ によって解離可能である [定理 1]。すなわち, ロボットを停止させたときに他の潜在危険が生じないとき, 次の制御連鎖からなる H. C. S. が構成される:

$$Ou''_{i-5} SEu''_{j-4} CPu''_{k-3} \rightarrow CAu'_{l-2} BRu'_{m-1} Ra \xrightarrow{P_1/0} O \quad \dots\dots(7)$$

制御連鎖は停止方向のみの S. F. A. L. で構成可能

で, 原理的に S. I. P. S. の採用を可能とする必要条件を満足する。

Fig. 5 には, S. I. P. S. を用いた H. C. S. が概念設計されている [定理 2, 7]。ここで, ST₃ と ES₃ はそれぞれ制動部の構造系下位要素と制動部の制御系下位要素の駆動エネルギー源である。対象物からの存在形態形抑制作用によって, 外界センサ, 処理部, 出力部が次々と出力を停止し, 制動部がロボットの運動エネルギーを熱または電気的エネルギーなどに交換することによりロボットを停止させる。

a-ii スキッドが生ずる系

ロボットの構造や環境条件によっては制動に伴いスキッドが発生し, 結果的に衝突が生ずる潜在危険 (Fig. 6) を考慮する必要がある。スキッドへの対抗手段として, 滑りを検出して制動力を ON-OFF 制御する方法が考えられている¹¹⁾。すなわち, 作用鎖 (BR $\xrightarrow{-2}$) は P₁ で解離可能で, 次の制御連鎖などからなる H. C. S. が構成される。

$$RSu''_{i-6} Slu''_{j-5} CPu''_{k-4} \rightarrow CAu'_{l-3} BR \xrightarrow{P_1/2} S \quad \dots\dots(8)$$

ここで解離作用鎖 (CAu' $\xrightarrow{-3}$) は, 滑り状態からの抑制作用 (RSu'' $\xrightarrow{-6}$) に従って制動力の ON-OFF 制御を行うので E. D. F. A. L. となり, 制御連鎖(4)以外に (RSu'' $\xrightarrow{-6}$) と (CAu' $\xrightarrow{-3}$) を結ぶ抑制連鎖が存在しない条件下で, 制御連鎖(8)を構成する抑制作用鎖は全て D. F. A. L. となる [補助定理 2]。従って, I. P. S. は S. I. P. S. を構成することができない [補助定理 3]。

定理 [2], [7] などより Fig. 7 のような H. C.

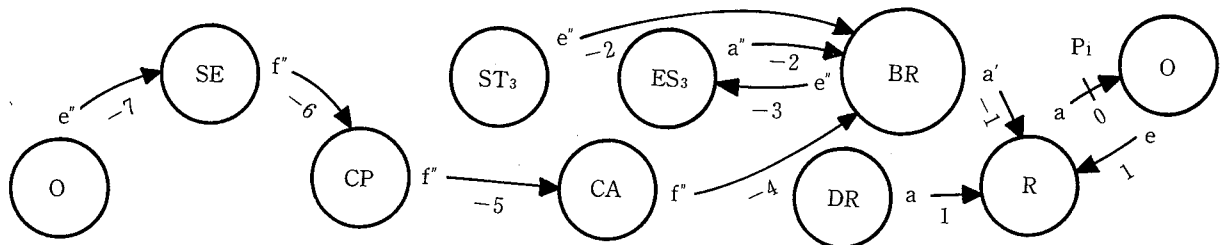


Fig. 5 Conceptualization of an H. R. P. 4-applied H. C. S. to materialize a stop by simply braking for Hazard (1) (S. I. P. S.)
潜在危険(1)に対する単純制動衝突回避 H. C. S. 主要部 (S. I. P. S.)

S. が概念設計される。ここで Sl_1 はスキッド検出センサ, ES_3 は制動部駆動エネルギー源である。連鎖順位を示す数字に * 印をつけた制御連鎖がスキッド制御系である。処理部は, 外界センサからの抑制作用 ($SEf''_{-6} \rightarrow$) とスキッド検出センサからの出力 ($Sl_1d''_{-5*} \rightarrow$) に基づいて, スキッドを抑制しながら制動できるように制動力制御のための演算処理を行い, 出力部を通じて制動力を制御することによりロボットを停止させる。

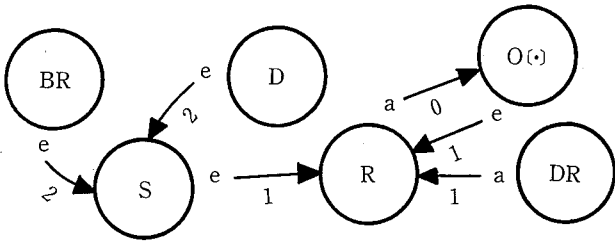


Fig. 6 Identification of Hazard (1) considered of a skid
スキッドのある潜在危険(1)

a-iii 転倒が生ずる系

2足歩行ロボットでは, 不規則な形状をもつ足場などからの外乱に対して, 転倒を防止するため, 平衡制御を行う必要がある。ロボットが停止時に平衡を失い転倒すると, 対象物 0 と衝突する潜在危険が Fig. 8 のように発現する。転倒を防ぐための方法として, 外乱 D やロボットの平衡状態 RB を検出し, 制動や駆動制御を行い, 転倒しないように停止させるものが考えられる。これは実現するため次のような制御連鎖を構成

する:

$$Y_{1,i}u''_{\xi(i)-6} \rightarrow u''_{\eta(j)-5} \rightarrow CPu''_{j-4}$$

$$CAu''_{k-3} \rightarrow Y_{5,l}u''_{\zeta(l)-2} \rightarrow BLu''_{m-1}$$

$$Ra \xrightarrow{P_1} O \quad \dots\dots(9)$$

- $i, 1 \in 1, 2$
- $\xi(i), \eta(j), j, k, \zeta(l), m \in 1, 2, \dots, 6$
- $Y_{1,1} \equiv D, Y_{1,2} \equiv RB, Y_{2,1} \equiv SE_1$
- $Y_{2,2} \equiv Sl_2, Y_{5,1} \equiv BR, Y_{5,2} \equiv DR$

ここで SE_1 は外乱検出センサ, Sl_2 は平衡状態検出センサである。 ($Y_{5,l}u''_{\zeta(l)-2}, l=1 \text{ and/or } 2$) は, 不規則に変化する外乱 ($Du''_{\xi(1)-6}$) と平衡状態 ($RBu''_{\xi(2)-6}$) に対応する E. D. F. A. L. となる。制御連鎖(9) 以外に E. D. F. A. L. の ($Y_{5,l}u''_{\zeta(l)-2}$) と ($Y_{1,i}u''_{\xi(i)-6}$) を結ぶ抑制連鎖が存在しない条件下で, 抑制連鎖を構成する抑制作用鎖は全て D. F. A. L. となる [補助定理 2]。従って I. P. S. は S. I. P. S. とすることができない [補助定理 3]。

定理 [2], [7] などより Fig. 9 のような H. C. S. が概念設計される。 ES_2 は I. P. S. の動力源, ST_5 は平衡機能系の構造下位要素である。処理部は, 外乱検出センサ, 平衡状態検出センサからの出力や, 対象物検出センサからの抑制作用鎖 (SEf''_{-6}) に従って, ロボットを転倒させずに停止させるための演算処理を

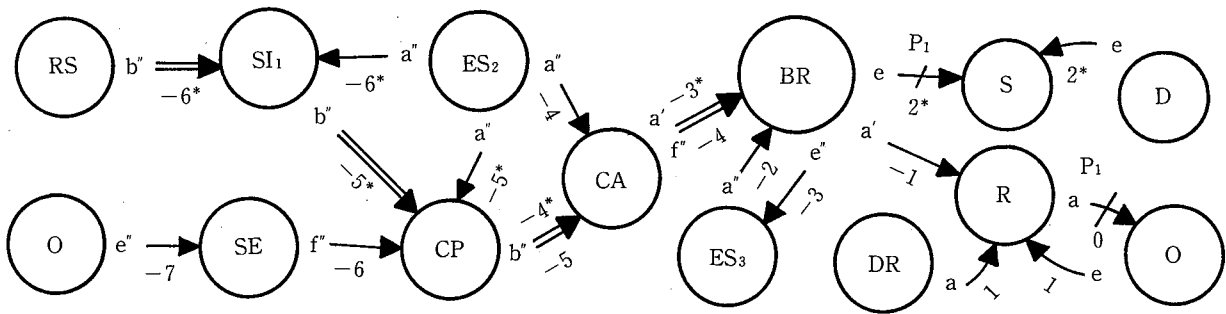


Fig. 7 Conceptualization of an H. R. P. 4-applied H. C. S. to materialize a stop by braking control against a skid
スキッドのある潜在危険(1)に対する制動力の ON-OFF 制御衝突回避
H. C. S. 主要部

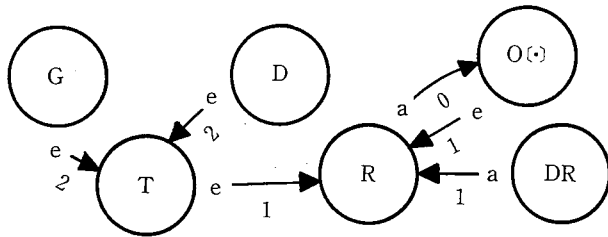


Fig. 8 Identification of Hazard (1) considered of a turnover
転倒のある潜在危険(1)

行い、出力部を通じて、駆動部や制動部を制御しなからロボットを停止状態へと移行させる。

b. 経路制御衝突回避

制御衝突回避よりも経路を変更することによる衝突回避の方が現実的な場合がある。n個の静止対象物 O_i ($i = 1, 2, \dots, n$) に対して経路回避を実現

するための H. C. S. は次の制御連鎖などから構成される:

$$O_i u''_{\xi(i)} \xrightarrow{-5} SE u''_j \xrightarrow{-4} CP u''_k \xrightarrow{-3}$$

$$CA u''_l \xrightarrow{-2} SR u''_m \xrightarrow{-1} Ra \xrightarrow{\frac{P_1}{0}} O_q \quad \dots\dots(10)$$

($i, q \in 1, 2, \dots, n$ $\xi(i), j, k, l, m \in 1, 2, \dots, 6$)

b-i 単静止対象物回避系

まず、単静止対象物 (1回の経路変更操作によって衝突が回避できる範囲の大きさの障害物) O_1 のみを回避すればよい系を検討する。この場合、解離作用鎖 ($SR u''_m \xrightarrow{-1}$) は、抑制作用鎖 ($O_1 u''_{\xi(1)} \xrightarrow{-5}$) に従って静止対象物から隔離する方向のみの S. F. A. L. とすることができる。制御連鎖(10)は原理的に S. I. P. S.

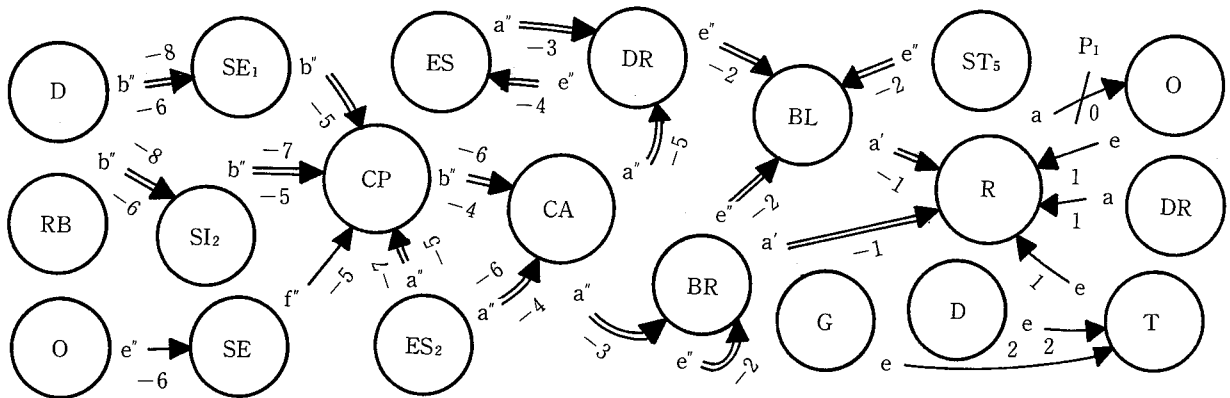


Fig. 9 Conceptualization of an H. R. P. 4-applied H. C. S. to materialize a stop by multi-controls against a turnover
転倒のある潜在危険(1)に対する多元制動制御衝突回避 H. C. S. 主要部

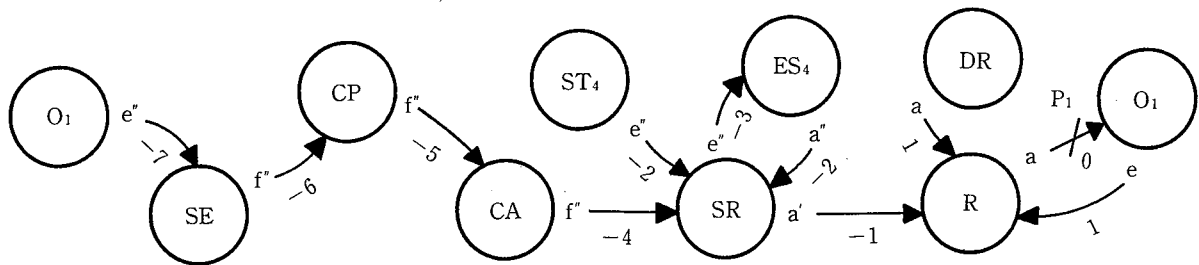


Fig. 10 Conceptualization of an H. R. P. 4 applied-H. C. S. to materialize course control against a single static object
潜在危険(1)に対する経路制御単対象物衝突回避 H. C. S. 主要部 (S. I. P. S.)

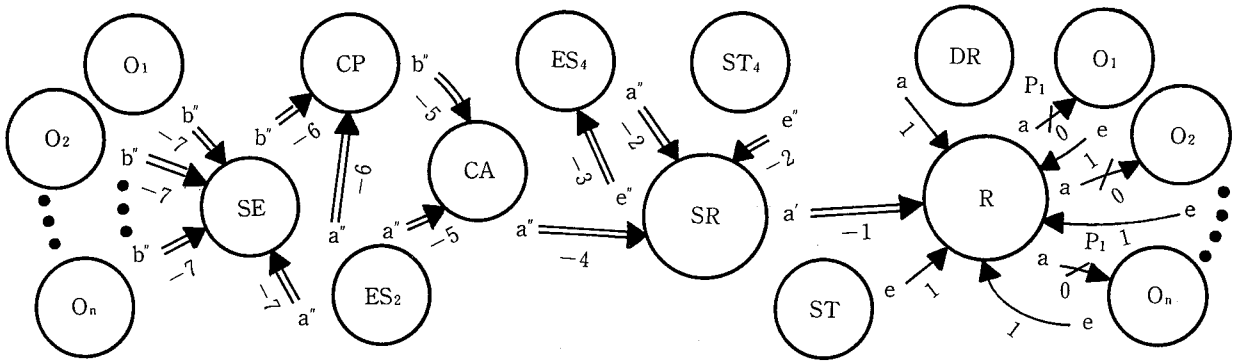


Fig. 11 Conceptualization of an H. R. P. 4-applied H. C. S. to materialize course control against multiple static object
潜在危険(1)に対する経路制御多対象物同時衝突回避 H. C. S. 主要部

とすることが可能である。これを用いた H. C. S. を Fig. 10 に示す。ST₄, ES₄ はそれぞれ操舵部の構造系下位要素と操舵部の制御系下位要素の駆動エネルギー源である。対象物の存在形態抑制作用 (0_ie^{''}→₇) によって、センサ、処理部、出力部が次々と出力を停止する。すると、操舵部は、ES₄ から最大経路変更となる操舵エネルギーが操舵部への伝播される状態へと移行し (SR e^{''}→₃)、エネルギーが伝播され (ES a^{''}→₂)、操舵部がロボットの経路を変更する (SR a^{''}→₁)。

b-i-i 多静止対象物同時回避系

n 個の単静止対象物 0_i (i=1, 2, ..., n) が 1 回の経路変更では、回避できない範囲に分布している系を想定する。解離作用鎖 (SR u^{''}→₁) は、多対象物からの抑制作用鎖 (0_i u^{''}→₅) に従って、全ての対象物を回避するよう経路を複方向に制御しなければならないので S. F. A. L. として構成できない。従って、制御連鎖(10)以外に (SR u^{''}→₁) と (0_i u^{''}→₅) を結ぶ抑制連鎖が存在しない条件下で、この制御連鎖を構成する抑制作用鎖は全て D. F. A. L. でなければならないので S. I. P. S. を構成できない。ここでは、Fig. 11 の H. C. S. が概念設計される。ES₂ は I. P. S. の動力源、ES₄ と ST₄ はそれぞれ操舵部の駆動エネルギー源と構造系下位要素である。外界センサ系 SE が、多対象物の「大きさ・位置」などの情報を処理部に出力する。処理部は、これに基づいて、全ての対象物に対して衝突を回避できる経路を生成するための演算処理を行い、出力部を通じて操舵部に出力する (CA a^{''}→₄)。これによって操舵部が制御され、衝突を回避するロボットの経路が生成されていく。

4.2.2 潜在危険(2)

潜在危険(2)において、誘因作用鎖 (Re^{''}→₁) は直接原因作用鎖 (Ma^{''}→₀) が発現する必要条件となっている。従って、(Re^{''}→₁) の解離は定理 [1] より P₁、すなわちロボットが対象物 M の経路から移動して離隔することによって行われる。これを実現するための H. C. S. は次の制御連鎖などから構成される：

$$\begin{aligned} & \text{Mu}''_{i \rightarrow 7} \rightarrow \text{SEu}''_{j \rightarrow 6} \rightarrow \text{CPu}''_{k \rightarrow 5} \\ & \text{CAu}''_{l \rightarrow 4} \rightarrow \text{Ymu}''_{\xi(m) \rightarrow 3} \rightarrow \text{TRu}''_{n \rightarrow 2} \\ & \text{Re}''_{\frac{P_1}{1} \rightarrow 1} \rightarrow \text{M} \end{aligned} \quad \dots\dots(11)$$

i, j, k, l, ξ(m), n ∈ 1, 2, ..., 6
m ∈ 1, 2, 3

$$Y_1 \equiv \text{DR}, Y_2 \equiv \text{SR}, Y_3 \equiv \text{BR}$$

一般的に、ロボットが任意の運動状態 RM にあって、未知の移動経路を有する対象物 M から、その運動状態を予測して衝突を回避するには、解離作用鎖 (TR u^{''}→₂) は (Mu^{''}→₇) に従う E. D. F. A. L. としなければならない。連鎖(11)以外に (TR u^{''}→₂) と (Mu^{''}→₇) を結ぶ抑制連鎖が存在しない条件下で、この抑制連鎖を構成する抑制作用鎖は全て D. F. A. L. となるので I. P. S. は S. I. P. S. を構成することはできない。

対象物 M が n 個存在する場合の H. C. S. の概念設計

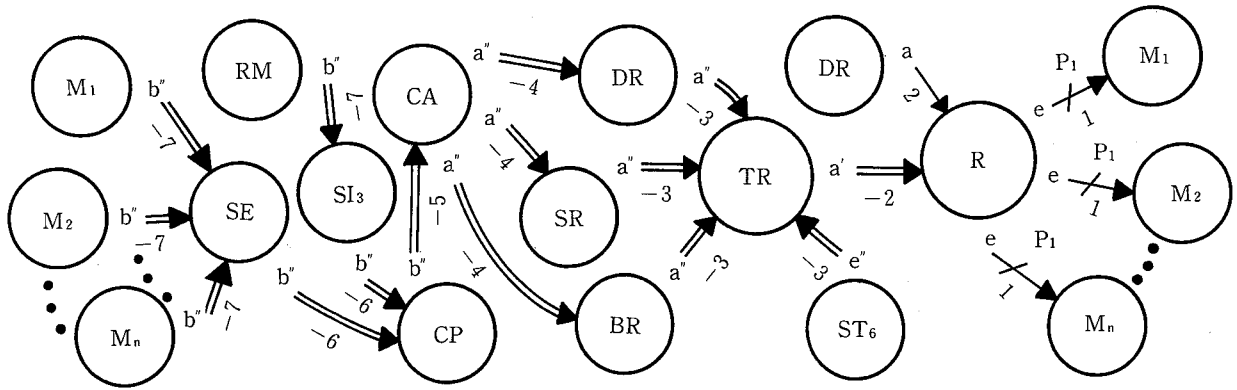


Fig. 12 Conceptualization of an H. R. P. 4-applied H. C. S. to materialize a multi-controls against multiple mobile object
 潜在危険(2)に対する多元移動制御衝突回避 H. C. S. 主要部

を Fig. 12 に示す。ここで、SI₃はロボットの運動状態を検出するセンサ、ST₆は移動機能系の構造系下位要素である。外界センサ系SEは、対象物M_i (i=1, 2, ..., n) からの情報 (M_ib' →) に基づいて、その位置、運動方向、速度などを検出する。処理部は、外界センサとSI₃などから出力に基づいて、全ての対象物に対して衝突回避を実現するための移動計画生成のための演算処理を行い、出力部を通じて、駆動部、操舵部、制動部を制御する。これにより、衝突を回避する

ための移動機能系が発動して (TRa' →), 衝突が回避される。

4.3 H. C. S. の適用範囲

本報で概念設計されたH. R. P.(4)適用のH. C. S.の適用範囲を考察する。本報で同定された潜在危険(1)および(2)と全潜在危険空間“H”との関係はFig. 13として表わされる。“H”は通常未知の空間であり、その空間内で同定された潜在危険(1)と(2)とが占める

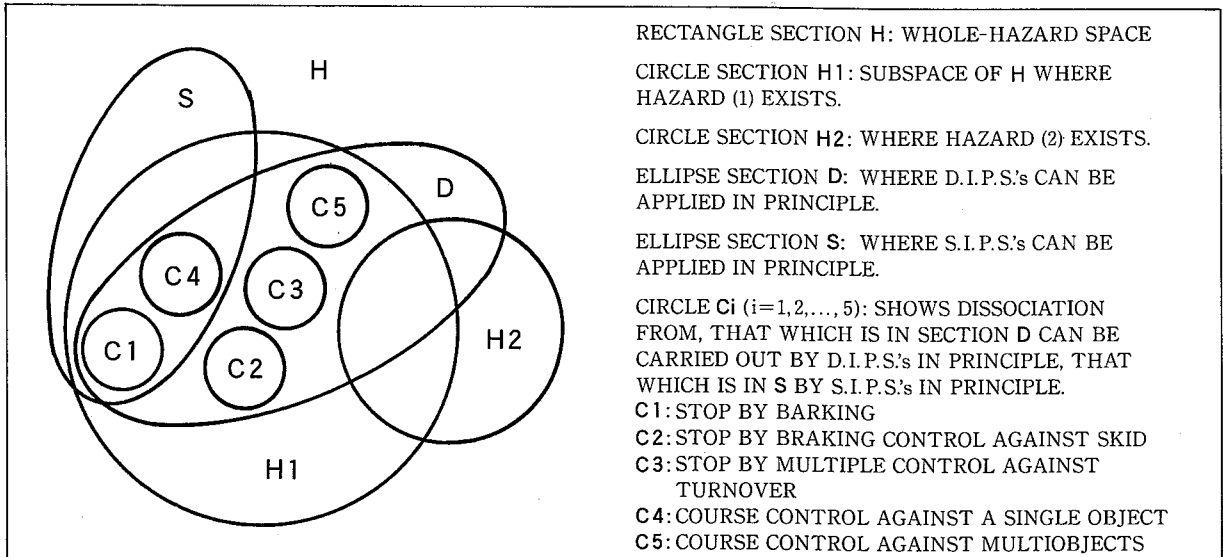


Fig. 13 The relationships among hazards, applicability of H. C. S.'s and dissociation forms
 D.I.P.S. と S.I.P.S. から構成される H.C.S. の適用範囲

領域の枠組みが“H1”と“H2”である。本報で構成されたH. C. S.のうち、S. I. P. S.を用いたものは楕円領域S内の潜在危険に、D. I. P. S.を用いたものは楕円領域D内の潜在危険に対して適応可能である。H1とH2で領域SやDの含まれない部分は、H. C. S.の異常や故障などにより生ずる潜在危険である。対象物0との衝突回避形式：C1(単純制御衝突回避)、C2(対スキッド制御制御衝突回避)、C3(平衡制御制御衝突回避) C4(経路制御単静止対象物衝突回避)、C5(経路制御多静止対象物同時衝突回避)を行うH. C. S.のうちD. I. P. S.を原理的に構成可能なものが領域D内に、またS. I. P. S.で構成可能なものがS内に表示されている。

全ての潜在危険空間Hに対応できるH. C. S.を構成することは不可能であるから、対処すべき潜在危険の優先順位を決定するなどして、合理的にH. C. S.を構成していくことが重要である。

5. 結 論

自律形移動ロボットの潜在危険制御系が、作用鎖の解離理論に基づいて構成された。本報では、ロボットが静止対象物と衝突する潜在危険および移動対象物がロボットに衝突する潜在危険を取りあげ、まず潜在危険抑制原理(3)を適用した潜在危険制御系の構成を論じた。次に、抑制原理(4)を適用して、それぞれ単純制御衝突回避、対スキッド制御制御衝突回避、平衡制御制御衝突回避、および経路制御単静止対象物衝突回避、経路制御多静止対象物同時衝突回避、そして動対象物衝突回避を実現する潜在危険制御系の構成が論じられた。さらに、安全確認情報処理系と、危険検出情報処理系の各潜在危険に対する適用範囲が図式化された。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、京大工学部・井上紘一教授、都立科技大・鈴木喜久教授、鉄道総研・秋田雄志主任研究員の御指導・御助言をいただいたことを感謝する。

(平成元年3月30日 受理)

参 考 文 献

- 1) 吉川, ロボットと人間, NHK ブックス 475, NHK 出版協会, (昭60); 東京.
- 2) 加藤, からくりからマイ・ロボットへ, 日本機械学会誌, 87-792, (昭59), 1245.
- 3) 佐藤・井上, ロボットの安全性について, 日本機械学会誌, 90-827, (昭62), 1351.
- 4) 佐藤・井上, 人間-ロボット系の安全性評価(第1報), 日本機械学会論文集, 51-468, C (昭60), 2188.
- 5) 佐藤・井上・熊本, 人間-ロボット系の安全性評価(第2報), 日本機械学会論文集, 52-474, C (昭61), 823.
- 6) 佐藤・井上・熊本, 人間-ロボット系の安全性評価(第3報), 日本機械学会論文集, 52-475, C (昭61), 1110.
- 7) 佐藤・井上, 人間-ロボット系の安全性評価(第4報), 日本機械学会論文集, 52-482, C (昭61), 2754.
- 8) 佐藤・井上, 人間-ロボット系の安全性評価(第5報), 日本機械学会論文集, 54-505, C (昭63), 2164.
- 9) 文献(8)の2171ページ.
- 10) 文献(4)の2192ページ.
- 11) 乾, カーエレクトロニクスと安全問題(現状および可能性), 電通学会報告, S-87-16, (昭62), 48.