

特集 ロボットの動かし方に着目した信頼性設計手法の開発*

A Method of Reliability Design by Planning a Robot's Operation

安井俊徳

Toshinori YASUI

高田祥三

Shozo TAKATA

山田篤史

Atsushi YAMADA

原 純一

Junichi HARA

小島正年

Masatoshi KOJIMA

Reliability improvement activities are implemented to improve quality and productivity of a manufacturing system. In this paper, we focus on operation planning, which is one of the reliability factors to be considered at the stage of machine design.

Operations are usually designed to utilize a machine to its full potential. Operation planning is a decisive factor for the load of the machine. Therefore, if we plan the operation not only for maximum productivity but also for the appropriate load considering its durability, we can use the machine for a longer term without changing its structural design.

From this point of view, we simulate the life of industrial robots under different operation plans by modeling the gear wear of their joints, and select the best operation in terms of both their speed and life. Finally, we have applied such robots to the actual assembly line and proved their high reliability.

Key words : Reliability design, Operation planning, Robot, Gear wear, Simulation,

1. 緒言

設備の信頼性向上活動は、自動化の持つ高品質・高生産性という強みを最大限に発揮させるために、設備をそのライフサイクルの間、安定稼働させることを狙いとする。中でも、自動車部品のように数年間以上に、総計数百万個以上を生産するような場合には、設備の長期的な信頼性が求められる。そのためには、診断技術などを用いた運用段階における信頼性向上だけでなく、故障しにくい設備設計や保全しやすい設計など設計段階における信頼性向上が非常に重要である。我々はその一つとして作業設計に着目した。

作業設計とは、設備に目的の作業を行わせるための動かし方を決める設計であるが、その動かし方が設備の劣化の進行度合いを大きく左右することがあり、設計段階の信頼性向上にとって重要な要素の一つである¹⁾²⁾。もっと積極的な見方をすれば、作業設計による工夫は、設備自身に変更を加えず動かし方を改善するだけで、効率良く信頼性を向上できる手法であるといえる。今回、産業用ロボットの作業設計を対象に、関節の歯車にかかる負荷を低減し信頼性を向上する信頼性設計手法を開発した。具体的には、工程の内容に応じて歯車の摩耗の少ないロボットの動かし方を決める作業設計支援システムを開発し、自動車用エアコンの組立ラインに適用してロボットの長期信頼性を向上す

ることができた。以下に報告する。

2. ロボットの信頼性向上の新たな取り組み

2.1 ロボットの信頼性向上の課題

当社では、フレキシブルで製品の切り替わりにも強い自動化ラインを目指し、1万台以上のロボットが導入されている。ロボットは、劣化により故障が発生したり動作精度が低下したりするとオーバーホールにより再生されるが、導入台数の増加とともに増えているオーバーホール関連の保全費が問題となってきた。そこで、ロボットの信頼性向上として、このオーバーホールまでの期間の延長に取り組むこととした。

Fig. 1はオーバーホールの原因を調査したものであり、最も多いのは歯車摩耗である。また、モータブラシ摩耗とエンコーダ異常に関しては、対策としてDCサーボモータからACサーボモータへの切り替えを進めており、今後減少する見込みである。したがって、オーバーホールまでの期間を延長するための課題は、歯車摩耗の対策であると判断した。

2.2 ロボットの作業設計による着眼

歯車摩耗は歯車にかかる負荷によって決まるが、その歯車にかかる負荷がロボットの動かし方によって異なることは容易に推察できる。たとえば、速く動かし

* (財)日本科学技術連盟の了解を得て、「第32回信頼性・保全性シンポジウム報文集」より転載

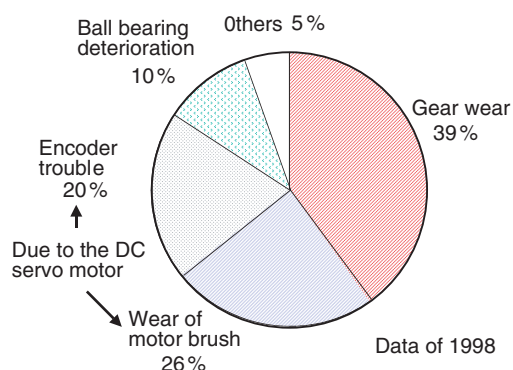


Fig. 1 Factors of robot overhauls

ているロボットの方が、遅く動かしているロボットより、歯車の負荷が大きいことは経験的に分かっている。

これまでロボットの動かし方を決める作業設計では、ロボットの動きを所定時間内に収めることや他の構造物との干渉を回避することなどを重点に考慮してきた。しかし、この作業設計を工夫することで、歯車の摩耗を低減しオーバーホールまでの期間を延長できると考えられる。そこで、今回はこの作業設計を信頼性向上の面から活用し、歯車の摩耗を低減する研究に着手した。

3. 歯車摩耗の定量化³⁾

3.1 歯車摩耗の定量化の必要性

工程として、ロボットの一連の作業は、位置、姿勢、速度、加速度という要素で設定される動作の組み合わせで作られている。歯車の摩耗量はこの各動作の内容に依存するが、一つの作業のなかにも速い動作や遅い動作、歯車にかかる負担の大きい姿勢や小さい姿勢など様々あり、当然、動作によって生じる摩耗量も異なる。したがって、作業設計において効率的に摩耗量を低減するには、各動作の摩耗量とその合計を定量的に把握しながら、工程としてロボットの一連の動かし方を決められるようにする必要がある。そこで、まず、個々の動作と歯車摩耗の関係を定量的に求めることとした。

3.2 潤滑状態における歯車の摩耗メカニズムの考察

摩耗は一般的に、接触面にかかる圧力とそのすべり距離の積によって計算できる。ロボットの歯車摩耗の定量化についての研究は、これまで中村らによるロボットの寿命推定システム⁴⁾が報告されている。しかし、潤滑状態の影響が考慮されていないために、高精度な作業をするロボットには適用できないという問題

があった。そこで、まずロボットの歯車の潤滑状態について考察することにした。

潤滑状態では、歯車の歯面には潤滑油膜が形成されるが、歯車のように歯面間の圧力が高圧な場合は潤滑油膜が薄くなり、歯面粗さとの比に応じてFig. 2に示すような歯面の金属が直接接触している部分が存在する。このとき、歯面にかかる圧力は金属が直接接触している部分にかかる圧力と潤滑油膜が支える圧力とに分担される。この現象はEHL (elasto-hydrodynamic lubrication: 弾性流体潤滑) 理論⁵⁾によりモデル化されている。したがって、この分担割合を求め、歯面の金属接触部分の圧力を計算することで摩耗量を算出することができる。

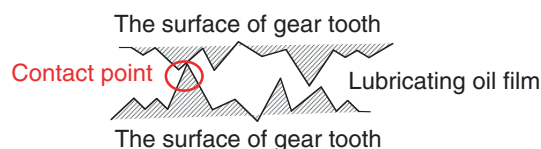


Fig. 2 Lubrication of contact surface of gear tooth

しかし、EHL理論は一定の速度と負荷で回転する歯車の場合には容易に適用できるが、ロボットの歯車の場合には、回転速度や負荷が激しく変化しつづけ、それによっても金属が直接接触する部分にかかる圧力と潤滑油膜が支える圧力の分担割合も刻々と変わることから、単純にEHL理論を適用することは難しい。

そこで、ロボットの動作を時間的に細分化し、歯面の摩耗を微視的に捉えることで、EHL理論を適用することを考えた。つまり、一瞬一瞬で歯面の圧力と相対滑り距離を計算し、そのときに成り立つ潤滑状態から歯面の金属接触部分の圧力を求め、摩耗量を計算する。こうして微視的に計算した摩耗量をロボットの動作全体について積算することで、ロボットがある動作をするときに発生する歯車の摩耗量を算出する方法である。そこで、この考え方に基づく具体的な歯車の摩耗モデルを構築した。

3.3 歯車摩耗モデル

前節の考え方にに基づき、ロボットの歯車の摩耗量を計算するステップをFig. 3に示す。

- (i) ロボットの動きから関節への負荷を算出する。
- (ii) 関節にかかる負荷からその関節の歯車の歯面にかかる負荷を算出する。
- (iii) 歯面にかかる負荷からEHL理論に基づき歯面

の金属接触部分の圧力を求める。

- (iv) 歯面の金属接触部分の圧力と相対滑り速度から摩耗量を計算する。

ロボットの動作の開始時から終了時までを細分化し、この手順で繰り返し計算して、歯車の摩耗量を求める。ロボットの第 j 関節の歯車の摩耗量の求め方を以下の (i) ~ (iv) で説明する。

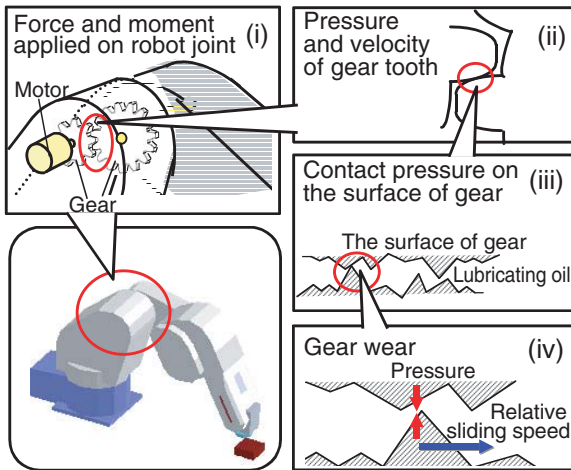


Fig. 3 Procedure of calculating gear wear

(i) 関節負荷

ロボットは目的の動作をするために、各関節の角度を変更するが、その際、関節には負荷として力とモーメントが発生する。第 j 関節にかかる力 \vec{F}_j は、直結されている第 j リンクの自重と運動 $\vec{F}_j g_j$ と手先側の第 j + 1 関節の力 $\vec{F}_{r_{j+1}}$ との和からなり、式 (1) で求められる。第 j 関節にかかるモーメント \vec{M}_j も同様に、式 (2) で求められる。

$$\vec{F}_j = \vec{F}_j g_j + \vec{F}_{r_{j+1}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_j g_j &= m_j (\vec{g}_j + \vec{a}_j) \\ \vec{F}_{r_{j+1}} &= C_j \vec{F}_{j+1} \\ \vec{M}_j &= \vec{M}_j g_j + \vec{M}_{r_{j+1}} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \vec{M}_j g_j &= [J_j] \vec{a}_j + \vec{\omega}_j \times [J_j] \vec{\omega}_j + \vec{r} g_j \times \vec{F}_j g_j \\ \vec{M}_{r_{j+1}} &= C_j \vec{M}_{j+1} + \vec{l}_j \times \vec{F}_{r_{j+1}} \end{aligned}$$

- ただし、 m_j : 第 j リンクの質量
 C_j : 第 j リンクの姿勢を表す行列
 \vec{l}_j : 第 j リンクの位置を表すベクトル
 $\vec{r} g_j$: 第 j リンクの重心ベクトル
 $[J_j]$: 第 j リンクの慣性テンソル
 \vec{a}_j : 第 j 関節の加速度ベクトル
 \vec{g}_j : 第 j 関節の重力加速度ベクトル
 $\vec{\omega}_j$: 第 j 関節の角速度ベクトル

\vec{a}_j : 第 j 関節の角加速度ベクトル

(ii) 歯面負荷

関節にかかる力とモーメントは、歯車の歯面に圧力と相対滑り速度という負荷を与えている。歯面の圧力 P_j は、歯面のかみ合い部分における歯幅あたりの荷重であり、関節にかかるモーメント \vec{M}_j の歯車の軸回転成分 M_{Z_j} と歯車のピッチ円半径 R_{p_j} 、有効歯幅 B_j 、かみ合い歯数 Z_{e_j} 、減速比 R_{g_j} から求められる。また、相対滑り速度 V_j は、関節の回転角速度 ω_j と歯車のピッチ円半径 R_{p_j} 、減速比 R_{g_j} を乗じたものである。この計算を式 (3), (4) に示す。

$$P_j = M_{Z_j} (R_{p_j} B_j Z_{e_j}) \quad (3)$$

$$V_j = \omega_j R_{p_j} R_{g_j} \quad (4)$$

(iii) 歯面の金属接触部分の圧力

歯車の歯面には潤滑油膜が形成されており、歯面にかかる圧力 P_j は、歯面粗さのために金属が直接接触している部分にかかる圧力 P_{m_j} と潤滑油膜が支える圧力 P_{l_j} とに分担される。これを式 (5) に表す。また、圧力 P_{m_j} を求める式を式 (6) に、圧力 P_{l_j} を求める式を式 (7) に表す。ここで、未知数は圧力 P_{m_j} 、圧力 P_{l_j} 、油膜比 Δ の3つであるので、圧力 P_{m_j} は式 (5), (6), (7) の連立方程式から求められる。

$$P_j = P_{m_j} + P_{l_j} \quad (5)$$

$$P_{m_j} = 0.80 \eta L_c E' \beta^{0.5} \alpha^{1.5} G_c (\Delta) \quad (6)$$

$$P_{l_j} = [2.65 \alpha^{0.54} (\mu_o u)^{0.7} E'^{-0.03} R^{0.43} \sigma^{-1}]^{7.7} \Delta^{-7.7} \quad (7)$$

- ただし、 η : 粗面の突起密度
 L_c : 両歯面の接触幅
 E' : 等価縦弾性係数
 α : 圧力粘度係数
 μ_o : 潤滑油の粘度
 u : 両歯面の平均速度
 σ : 歯面粗さの自乗平均
 β : 粗面の平均半径
 G_c : 弾性変形部分の面積
 R : 等価曲率半径

(iv) 歯車の摩耗量

摩耗量 W_j は、潤滑状態に応じた歯面の金属接触部分の圧力と相対滑り速度に比例しており、式 (8) のように計算する。ここで、 P_{m_j} は式 (6)、 V_j は式 (4) で計算した値を使用する。

$$W_j = K_j \int P_{m_j} V_j dt \quad (8)$$

ただし、 K_f : 摩耗係数

3.4 歯車摩耗モデルの検証

前節で構築した歯車の摩耗モデルと、実際のロボットにおける摩耗との整合性を検証した。

実験装置はロボットの関節を一つ抽出した構造とした。

Fig. 4に実験装置の構造と外観を示す。実験装置は検証対象の歯車とそれを駆動するモータ、歯車に負荷を与えるためのリンクと錘により構成される。実際のロボットの動きでは、関節は起動と停止を短時間に何度も繰り返すので、リンクを台形速度パターンで反復運動させることとした。また、リンク先端の錘の質量を変更することで、歯車に与える負荷を調整できる。

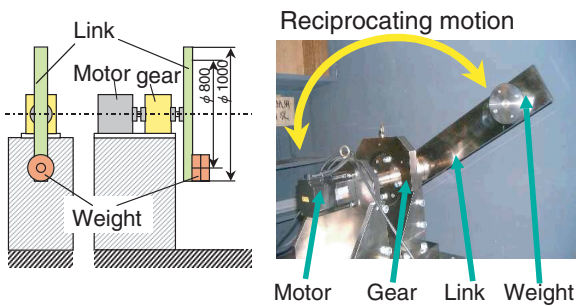


Fig. 4 Test device for the gear wear

今回考案した摩耗モデルを使用し、この実験装置でリンクが1往復する際に発生する摩耗量を計算すると、Fig. 5のようになる。加減速時に潤滑油膜の厚さが薄くなり、摩耗が発生することが予測される。

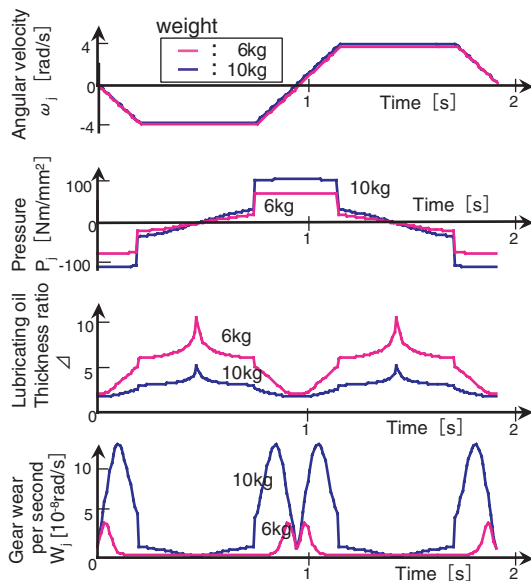


Fig. 5 Theoretical value of the test case

また、歯車に与える負荷と予測摩耗量の関係をまとめたものをFig. 6に示す。Fig. 6から以下のことが分かる。

- ・ 負荷 (Fig. 6 A点) までは、常に十分な厚さの潤滑油膜が形成され、摩耗はほとんど発生しない。
- ・ その負荷を越えるとロボットの使用限界の負荷 (Fig. 6 B点) まで、摩耗量は急激に増大する。

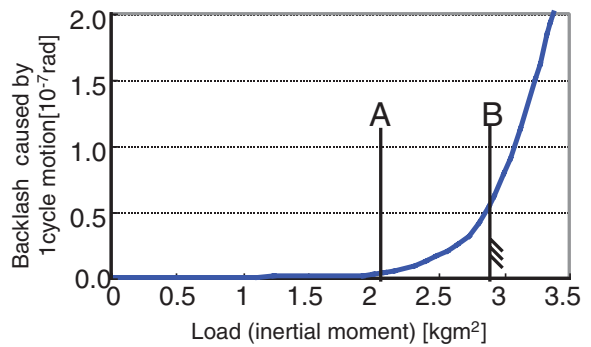


Fig. 6 Backlash and load on link (theoretical)

そこで、モデルでの予測結果を検証するため、A点付近、B点付近、その中間点の条件で負荷を与え、摩耗量を実測することとした。

リンクの反復運動を10万サイクルさせるごとに、レーザー変位計で歯車のバックラッシュを計測して、1サイクル分の摩耗量に換算した結果をFig. 7に示す。A点付近である錘6kgと7kgの間において、摩耗量の増大が計測され、考案した摩耗モデルでの予測値とよく一致した。また、B点付近および中間点においても予測値は実験値とよく一致した。以上の結果より、今回考案した摩耗モデルが、実際のロボットにおける歯車の摩耗量を精度よく推定できることを検証した。

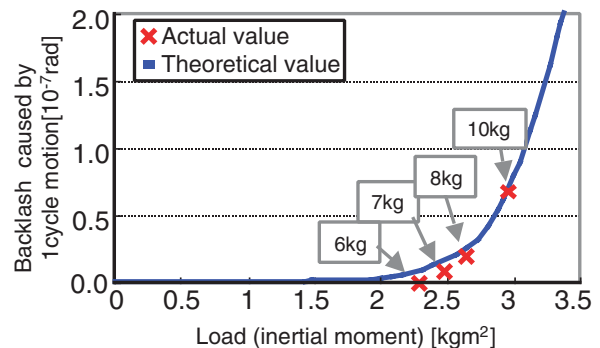


Fig. 7 A verification of gear wear model

4. 開発したシステム

3章で構築した摩耗モデルを組み込んだロボット作業設計支援システムを開発した⁶⁾。システムの構成をFig. 8に示す。このシステムはロボットの動作を制御するコントローラにパソコンを直結した構成となっている。設計者はこのパソコンを使って、コントローラから作業内容である動作プログラムを取り込み、歯車の摩耗量で評価しながら、それを修正する。また、修正した動作プログラムはコントローラに戻すことで、すぐに実機に反映できる。

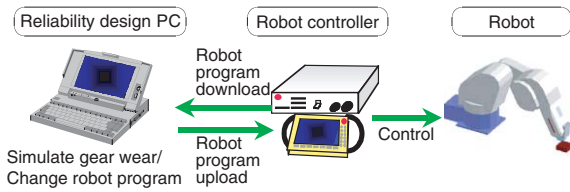


Fig. 8 Reliability design support system

Fig. 9は、このシステムで、6軸ロボットがある作業をしたときの予測摩耗量を示したものである。各関節に動作別の摩耗量とその合計がグラフで表示されるため、その面積の大きさに設計者は摩耗量が多い動作を見つけることができる。そして、設計者は、摩耗量の多い動作を修正していく。

例えば、次章の事例の一つでは、ロボットの動作の位置を見直し、速度を下げることで、摩耗量が多かった第1関節の歯車の摩耗量を約1/2に低減した。

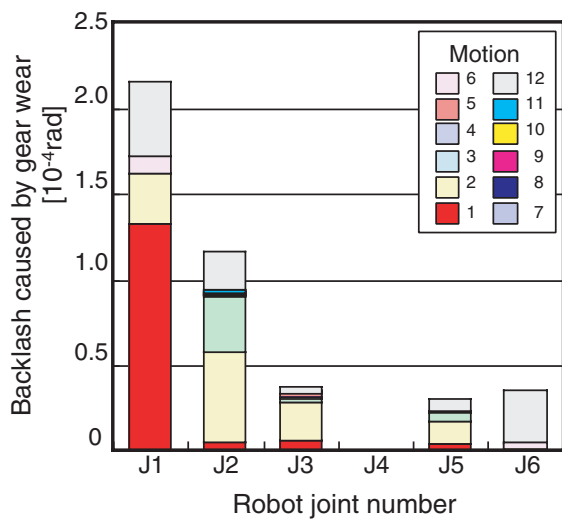


Fig. 9 Estimated gear wear of each joint of the robot

5. 適用効果

開発したシステムを自動車用エアコン組立ラインのロボット11台の作業設計で使用した。Fig. 10に設備の外観図を、Fig. 11に作業設計の改善によるオーバーホールまでの期間の延長効果を示す。ラインの生産量は月産4万台であり、歯車の仕様から許容できる摩耗量はである。これに基づき、オーバーホールまでの期間を算出すると、改善前は平均4.8年だったが、改善後は平均7.9年と予測される。オーバーホールまでの期間が11台の平均で約1.6倍延長できており、これによりオーバーホール関連の保全費は約40%低減できる見込みである。さらに、ラインは実際4、5年ごとの製品の切り替わりに合わせて再編成されることが多いため、オーバーホールによる生産障害はほとんど起こらないという効果も大きい。現在、ラインの立ち上げから3年経過しているが、これまで1台もオーバーホールせずに順調に稼働している。

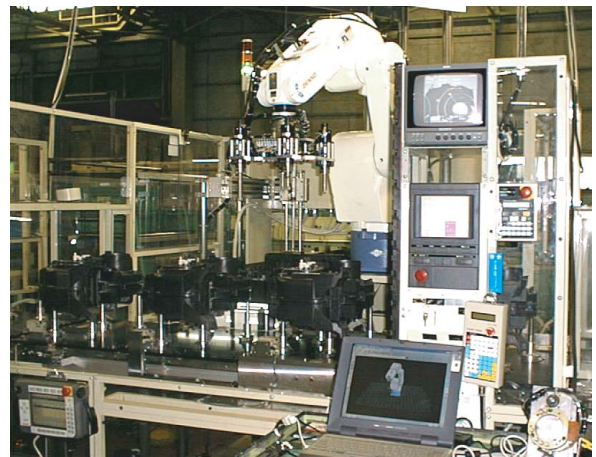


Fig. 10 The robot in the assembly line

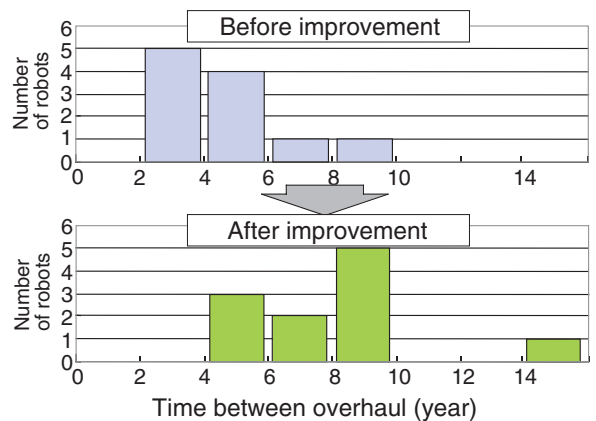


Fig. 11 The effect of assembly robots

6. 結言

設計段階における信頼性向上活動の一つとして、作業設計の工夫による信頼性向上に着目し、産業用ロボットを対象に歯車の摩耗量低減を目的とした信頼性設計手法の開発に取り組んだ。

ロボットの作業設計において摩耗量を低減するためには、ロボットの動作と歯車摩耗の関係を定量化することが不可欠であるため、潤滑状態を考慮した摩耗モデルを構築した。そして、この摩耗モデルを組み込んだ作業設計支援システムを開発し、実際のラインに適用してロボットの長期的な信頼性を向上した。

作業設計による工夫は、高耐久材料の採用など設備自身の変更は行わず、動かし方を改善するだけで、効率良く設備の信頼性を向上できる手法である。この考え方は旋盤やマシニングセンタなど、動かし方を設計する汎用性の高い生産設備に広く適用できると考えられる。また、ロボットでは、作業設計でわかった短寿命部品のみ強度を変更するセミオーダー化など、作業設計と本体のメカ設計とを組み合わせることにより、さらに効果的な信頼性向上が期待できる。

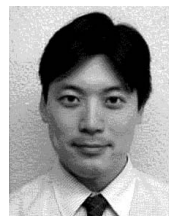
<参考文献>

- 1) 高田祥三：ライフサイクルメンテナンス，精密工学会誌，65，3（1999）349-355
- 2) A. Yamada, M. Kurihara, S. Takata, H. Asama, T. Kohda : Life-cycle Simulation Applied to the Operation Planning of Robot Manipulator, Proceedings of Life Cycle Design '98（1998），265-274
- 3) 山田篤史，高田祥三：設備ライフサイクルシミュレーションに基づく産業用ロボットの関節歯車の摩耗予測システム，精密工学会誌
- 4) 中村尚範，酒井浩久，三浦洋憲，坂本好隆：劣化モデルに基づくロボットの寿命推定システムの構築，精密工学会誌，63，11（1997）1620-1624
- 5) Dowson, D.,Higginson, G. R. : Elasto- Hydrodynamic Lubrication, Pergamon Press（1966）
- 6) 山本亮祐，山田篤史，高田祥三，安井俊徳，榊原聡：ライフサイクルシミュレーションに基づくロボットの作業設計支援システム，1999年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，548

<著 者>



安井 俊徳
(やすい としのり)
生産技術部
生産システムの開発に従事



山田 篤史
(やまだ あつし)
生産技術部 工学博士
積層排気センサ素子加工ラインの工程設計に従事



原 純一
(はら じゅんいち)
冷暖房製造2部
カーエアコン工場の設備保全業務に従事



小島 正年
(こじま まさとし)
(株)デンソーウェーブ FA事業部
ロボットの開発，設計に従事



高田 祥三
(たかた しょうぞう)
早稲田大学理工学部経営システム
工学科教授 工学博士
生産システム工学，メンテナンス工学，
ライフサイクル工学などの研究に従事