行政院國家科學委員會專題研究計畫　期中進度報告

網路控制系統研究(1/3)

計畫類別：個別型計畫
計畫編號：NSC94-2213-E-009-150-
執行期間：94 年 08 月 01 日至 95 年 07 月 31 日
執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：李祖添
共同主持人：吳政郎

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中　華　民　國 95 年 5 月 29 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 □ 成 果 報 告
■期中進度報告

計劃名稱：網路控制系統研究(1/3)

Study on Networked Control Systems (1/3)

計畫類別：▒個別型計畫　　□ 整合型計畫
計畫編號：NSC 94－2213－E－009－150－
執行期間：94 年 8 月 1 日 至　95 年 7 月 31 日

計畫主持人　：李祖添
共同主持人　：吳政郎
計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)：▒精簡報告　□完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：
□赴國外出差或研習心得報告一份
□赴大陸地區出差或研習心得報告一份
□出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
□國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
□涉及專利或其他智慧財產權，□一年□二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學　電機與控制工程學系

中　華　民　國　九十五　年　五　月 十四 日

計劃名稱：網路控制系統研究(1/3)

Study on Networked Control Systems (1/3)

計畫編號　：NSC 94-2213-E-009-150-

計畫主持人：李祖添

執行單位　：國立交通大學　電機與控制工程學系

摘要:

本計劃研究離散時間網路控制系統之相關問題。第一年目前完成了：一、網路排程對網路控制系統之穩定度的影響分析，二、”有需要才傳輸”之網路控制系統穩定度分析法則，三、model-based 網路控制系統穩定度分析法則。

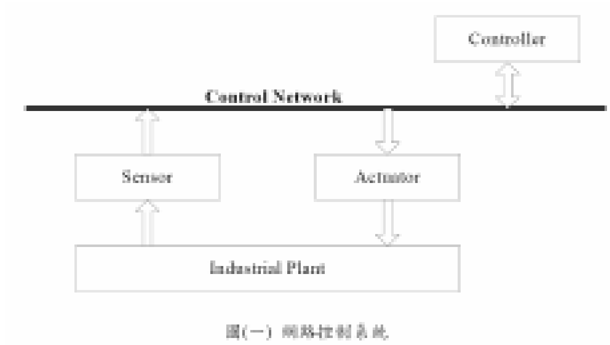
Abstract:

This project studies some problems about discrete-time networked control systems. Till now, we have finished: 1. the effect of scheduling on the stability of networked control systems, 2. the stability analysis of networked control systems based on the approach of “transmit if necessary”, 3. the stability analysis of model-based networked control systems.

I、簡介:

網路控制系統(Networked control systems，縮寫NCS，請參考[4]-[11]、[13]、[14]、[17]-[24]、[26]、[27])的研究動機起於一般船舶或飛機甚至汽車這樣的大系統，其 sensors 及 actuators 數量非常多且可能分散在相隔甚遠之不同位置，若一一佈線至主控制器(電腦)，則接線數目將非常多，施工困難且維護不易。網路控制系統的觀念在於把全部的 sensors 及 actuators 均透過單一的網路線連接至主控制電腦(參考圖(一))，感測的回授信號及控制器算出的控制信號之傳輸乃透過網路傳送，如此則接線將可大幅簡化且擴充更具彈性。大大的降低了成本、重量、及電力消耗，且架設及維護皆容易，具高可靠度[27]

。



圖(一)、網路控制系統架構

但網路控制系統因網路的特性，可能會有不均等週期取樣、不確定時間延遲、傳輸資料遺失、量化誤差等等的問題存在。這使得網路控制系統的穩定性分析及控制器設計問題變得非常困難。網路除了控制這部分功能外可能還需作其他的資料傳輸，我們通常希望所設計出來的控制器佔用的網路資源越少越好。若我們可將網路控制系統的資料傳輸量大量降低，則便可用同一部電腦控制數個不同的系統，實際應用時，可大大降低成本。

本計劃主要目的即是在研究如何設計網路控制系統的控制器使其有最低的網路資料傳輸量。我們的研究方向主要分為三個主題：第一個主題是研究網路排程對網路控制系統穩定度之影響及其相關控制器的設計。第二個主題以一種新的概念---有需要才傳輸---來設計網路控制系統以降低資料傳輸量。第三個主題，以model-based 的概念設計網路控制系統控制器以降低資料傳輸量。

本子計劃第一年執行至目前，主要成果如下：

1. 探討網路排程對離散時間網路控制系統穩定度的影響。找到一穩定條件可保證基於網路排程之網路控制系統的穩定度。
2. 引入”有需要才傳輸”之網路控制系統設計觀念，在盡

量降低網路資料傳輸量的要求下，找到兩個不同充份條件可保證網路控制系統的穩定度。

3. 推廣 Model-based 網路控制系統之設計，找到不同於文獻上可保證系統網路控制系統穩定的充份條件。

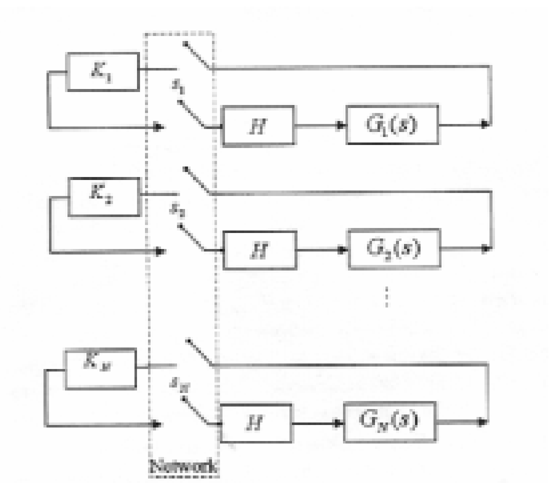
II、研究方法與成果：

2.1、網路排程對網路控制系統穩定度的影響

假設 sensors 端的信號取樣是週期性的(週期是 h)，因此將所考慮控制系統模式化為離散時間系統。考慮有數個控制系統共用一網路線傳輸感測信號及控制信號(參考圖(二))，每個子系統動態方程式如下：

$$G_i : x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k),\ i=1,\ldots,N \tag{1}$$

其中 $x_i(k) \in R^n$ 是第 i 個系統的狀態變數，$u_i(k) \in R^m$ 是第 i 個系統的控制輸入。假設每個子系統開回路時都是不穩定的。由於數個系統共用一網路，故每個系統只能佔用網路部份時間。這一部份的計劃是探討網路資源該如何分配以使每個系統都能穩定。



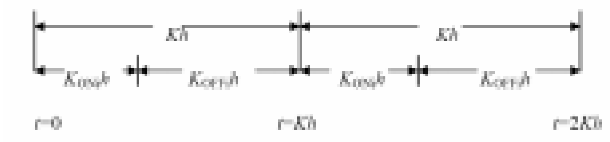
圖(二)

我們目前在穩定度分析方面已有一些成果。假設每個系統其控制器皆為靜態狀態回授：

$$K_i : u_i(k) = F_i x_i(k) \tag{2}$$

假設其回授增益 F_i 滿足 $\left|\lambda_j(A_i + B_i F_i)\right| < 1$，其中 $\lambda_j(A_i + B_i F_i)$ 指的是 $A_i + B_i F_i$ 的特徵值。也就是若網路是由第 i 個系統使用時，其閉回路系統是穩定的。在此我們假設所用的分享網路是理想的，也就是當它分配給第 i 個系統使用時，則第 i 個系統就跟一般直接連接的控制系統一樣，不考慮網路造成的影響(delay， packet dropping， quantization…等等)。而其它未被分配到的系統與控制器是完全沒有連接的，跟開路一樣。同一時間只能有一個系統透過網路連接到它對應的控制器。

我們將時間分成以 Kh 為週期的片段(K 為某正整數)，參考圖(三)。在每個週期 Kh 內，令 $K_{\mathrm{ON}i}h$ 是分配給第 i 個控制系統的時間，$K_{\mathrm{OFF}i}h = (K - K_{\mathrm{ON}i})h$ 是第 i 個控制器未連接到第 i 個受控系統的時間(在這段時間內，系統相當於是開路，沒控制)。在 $\left|\lambda_j(A_i + B_i F_i)\right| < 1$ 假設下，我們要找出可保證第 i 個控制系統穩定的最小的 $K_{\mathrm{ON}i}$。我們希望 K_{ONi}/K 的比值越小越好，因為如此表示此控制系統可以佔用較少網路資源即可保證系統穩定。



圖(三)

在這種情況下，第 i 個控制系統的動態行為可以下面動態方程式描述(目前假設是固定的 scheduling，且不失一般性的假設網路把每個週期 Kh 的最前面的時間 $K_{\mathrm{ON}i}h$ 給第 i 的系統使用)：

$$G_i : \begin{cases} x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i F_i x_i(k), & \text{if } qKh \le t < qKh + K_{ONi}h \\ x_i(k+1) = A_i x_i(k), & \text{if } qKh + K_{ONi}h \le t < (q+1)Kh \end{cases} \tag{3}$$

這樣的系統在特性上是個切換控制系統，其穩定度需由 Lyapunov Stability Theory 來證明。令 $A_{ci} = A_i + B_i F_i$。假設 $\lambda_{cim} \equiv \max_j \left|\lambda_j(A_{ci})\right| < 1$。令 μ_i 滿足 $\lambda_{cim} < \mu_i < 1$。令 $\hat{\lambda}_{ci} = \dfrac{\lambda_{cim}}{\mu_i}$。則可知 $\dfrac{A_{ci}}{\hat{\lambda}_{ci}}$ 也是穩定的。令 P_i 是下式之唯一正定解：

$$\frac{A_{ci}^T}{\hat{\lambda}_{ci}} P_i \frac{A_{ci}}{\hat{\lambda}_{ci}} - P_i + Q_i = 0,\ \ Q_i > 0 \tag{4}$$

下面定理是我們的第一個結果。

定理一：假如

$$K_{ONi} > \frac{\left|\ln\left(\dfrac{\rho_i}{\lambda_{\min}(P_i)}\right)\right|}{\left|\ln\left(\dfrac{\rho_i}{\lambda_{\min}(P_i)\cdot\hat{\lambda}_{ci}^2}\right)\right|} \cdot K \tag{5}$$

其中 $\rho_k = \max_j \left|\lambda_j(A_i^T P_i A_i)\right|$，則第 i 個系統

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_{ci} x_i(k)\,, & qK \le k \le qK + K_{ONi} \\ x_i(k+1) = A_i x_i(k)\,, & qK + K_{ONi} < t \le (q+1)K \end{cases}$$

是漸近穩定的。 ■

2.2、"有需要才傳輸"之網路控制系統

在這部份，我們以一新的觀念---"有需要才傳輸"---的想法來設計網路控制器。所考慮系統動態方程式如下：

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)\,, \qquad (6)$$

假設系統在開回路時是不穩定的。在 Sensors 端週期性的量測輸出信號，但很重要的是並不是每次的取樣信號都會透過網路傳送出去。Sensors 端所感測得到的信號只有在必要時才傳送出去，非必要時都不傳送，直接 drop out 以減少耗用網路資源。我們目前假設只有 sensors 的信號是靠網路傳送，控制器到 Driver 間信號傳送無時間延遲(不靠網路傳送，或是控制器收到 sensors 透過網路送來的感測信號算出控制信號後，馬上透過網路把資料傳到受控系統，沒有耽擱)。

我們目前探討靜態狀態回授控制器：

$$u(k) = Fx(k) \qquad (7)$$

假設其回授增益 F 滿足 $\left|\lambda_i(A+BF)\right| < 1$。在此我們假設所用的網路是理想的，不考慮網路造成的影響(delay， packet dropping， quantization…等等)。

感測器所感測的資料 $x(0)$, $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, ….，在我們這主題中並不是每次都會送到控制器，我們首先要探討的是如果每隔 q 次取樣我們才透過網路傳送一次量測到的狀態給控制器(即回授的信號是 $x(0)$, $x(q)$, $x(2q)$,…….)，則可以保證系統仍穩定的最大的 q 是多少?這種情況下，控制系統的動態行為可以下面方程式描述：

$$x(k+1) = Ax(k) + BFx(iq),\ \text{if } iq \le k < (i+1)q\,, \qquad (8)$$

我們知道 q 越大，則所需傳送的資料越少，所耗用的網路資源就越少。但 q 越大，越可能造成不穩定。

對這問題，我們得到以下結果：

定理二:考慮系統(8)。假設我們選擇 q 滿足

$$\left|\lambda_i\left(A^q + \sum_{j=1}^{q} A^{q-j} BF\right)\right| < 1\,,$$

則系統(8)是漸近穩定的。 ■

另外，我們考慮另一種情況。在此我們量測到的輸出信號並不要求要週期性的送給控制器，而是在必要時才傳送。我們以 Lyapunov 穩定定理推導出需要傳送新感測信號的條件。令 k_i 為第 i 次感測信號被傳送回控制器的時間。閉回路系統動態方程式如下：

$$x(k+1) = Ax(k) + BFx(k_i),\ \text{if } k_i \le k < k_{i+1}\,, \qquad (9)$$

我們可很容易推導出

$$x(k) = \left[A^{k-k_i} + \sum_{j=1}^{k-k_i} A^{k-k_i-j} BF\right] x(k_i)$$

定義

$$e(k) = x(k) - x(k_i)\,, \quad k_i \le k < k_{i+1}$$

因 $\left|\lambda_i(A+BF)\right| < 1$，故存在 $0 < \mu < 1$ 使得

下式

$$A^T PA - P < -\mu P$$

存在正定解 P。選擇 $V(x) = x^T Px$ 為系統的 Lyapunov function。若我們可保證

$$V(x(k+1)) - V(x(k)) < -\gamma(\|x(k)\|)$$

for some class K function $-\gamma(\cdot)$，則此網路回授系統是漸近穩定的。由此，我們可得到另一個結果：

定理三: 考慮系統(9)。如果在滿足以下條件下傳輸新的狀態：

$$\|e(k)\| \le \sqrt{\frac{\mu^3 \lambda_{\min}(P)}{(\mu+1)\lambda_{\max}(F^T B^T PBF)}}\,\|x(k)\|\,,$$

則閉回路網路控制系統(9)是漸近穩定的。

3.3、Model-based 網路控制系統

在這部份我們以一種新的理念來設計網路控制系統的控制器，使其在系統模式不確定下，仍可有效降低網路使用率。我們假設 sensors 端的信號取樣是週期性的，週期是 h，因此將所考慮控制系統模式化為離散時間系統。Model-based 的網路控制系統的穩定度分析方法說明如下：所考慮系統動態方程式如下：

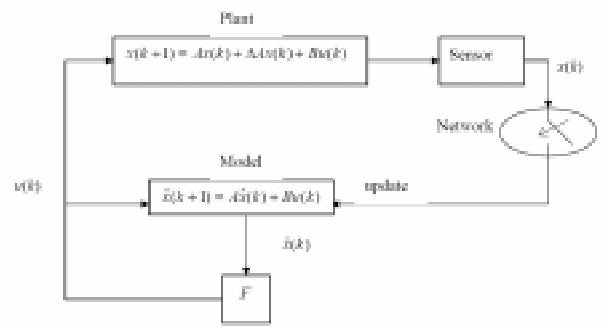
$$x(k+1) = Ax(k) + \Delta Ax(k) + Bu(k)\,, \qquad (10)$$

其中 $\|\Delta A\| \le \delta$ (或 $\Delta A = \sum \rho_i E_i$ for some known E_i and $|\rho_i| \le 1$)是不確定項。系統在開回路時是不穩定的。我們假設只有 sensors 的信號是靠網路傳送，控制器計算得到的控制信號是直接給 Driver 驅動受控系統。在此我們不考慮網路造成的 delay，quantization error 等影響。

在這種情況下，我們在控制器端複製一個受控系統的近似 model(如圖(四)所示):

$$\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k)$$

每次感測信號透過網路傳輸過來，就更新這數學 model 的狀態一次。在感測信號未透過網路傳輸過來時，即以這近似的數學 model 自動算出估計的狀態 $\hat{x}(k)$ 以得到 $u(k) = F\hat{x}(k)$ 去控制系統。假設對所有可能的 ΔA，F 滿足 $|\lambda_i(A+\Delta A+BF)|<1$。亦即我們若不透過網路傳輸感測資料而直接將控制器 $u(k) = Fx(k)$ 接在系統上，則閉回路系統是強健穩定的。



圖(四)　Model-Based 網路控制系統

感測器所感測的資料 $x(0)$, $x(1)$, $x(2)$, $x(3)$, ….，在我們這主題中並不是每次都會送到控制器。我們首先探討如果固定每隔 q 次取樣我們才透過網路傳送一次感測到的狀態給控制器(即回授的信號是 $x(0)$, $x(q)$, $x(2q)$,…….)，則可以保證系統穩定的最大的 q 是多少? 此時，整個系統的動態方程式可描述如下式：

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A+\Delta A+BF & -BF \\ A+BF & A-BF \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x(k) \\ e(k) \end{bmatrix},\ iq \le k < (i+1)q$$

$$\begin{bmatrix} x(iq) \\ e(iq) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(iq) \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (11)$$

其中 $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ 是系統的真實狀態與系統 model 的狀態的差, iq 表示第 i 次狀態被傳送的時間。我們知道 q 越大，則所需傳送的資料越少，所耗用的網路資源就越少。但 q 越大，就越可能造成系統不穩定。

對這問題，我們得到以下結果：

定理四:考慮系統(11)。假設我們選擇 q 滿足下式：

$$\left|\lambda_i\left((A+\Delta A)^q + \sum_{j=1}^{q}(A+\Delta A)^{q-j} BFA_c^{j-1}\right)\right| < 1,$$

則網路控制系統(11)是漸近穩定的。 ■

我們所得到的這條件跟文獻上得到的不一樣，我們的條件更直接、更簡單。

III、結論:

計劃第一年至目前為止，我們已完成了網路排程網路控制系統的穩定性分析、”有必要才傳輸” 網路控制系統的穩定性分析、”Model-based” 網路控制系統的穩定性分析。推導出幾個穩定充份條件。這個年度接下來的工作將是研究相關控制器設計的問題。

參考文獻：

[1] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*, Philadelphia: SIAM,1994.

[2] M. S. Branicky, Hybrid Systems: Modeling, Analysis, and Control, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, June 1995.

[3] M. S. Branicky, “Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems,” *IEEE Trans. on Automatic Control,* 43(4): 475-482, Apri1 1998.

[4] G. C. Goodwin, H. Haimovich, D. E. Quevedo, and J. S. Welsh, “A moving horizon approach to networked control system design,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 49(9): 1427-1445, September 2004.

[5] G. Guo, S. Yu, and Z. Ma, “Some properties of networked reset control systems,” *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, 153(1): 14-20, January 2006.

[6] D. Hristu and K, Morgansen, “Limited communication control,” *Systems & Control Letters*, 37(4):193-205, 1999.

[7] D. Hristu, “Stabilization of LTl systems with communication constraints,” in *Proceedings of the American Control Conference*, pp.2342-2346, Chicago, June 2000.

[8] K. Li and J. Baillieul, “Robust quantization for digital finite communication bandwidth (DFCB) control,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 49(9): 1573-1584, September 2004.

[9] F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbllry, “Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet,” IEEE Control Systems Magazine, 21(1):66-83, February 2001.

[10] L. W. Liou and A. Ray, “A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part I - Formulation of control law," *Transactions of the ASME*, 113:604-611, December 1991.

[11] L. W. Liou and A. Ray, “A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part II - Numerical analysis and simulation," *Transactions of the ASME*, 113:612-619, December 1991.

[12] R. Luck and A. Ray, “An observer-based compensator for distributed delays, Automatica, 26:903-908, 1990.

[13] L. A. Montestruque and P. Antsaklis, “On the model-based control of networked systems,” *Automatica*, 39: 1837-1843, 2003.

[14] L. A. Montestruque and P. Antsaklis, “Stability of model-based networked control systems with time-varying transmission times,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 49(9): 1562-1572, September 2004.

[15] J. Nilsson, B. Bernhardsson, and B. Wittenmark, “Stochastic analysis of control of real-time systems with random time delays,” *Automatica*, vol. 34, no. 1, pp. 57-64, Jan. 1998.

[16] J. Nilsson, “Real-time control systems with delays,” PhD. dissertation, Dept. Automatic Control, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden, Jan. 1998.

[17] J. W. Overstreet and A. Tzes, “An internet-based real-time control engineering laboratory,” IEEE Spectrum, pp.19-34, 0ctober 1999.

[18] S. Tatikonda and S. Mitter, “Control under communication constraints,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 49(7): 1056-1068, July 2004.

[19] S. Tatikonda, A. Sahai, and S. Mitter, “Stochastic linear control over a communication channel,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 49(9): 1549-1561, September 2004.

[20] G.. C. Walsh and H. Ye, ”Scheduling of networked control systems,” *IEEE Control System Magazine*, pp. 57-65, February 2001.

[21] G. C. Walsh, H. Ye and L. Bushnell, ”Stability analysis of networked control systems,” *IEEE Trans. Control System Technology*, vol.10, pp. 438-446, May 2002.

[22] G. C. Walsh, O. Beldiman, and L. Bushnell, “Asymptotic behavior of networked control systems,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1448-1453, Kohala Coast-Island of Hawaii, August 1999.

[23] W. S. Wong and R. W. Brockett, “Systems with finite communication bandwidth constraints - Part I: State estimation problems,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 42(9): 1294-1299, 1997.

[24] W. S. Wong and R. W. Brockett, “Systems with finite communication bandwidth constraints - Part II: Stabilization with limited information feedback,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 44(5):1049-1053, May 1999.

[25] J. Zhang, C. R. Knopse, and P. Tsiotras, “Stability of time-delay systems: Equivalence between Lyapunov and scaled small-gain conditions,” *IEEE Trans. on Automatic Control*, 46(3): 482-486, March 2001.

[26] W. Zhang, M. S. Branicky, and S. M. Phillips, “Stability of networked control systems,” *IEEE Control Systems Magazine*, 21(1): 84-99, February 2001.

[27] W. Lawrenz, *CAN System Engineering - From Theory to Practical Applications*, Springer, New York, 1997.