駆動冗長性をもつ閉リンク機構の動力学解析

吉川 恒夫* 横小路 泰義* 渡辺 直満*

Dynamics Analysis of Closed Link Mechanisms with Redundant Actuators

Tsuneo YOSHIKAWA Yasuyoshi YOKOKOHJI Naomitsu WATANABE

Closed link mechanisms are useful for tasks that require high speed, high precision, and large payload capacity. It is expected that this kind of mechanisms will be used widely in future. A closed link mechanism with redundant actuators, which is called redundant actuator system, has the potential to make the maximum payload larger.

This paper discusses computational schemes of the inverse and forward dynamics of closed link mechanisms with redundant actuators, which are applicable to wider cases than former method. Then we give an example of cooperative manipulation by two robot arms, and the inverse dynamics is given using the proposed computational scheme. The proposed method enables us to obtain a general solution of closed link dynamics without calculating internal forces.

Key Words : Closed link mechanism, Redundant actuator, Inverse dynamics

1. はじめに

閉リンク機構は剛性が高く、しかも可動部を軽量化できるので、高速・高精度・高負荷の作業に適しており、幅広い分野での応用が期待されている。

閉リンク機構の動力学は、ラグランジュ関数を求めラグランジュの方程式により計算が行われることが一般的であるが、効率的な計算法とは言えない。そこで、ループの一端を切り離し、仮想トリー構造の力学系とした上で、切り離した端点の変位が等しいという拘束条件を導入する方法について、研究が行われている¹⁾²⁾³⁾。Nakamura らは拘束条件を能動関節に関する受動関節のヤコビ行列として表して閉リンク機構の理論に帰着させている²⁾³⁾。

一般的な閉リンク機構は閉ループ内に受動関節を数個もち、能動関節位置により受動関節位置が定まる。ここで構造的に可制御であるための受動関節の最大数は閉リンクの構造に依存し、平面リンクの一般的な場合で3、

一般の空間リンクでは6となる。それがこの最大数より小さい場合には閉リンク機構は冗長なアクチュエータをもつことになり、与えられた運動から関節トルクへの変換は一意には定まらない。このような閉リンク機構を冗長駆動系とよぶ。Nakamura らはこの冗長性を利用して駆動冗長性のある閉リンク機構が、非冗長駆動系の閉リンク機構において各アクチュエータの出力を大きくした場合に比べて最大負荷能力を大きくしたり、応答速度を高める可能性をもつことを示している²⁾³⁾。しかし、彼らは、式の導出において受動関節の存在を仮定しており、すべてが能動関節であるような系は扱えない。また、切断点の任意性にも制約がある。すべてが能動関節であるような系は、複腕協調作業などにみられ、さらに受動関節が存在してもその摩擦力が無視できないときには能動関節のみからなる系と同様な扱いが必要となる。

本論文では、このような駆動冗長性をもつ閉ループ系を形成するロボット機構について、Nakamura らの方法³⁾を基礎にして、より適用範囲の広い逆動力学および順動力学の計算法を提案する。

原稿受付 1992 年 11 月 4 日

* 京都大学工学部

Fig. 1 Original redundant actuator system

2. 逆 動 力 学

提案する冗長駆動系閉リンク機構の逆動力学の計算法を以下に示す。

ステップ1 Fig. 1 に示すもとの冗長駆動系において適当に選んだ冗長な能動関節を受動関節と見なした(関節トルクを0とした)非冗長駆動系を考える。(Fig. 2) (受動関節と見なす冗長な能動関節の選び方は、非冗長駆動系にしたとき能動関節の速度により受動関節の速度が一意に定まるように選ぶ。)

ステップ2 Nakamura らの手順により非冗長駆動系の関節トルクを求める。すなわち、

- (a) 適当な受動関節で仮想的に切断し仮想トリー構造をつくる。このとき、切断されなかった受動関節には仮想的なアクチュエータを仮定する。(Fig. 3)
- (b) 閉リンク機構に要求される運動とまったく同じ運動をするものとして、仮想トリー構造の関節トルクを求める。
- (c) 仮想トリー構造の関節トルクから拘束条件を考慮することにより、もとの非冗長駆動系の関節トルクを求める。

ステップ3 非冗長駆動系の関節トルクから各関節間の拘束関係を考慮することにより、もとの冗長駆動系閉リンク機構の関節トルクを求める。

この計算法の新しい点は、ステップ2すなわちNakamura らの方法³⁾の前後に新たにステップ1と3を加えるところであり、これにより、閉リンク機構の逆力学問題がすべての関節が能動関節である場合や、能動関節で切断して仮想トリー構造をつくる場合にも解くことができるようになる。

この計算を定式化すると以下ようになる。まず、もとの冗長駆動系の関節 q を以下のように分解する。

Fig. 2 Non-redundant actuator system

Fig. 3 Virtual tree-structure mechanism

$$q = [q_a^T \ q_p^T]^T \quad (1)$$

ただし、 $q_a \in R^{N_a}$ は能動関節、 $q_p \in R^{N_p}$ は受動関節に対応する。するとステップ1における操作は、

$$q_a = [q_{ae}^T \ q_{ar}^T]^T \quad (2)$$

$$\tau_a = [\tau_{ae}^T \ \tau_{ar}^T]^T \quad (3)$$

と表せる。ただし、 $q_{ae}, \tau_{ae} \in R^{N_{ae}}$ は非冗長駆動系にしたときの能動関節に、 $q_{ar}, \tau_{ar} \in R^{N_{ar}}$ は冗長な能動関節に対応し、 $N_a = N_{ae} + N_{ar}$ である。 q_{ar} は q_{ae} の位置により拘束をうけて、一般的に次の関係をもつ。

$$F_r(q_{ar}, q_{ae}) = 0 \quad (4)$$

ただし F_r は N_{ar} 次元ベクトル値関数である。このとき冗長な能動関節の微小変位について次式が成り立つ。

$$\frac{\partial F_r}{\partial q_{ar}^T} \delta q_{ar} + \frac{\partial F_r}{\partial q_{ae}^T} \delta q_{ae} = 0 \quad (5)$$

上式で、 $\frac{\partial F_r}{\partial q_{ar}^T} \in R^{N_{ar} \times N_{ar}}$ が正則でないときは、 q_{ae} の位置により q_{ar} の位置が定まらず、非冗長駆動系の関節トルクを求めることができない。そこで、ここでは $\frac{\partial F_r}{\partial q_{ar}^T}$ の正則性を仮定する。

つぎにステップ2の(a)において仮想トリー構造の関節角 q_i と関節トルク τ_i を以下のように表す。

$$q_i = [q_{ae}^T \ q_{ip}^T]^T \quad (6)$$

$$\tau_i = [\tau_{ae}^T \ \tau_{ip}^T]^T \quad (7)$$

ただし、 $q_{ip}, \tau_{ip} \in R^{N_{ip}}$ は q_p と q_{ar} から切断関節を除いた関節に対応する。(b)においては開ループリンク機構に対する関節トルクをニュートン・オイラー法や

ラグランジュ法などの方法によって τ_t が計算される。
ついで (c) では、非冗長駆動系の関節トルク τ_{ae} が以下の式で計算される³⁾。

$$\tau_{ae} = W_p^T \tau_t \quad (8)$$

ただし $W_p = [E \ J_p^T]^T$, $J_p = \frac{\partial q_i p}{\partial q_{ae}^T}$ である。

最後にステップ3で用いる計算法を述べる。(8)式より

$$\delta q_{ar} = - \left(\frac{\partial F_r}{\partial q_{ar}^T} \right)^{-1} \left(\frac{\partial F_r}{\partial q_{ae}^T} \right) \delta q_{ae} = \frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T} \delta q_{ae} \quad (9)$$

であるから冗長駆動系の微小変位は

$$\begin{aligned} \delta q_a &= W_r \delta q_{ae} \\ W_r &= [E \ J_r^T]^T \end{aligned} \quad (10)$$

で表される。 $E \in R^{N_{ae} \times N_{ae}}$ は単位行列, $J_r = \frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T}$ は能動関節に関する冗長な能動関節のヤコビ行列である。与えられた運動に必要な冗長駆動系の関節トルク τ_a は同じ運動を行う非冗長駆動系の関節トルク τ_{ae} から以下のように計算される (証明は付録参照)。

$$W_r^T \tau_a = \tau_{ae} \quad (11)$$

(11) 式より

$$\tau_a = W_r^T \tau_{ae} + (E - W_r W_r^+) k \quad (12)$$

$k \in R^{N_{ae} + N_{ar}}$ は冗長性を表すパラメータであり、

$$W_r^+ = W_r (W_r^T W_r)^{-1} \quad (13)$$

は W_r^T の疑似逆行列である。 W_r のランクは N_{ae} であるから k の係数行列 $E - W_r W_r^+$ のランクは N_{ar} である。いま $V \in R^{(N_{ae} + N_{ar}) \times N_{ar}}$ を W_r^T の零空間の線形独立なベクトルから作られた行列とすると、(12) 式は

$$\tau_a = W_r^T \tau_{ae} + V \alpha \quad (14)$$

となる。ただし $\alpha \in R^{N_{ar}}$ は冗長性を表す任意のパラメータである。したがって、3段階目の計算には (14) 式を用いればよいことになる。

3. 順 動 力 学

仮想トリー構造の運動方程式を一般的に次式のように書く。

$$M_t \ddot{q}_t + h_t = \tau_t \quad (15)$$

ただし、 $M_t \in R^{(N_{ae} + N_p) \times (N_{ae} + N_p)}$ は慣性行列, $h_t \in R^{N_{ae} + N_p}$ は遠心力, コリオリ力, および重力負荷を表す項である。

いま、冗長駆動系に関節トルク τ_a を加えたときの運動は、同じ運動をおこなう非冗長駆動系の関節トルク τ_{ae} と (11) 式で結ばれ、この非冗長駆動系の関節トルク τ_{ae} は、同じ運動をおこなう仮想トリー構造の関節トルク τ_t と (8) 式で結ばれる。これらの式に (15) 式を代入して次式を得る。

$$W_p^T (M_t \ddot{q}_t + h_t) = W_r^T \tau_a \quad (16)$$

いま、次式が成り立つ。

$$\ddot{q}_t = \dot{W}_p \dot{q}_{ae} \quad (17)$$

この式をもう一度時間微分して、次式を得る。

$$\ddot{q}_t = W_p \ddot{q}_{ae} + \dot{W}_p \dot{q}_{ae} \quad (18)$$

これを (16) 式に代入すると、

$$W_p^T (M_t W_p \ddot{q}_{ae} + M_t \dot{W}_p \dot{q}_{ae} + h_t) = W_r^T \tau_a \quad (19)$$

となる。 $W_p^T M_t W_p \in R^{N_{ae} \times N_{ae}}$ が閉リンク機構の慣性行列で、これを M_c とし、この逆行列を両辺にかけて、次の順動力学の方程式を得る。

$$\ddot{q}_{ae} = M_c^{-1} (W_r^T \tau_a - W_p^T M_t \dot{W}_p \dot{q}_{ae} - W_p^T h_t) \quad (20)$$

さらに (9) 式より、

$$\ddot{q}_{ar} = J_r \ddot{q}_{ae} + \dot{J}_r \dot{q}_{ae} \quad (21)$$

を得る。

4. 数 値 例

駆動冗長性を有する閉リンク機構の1つに2本のロボットアームによる協調作業が挙げられる。各アームのモデルは Fig. 4 のように平面3自由度とした。各アームは対象物を強固に把持しているものとする、この系は能動関節のみからなる冗長駆動系閉リンク機構とみなすことができ前に述べた逆動力学計算法を用いて与えられた目標軌道に対する関節トルクを求めることができる。

図に示すように第1アームの関節 i の関節角を α_i 、第2アームの関節 i の関節角を β_i とし、また Fig. 5 のように、リンク i の長さを l_i 、各アームの関節1間の距離を l_0 とし、このリンクの動力学パラメータを Table 1 のように与えた。このとき、第2アームの関節3で切断し、仮想トリー構造として逆動力学計算をおこなう手順を以下に述べる。

$$q = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3]^T \quad (22)$$

の中から q_{ae} を以下のように選ぶ。

$$q_{ae} = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]^T \quad (23)$$

関節間関係式 (4) は以下ようになる。

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 2\pi \quad (24)$$

$$l_0 + l_1 C_{\alpha_1} + l_2 C_{\alpha_{12}} + l_3 C_{\alpha_{123}} + l_1 C_{\beta_1} + l_2 C_{\beta_{12}} = 0 \quad (25)$$

$$l_1 S_{\alpha_1} + l_2 S_{\alpha_{12}} + l_3 S_{\alpha_{123}} - l_1 S_{\beta_1} - l_2 S_{\beta_{12}} = 0 \quad (26)$$

Table 1 Parameters of numerical example

Link	Length [m]	Length to center of gravity [m]	Mass [kg]	Inertia of moment [kg m ²]
1	0.25	0.18	20.0	0.45
2	0.30	0.15	30.0	0.80
3	0.30	0.15	15.0	0.30
Length between two arms [m]				0.40

Fig. 4 Cooperative manipulation by two robot arms

ただし, $C_{at} = \cos \alpha_t$, $S_{at} = \sin \alpha_t$, $C_{atj} = \cos(\alpha_t + \alpha_j)$, $S_{atj} = \sin(\alpha_t + \alpha_j)$ である。

(24)~(26) 式のうち切断関節の関節変数 β_3 が現れない (25), (26) 式を用いて, β_1 と β_2 を α_1, α_2 , および α_3 から定めることができ, この 2 式から W_p は以下のように計算できる。

$$W_p = [E J_p^T]^T \quad (27)$$

$$J_p = - \begin{bmatrix} l_1 S_{\beta_1} + l_2 S_{\beta_{12}} & l_2 S_{\beta_{12}} \\ -l_1 C_{\beta_1} - l_2 C_{\beta_{12}} & -l_2 C_{\beta_{12}} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} l_1 S_{\alpha_1} + l_2 S_{\alpha_{12}} + l_3 S_{\alpha_{123}} & l_2 S_{\alpha_{12}} + l_3 S_{\alpha_{123}} & l_3 S_{\alpha_{123}} \\ l_1 C_{\alpha_1} + l_2 C_{\alpha_{12}} + l_3 C_{\alpha_{123}} & l_2 C_{\alpha_{12}} + l_3 C_{\alpha_{123}} & l_3 C_{\alpha_{123}} \end{bmatrix}$$

(24), (25), (26) 式から W_r は以下のように計算できる。

$$W_r = [E J_r^T]^T \quad (28)$$

$$J_r = - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ l_1 S_{\beta_1} + l_2 S_{\beta_{12}} & l_2 S_{\beta_{12}} & 0 \\ -l_1 C_{\beta_1} - l_2 C_{\beta_{12}} & -l_2 C_{\beta_{12}} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ l_1 S_{\alpha_1} + l_2 S_{\alpha_{12}} + l_3 S_{\alpha_{123}} & l_2 S_{\alpha_{12}} + l_3 S_{\alpha_{123}} & l_3 S_{\alpha_{123}} \\ l_1 C_{\alpha_1} + l_2 C_{\alpha_{12}} + l_3 C_{\alpha_{123}} & l_2 C_{\alpha_{12}} + l_3 C_{\alpha_{123}} & l_3 C_{\alpha_{123}} \end{bmatrix}$$

対象物の中心点の位置の軌道は x, y, θ の初期値を 0 [m], 0.3 [m], 0 度, 終端値を 0.1 [m], 0.35 [m], -15 度として時間に関する 5 次の多項式で与え, 逆動力計算をおこなった。なお, 駆動に関する冗長性を各関節のトルクのノルムが最小となるように利用した。このとき, アーム 2 の関節をすべて受動関節とみなした非冗長駆動系と, もとの冗長駆動系の関節トルクのノルムの比較を Fig. 6 に示す。この図から冗長駆動系が効率よく出力を小さくする可能性をもつことがわかる。この冗長駆動系は各関節すべてにアクチュエータを配置した場合であるから同じ構造のうちでもっとも効率よく出力を小さくした場合に相当する。

なお, (23) は片方のアームがすべて受動関節という特殊な場合に対応し, そのために冗長駆動系の場合との差が大きく出た。しかしたとえば (23) の代わりに

Fig. 5 Model of cooperative manipulation

Fig. 6 Comparison of $\|\tau\|$

$$q_{ae} = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1]^T \quad (29)$$

ととれば, 関節トルクのノルムは Fig. 6 の一点鎖線と与えられ冗長駆動系の場合との差は小さく, 非冗長駆動系でもアクチュエータの配置によって, 出力を小さくすることが可能となる。厳密にはアクチュエータの質量を考慮して動力学パラメータを変える必要があるが, 上の結果はアクチュエータ取り付け時に参考になるものと思われる。

5. おわりに

本論文では, 駆動冗長性をもつ閉リンク機構に対して従来提案されていた手法に比べて適用範囲の広い動力学計算法を提案した。本方法における冗長駆動系の逆動力学計算には拘束の表現に能動関節に関する冗長な能動関節のヤコビ行列を用いた。この表現は機構形状により, 直ちに計算できる。また, 受動関節の存在などによらない計算法である。

冗長駆動系は従来, 多指ハンドや複腕協調作業にみられ, 冗長な力成分を内力として与えることで動力学計算をおこなっていた¹⁾。しかし, 破損の恐れのない物体を扱うなどの理由で, 内力を陽に考慮する必要がない場合

には、ラグランジュの未定定数の導入などの内力に対する特別な配慮が不要であるため、本論文で提案した計算アルゴリズムが簡潔であり、有用であるといえる。ただし、内力を陽に考慮する必要がある場合については、従来の方法と提案する方法をさらに詳しく検討する必要がある。

なお本論文は著者らの講演⁴⁾をもとにまとめたものであるが、本論文投稿と同時期に、著者らの手法と類似の手法が中村⁵⁾によって発表されたことを付記しておく。文献⁵⁾における、閉リンク機構の運動を記述する一般化座標の、具体的に簡明な一つの選択法を与えているのが本論文の手法であると位置づけることができよう。

A. 付 録

非冗長駆動系の閉リンク機構とそれに対応する冗長駆動系の閉リンク機構のラグランジュ関数を L_{ae} , L_{ar} とする。すなわち、

$$L_{ae} = L_{ae}(q_{ae}, \dot{q}_{ae}) \quad (30)$$

$$L_{ar} = L_{ar}(q_{ae}, q_{ar}, \dot{q}_{ae}, \dot{q}_{ar}) \quad (31)$$

冗長駆動系のラグランジュ方程式は次式のようになる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ar}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \right) - \frac{\partial L_{ar}}{\partial q_{ar}^T} = \tau_a^T \quad (32)$$

ダランベールの原理より、仮想変位 $\delta q_a = W_r \delta q_{ae}$ に対して次式が成立する。

$$\left\{ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ar}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \right) - \frac{\partial L_{ar}}{\partial q_{ar}^T} \right\} W_r \delta q_{ae} - \tau_a^T W_r \delta q_{ae} = 0 \quad (33)$$

q_{ae} と $\dot{q}_{ae}$ の独立性より $\frac{\partial q_{ae}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} = 0$, $\frac{\partial \dot{q}_{ae}}{\partial q_{ae}^T} = 0$ および

(10) 式より $\frac{\partial q_{ar}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} = 0$ さらに $\frac{\partial \dot{q}_{ar}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} = \frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T}$ の関係を用いて

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ar}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ar}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T} \right) \quad (34)$$

$$\frac{\partial L_{ae}}{\partial q_{ae}^T} = \frac{\partial L_{ar}}{\partial q_{ae}^T} + \frac{\partial L_{ar}}{\partial q_{ar}^T} \frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T} + \frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \frac{\partial \dot{q}_{ar}}{\partial q_{ae}^T} \quad (35)$$

また $\frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial q_{ar}}{\partial q_{ae}^T} \right) = \frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ar}^T} \frac{\partial \dot{q}_{ar}}{\partial q_{ae}^T}$ を考慮し、(33) 式に代入すると

$$\left\{ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} \right) - \frac{\partial L_{ae}}{\partial q_{ae}^T} \right\} \delta q_{ae} - \tau_a^T W_r \delta q_{ae} = 0 \quad (36)$$

となる。(36) 式は任意の δq_{ae} に対して成立するから

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} \right) - \frac{\partial L_{ae}}{\partial q_{ae}^T} = \tau_a^T W_r \quad (37)$$

一方、非冗長駆動系のラグランジュ方程式は次式のように求められる。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ae}}{\partial \dot{q}_{ae}^T} \right) - \frac{\partial L_{ae}}{\partial q_{ae}^T} = \tau_{ae}^T \quad (38)$$

(37), (38) 式を比較して、次式を得る。

$$W_r^T \tau_a = \tau_{ae} \quad (39)$$

参 考 文 献

- 1) J. Y. S. Luh and Y. F. Zheng: "Computation of Input Generalized Forces for Robots with Closed Kinematic Chain Mechanisms", IEEE Journal of Robotics and Automation, 2-7: pp. 95-103, 1985.
- 2) T. Ropponen and Y. Nakamura: "Singularity-Free Parameterization and Performance Analysis of Actuation Redundancy", Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation: pp. 806-811, 1990.
- 3) Y. Nakamura and M. Ghodussi: "Dynamics Computation of Closed-Link Robot Mechanisms with Nonredundant and Redundant Actuators", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 5-3: pp. 294-302, 1989.
- 4) 吉川, 横小路, 渡辺. "駆動冗長性をもつ閉リンク機構の動力学解析." ロボティクス・メカトロニクス講演会 '92 講演論文集, pp. 105-108, 1992.
- 5) 中村. "パラレルメカニズムの動力学." 日本ロボット学会誌, 10-6: pp. 709-714, 1992.

吉川恒夫

(Tsuneo YOSHIKAWA)

1941 年 12 月 19 日生. 1969 年京都大学大学院博士課程修了. 同年, 同大学工学部助手, 1970 年同助教授, 1986 年同教授 (オートメーション研究施設, 1991 年より機械工学教室) となり現在に至る. ロボット工学, 制御工学の研究に従事. システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE などの会員. 工学博士.

(日本ロボット学会正会員)

横小路泰義

(Yasuyoshi YOKOKOHI)

1961 年 8 月 4 日生. 1988 年, 京都大学大学院博士課程中途退学. 同大学工学部オートメーション研究施設助手, 応用システム科学教室助手を経て, 1992 年機械工学教室助教授. ロボット工学の研究に従事.

システム制御情報学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE などの会員. 工学博士. (日本ロボット学会正会員)

渡辺直満

(Naomitsu WATANABE)

1970 年 3 月 24 日生. 1992 年京都大学工学部機械工学科卒業. 同年, 東京大学大学院工学研究科修士課程入学, 現在に至る. 閉リンク機構, マイクロマシンの研究に従事. (日本ロボット学会学生会員)