

# FPGA を用いた論理回路設計実験を 遠隔化した結果に関する報告

赤池 英夫<sup>1,a)</sup> 島崎 俊介<sup>1,b)</sup> 成見 哲<sup>1,c)</sup>

**概要：**本研究では、本学学内における対面での利用のみを想定して作成されていた実験システムを、やむを得ない理由で遠隔対応させ使用した結果、教育にどのような影響を及ぼしたかを調査した。対象となる実験システムは、本学3年生の実験科目の中のFPGAを用いて初歩的な論理回路を設計する課題で用いられている。設計した回路の動作確認に実機の物理的な操作をとまなうため、例年、機器の設置された計算機室に一堂に介して課題に取り組んできたが、2020年度は新型コロナウイルス感染症対策として入構禁止措置がとられたため、学外から機器を操作する仕組みを導入し実験を遂行することとなった。とくに致命的なトラブルもなく実験を行なうことはできたが成績の低下がみられた。遠隔対応とすることで学生の好きなタイミングで課題に取り組めたことが見出されたものの、対面であれば容易に行なえる学生の理解度チェックがオンラインでは難しいこともわかり、ひいてはそれが成績低下の一因であることが示唆された。また、機器操作の回数と成績の間に正の相関関係があることもわかった。

**キーワード：**FPGA, グラフィカルユーザインタフェース, 遠隔学習, ハードウェア実験, 遠隔作業

## A Report on the Results of Making a Logic Circuit Design Assignment using an FPGA Remotely Accessible

### 1. はじめに

著者らの所属する電気通信大学の学部3年生を対象として前学期に開講される「情報数理工学実験第一」および「コンピュータサイエンス実験第一」（これらをあわせてMICS実験第一と呼称）は、ハードウェア、ソフトウェア、数値計算、シミュレーションに関する8つの課題から構成されている。例年、受講者は再履修者も含め、毎年120~140名ほどであり、ほぼすべての課題が3日間、1日2コマ（=180分）をかけて行なわれる。いずれの課題も200台ほどの端末計算機（以下、端末）が設置された学科専用の計算機室にて対面で行なわれてきた。しかしながら、2020年度は新型コロナウイルス感染症対策として、大学では4月初旬から入構制限がとられたため、本実験のみならず、ほとんどの講義や実験・演習が遠隔での実施となり、学生は

自宅などから大学のリソースにアクセスし、ときに遠隔会議システムを併用するなどして課題に取り組むこととなった。MICS実験第一のうち、指定された問題を解くプログラミング課題であれば、教員と対話することもなく問題の入手と解答の提出でも済ませることができるが、著者らが担当する課題（以下、本課題）だけは、後述するFPGAロジックトレナー上のスイッチ押下やオシロスコープの調整のために、各種機材のその場での物理的操作が必須であるため、既存の仕組みだけではオンライン化することはできなかった。そこで、現有機器を活かしつつ、学生が学外からインターネット経由で機器を操作することで実験が行なえるようなシステムを作成した [1]。

本稿では、2020年度の遠隔実験を実践した結果得られた知見について報告する。

### 2. 本課題について

以下に示す機材数の関係から、本課題の受講者は3組に分けられ、それぞれの日程で実験を行なう。

本課題では、本学で開発された「FPGAロジックトレナー

<sup>1</sup> 電気通信大学  
The University of Electro-Communications

a) xakaike@cs.uec.ac.jp

b) shimazaki@uec.ac.jp

c) narumi@uec.ac.jp

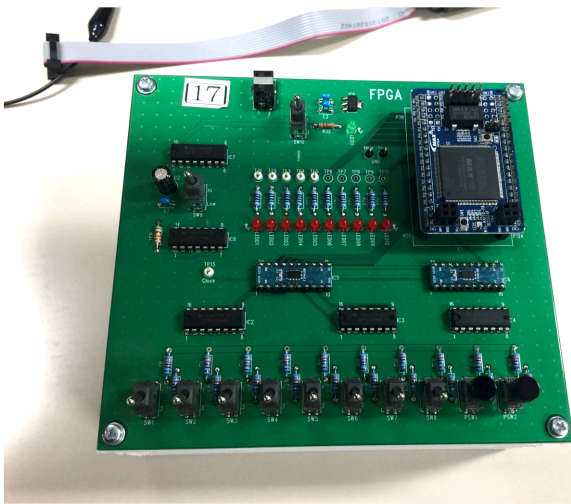


図 1 FPGA ロジックトレーナ

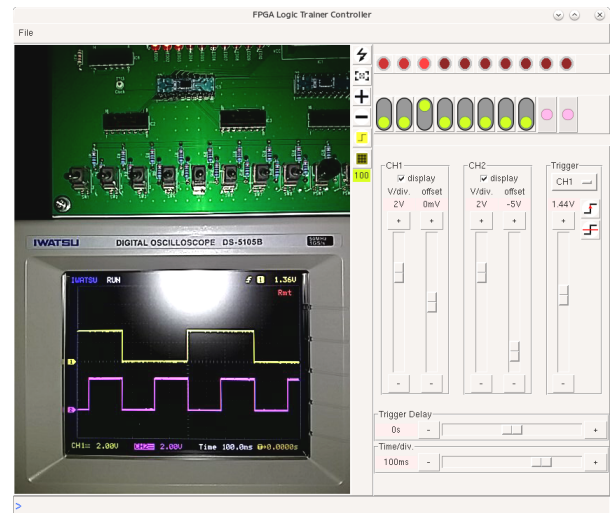


図 2 リモートコントロールアプリケーション

表 1 本課題の内容

| 問題番号 | 内容                         |
|------|----------------------------|
| 1    | スイッチと LED を接続し動作を確認        |
| 2    | 2 ビットの 2 入力に対して比較を行なう回路を作成 |
| 3    | 微分回路の状態遷移の図示とカウンタとの組み合わせ   |
| 4    | 素朴な自動販売機の作成                |
| 5    | オシロスコープを用いた比較回路の動作確認       |
| 6(a) | 与えられた回路の動作理解とオシロスコープによる検証  |
| 6(b) | 6(a) の回路の改変                |

ナ」(以下、単にトレーナ)を用いている。トレーナは FPGA, 入力元としての 8 つのトグルスイッチと 2 つのプッシュスイッチ, 出力先としての 10 個の LED, FPGA へ与えるクロック周波数を切替える回路などからなる(図 1)。

本課題に対し学生は以下のステップで問題を解いていく。

- (1) 課題に示された問題を解く際に必要な定義を行ない,
- (2) 課題に示された問題を解く回路を Quartus と呼ばれる開発環境が提供する回路図エディタで描き,
- (3) 回路図を接続情報にコンパイル,
- (4) FPGA にダウンロードし,
- (5) 回路が正しく設計できているかをスイッチ, LED, オシロスコープなどを用いて確認する。

上記(3)でのコンパイルにパスしなかったり,(5)で所望の動作が得られない場合は,(1)や(2)に戻り再考することとなる。

課題の具体的な内容は表 1 のようである。

### 3. 遠隔実験システム

計算機室の端末では Linux が OS として用いられており,そこで動作する X-Window システムにアクセスできれば,学外からでも回路設計の作業(前節のステップ(4))までは行なえる。しかしながら,トレーナの物理操作は不可能であり,設計した回路の動作確認はできない。そのた

め,次の対策を講じた。

- (1) 回路を追加し,端末からトレーナのスイッチを操作できるようにする。
- (2) 端末からオシロスコープを制御できるようにする。
- (3) LED の状態をモニタできるようにする。
- (4) 機材を操作している実感を提供するために,実際の見た目を示す。
- (5) 設計した回路の動作確認を GUI で行なえるようにする。
- (6) 後の解析のために,学生の許可を得たうえで,GUI の操作を記録する。

上記(1)~(3)は端末に接続したマイコンボード(Arduino)経由で行ない,(4)には外付け Android タブレットのカメラとその制御アプリ(DroidCam[2])を利用した。また,(5)のためにリモートコントロールアプリケーション(図 2)を作成した。図の左半分はカメラからの画像であり実物の見た目を提供しており,右半分は上部がトレーナの LED とスイッチの状態を,下部がオシロスコープの設定状況を反映している。煩雑になることを避けるため,操作可能なオシロスコープの機能に関しては本課題を解答する上で必要なものにとどめた。

利用者(学生)を含むシステムの概要を図 3 に示す。図中の“CED”とは計算機室の略称である。なお,旧来の対面利用時は,端末にトレーナのみが接続され,オシロスコープはどこにも結線されず独立していた。

### 4. 結果と考察

提出されたレポートの採点,作業時の記録(作業ログ)などの結果および考察について述べる。

#### 4.1 前年からの成績の変化

本課題を欠席したりレポート未提出の学生を除くと,2019 年度は受講者数 108 名,平均点 79.5 (100 点満点),

2020年度のチェック数減少の理由には以下が考えられる。

- オンライン実施のための事前作業に対し、少数とは言えない学生が準備不足であり、実験初日の大半の時間をその対応に費やさざるをえなかった。
- チェックは学生と教員サイドの人間が Zoom のブレイクアウトルームに移動して行なったが、その移動にかかる時間や、学生が手書きした図表を示すために手間取った。
- トレーナはペアの2人に1台用意され、排他的に使用された。チェックを受けたい学生は、ペアにトレーナを使ってよいか確認する必要があるが、そのやりとり時間に時間を要した。

また、旧来の対面でのチェックにおける、さりげない一瞬のやり取りが学生に気付きを与え、理解を促進してきたのではないと思われる。同様の質的な効果はオンラインであっても発現しうると考えられるが、オンライン化によって生じた本質的ではない付加的な作業に思考の一部が専有され、阻害されているのではないかと考えられる。

#### 4.2 作業ログから得られた学生の行動

ログファイルの総数はリモートコントロールアプリを起動した回数に等しく、受講生により生成された総ファイル数は6,260、総サイズは660MBほどであった。1人の学生による最大ファイル数は175、平均46.7、標準偏差27.5であった。

##### 4.2.1 作業日

本課題では月曜日と水曜日に行なわれる3日間の実験日の2週間後がレポート提出締切日となっており、実験初日からレポート提出締切までは3週間ある。各組毎に、学生がリモートコントロールアプリを起動した回数を図4に示す。

実験日のログ数が多いことは当然であるが、どの組もレポート提出締切日の1週間ほど前から徐々に作業をしていることが見てとれる。オンライン化し、作業可能日時の制限を緩和したことにより、「いつでもできるのだから、後でやればいいや」といった発想につながったのだらうと推察できる。

##### 4.2.2 作業時刻

図5に学生のオンラインでの作業時刻の分布を示す。これは作業可能日（実験日および各組に対して割り当てられた専用の自習期間）に対して、 $n(0 \leq n \leq 23)$  時台に1度でも作業していた学生数に対応する（ただし1分未満の作業は除いている）。実験は13:00から16:10まで行なわれるので、この間の作業学生数が突出しているのは当然である。しかし、他の時間帯であっても、少なからぬ学生が作業していることが見てとれる。これは、学生のライフスタイルの違いが反映されていることにほかならない。

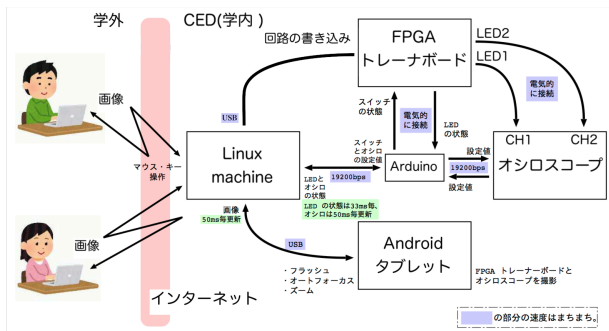


図3 システム概要

標準偏差 10.4, 2020年度は125名, 平均点 74.2, 標準偏差 14.9 となり, 平均で5点ほど低下するとともに点数分布が広がった。また, 合格ラインを60点とすると, 2019年度は96.3%, 2020年度は88.0%となった。広がった分布の下方の学生が合格ラインを割ってしまっている。

得点の低下に関して, 本課題の「チェック」数の減少が理由として考えられる。本課題では問題を解き進めるたびに教員やTAのチェックを受け, パスすれば次の問題に進み, そうでなければ不備を修正し再びチェックを受ける。実験時間内にしか行なわれないチェックを受けなくても, 最終的に正しい解答がレポートに記載されていれば採点され得点できる。しかし, チェックを受け, パスすることで, レポートにおける減点を減らすことができるため, チェック数は成績に連動し, その減少はスコアの減少につながると考えられる。たとえば「論理回路の簡略化においてカルノー図上のグループ化した部分の明示」は, チェックで指摘される項目のひとつである。しかし, それを行っていない学生が何人もおり減点されている。

第一著者担当組の直近5年分の担当人数と平均チェック数を表2に示す\*1。問題毎にチェックが入るので, その最大数は7である。2020年度の平均チェック数は, それ以前の年度に比べ明らかに少ない。

表2 直近5年間の人数と平均チェック数 (第一著者分)

| 年度   | 担当人数 | 平均チェック数 |
|------|------|---------|
| 2020 | 44   | 3.95    |
| 2019 | 26   | 6.54    |
| 2018 | 37   | 6.68    |
| 2017 | 35   | 5.26    |
| 2016 | 35   | 6.60    |

\*1 2019年は採点の1/3ほどを他者に依頼したため詳細が残っていない。

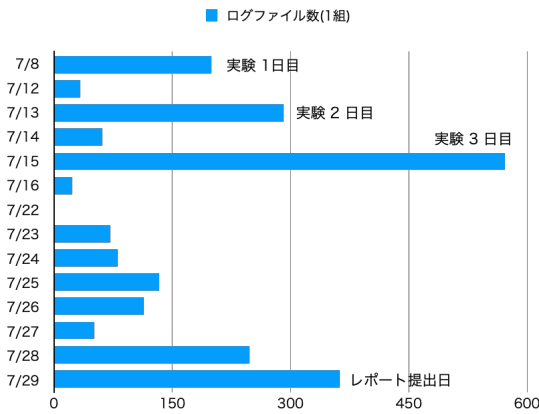


図 4 作業日の分布

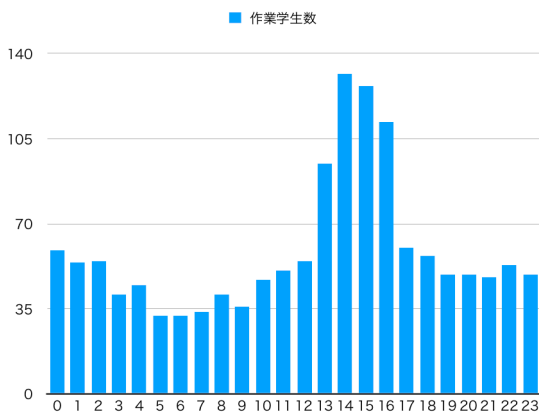


図 5 作業時刻の分布

#### 4.2.3 作業時間と成績

図 6 に、1 時間単位での総作業時間に対する学生数と平

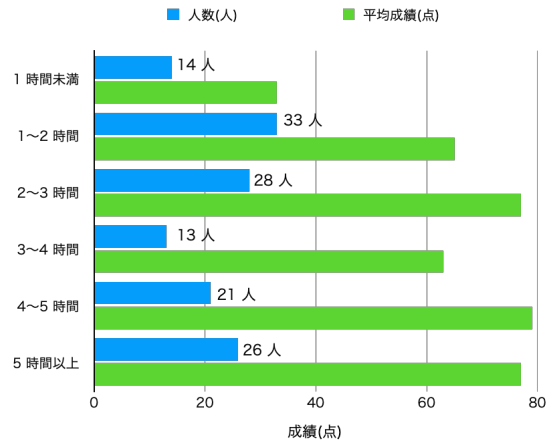


図 6 作業時間と成績

均得点の対応を示す。予想通りではあるが、総作業時間が 1 時間に満たない場合は点数が極めて低く、合格ライン (60 点) を越えていない。しかし、1 時間以上であれば、成績の顕著な差は見られず、合格圏内にはいる。短い時間でも集中的に作業する学生もいれば、あまり時間を気にせず結果として長い時間を費やしてしまった学生もいたのだと思われる。ただしこれはリモートコントロールアプリの操作時間に過ぎず、実験後のアンケート結果によれば、実験時間外に 77.2% の学生が 5 時間以上と回答しているので、いきなり回路図を描いたり動作確認をしたのではなく、事前の準備に十分時間をかけたと考えられる。

#### 4.2.4 機器の操作回数と成績

与えられた課題に対して、作成した回路の検証のために、学生はトレーナのスイッチ、オシロスコープ、タブレットのカメラを操作することになる。そこで、ログファイルからこれらの操作回数を抽出し、最終的な成績との関連を調べた。調査に先立ち、機器の操作回数が極端に多いものがあったため、四分位範囲による外れ値を除外した。なお、ログファイルに記録される項目のうち機器操作に関するものは、

- スイッチ操作:  $n(1 \leq n \leq 10)$  番目のスイッチのオン・オフ,
- オシロスコープの操作: チャンネル  $n(n = 1, 2)$  の表示・非表示, 垂直軸レンジの設定, オフセットレベルの設定, およびトリガチャンネルの設定, トリガレベルの設定, スロープの設定ならびに水平軸レンジの設定, オフセットの設定など,
- カメラ操作: オートフォーカス, 拡大・縮小, LED ライトのオン・オフ

である。また、全学生の行なったスイッチ操作回数は 175211, オシロスコープ操作回数は 95962, カメラ操作回数 3045 であった。スイッチはほとんどの問題で使用されるためその操作回数は最も多く、オシロスコープは問題 5 以降から使用されるためスイッチに次ぐ操作回数となって

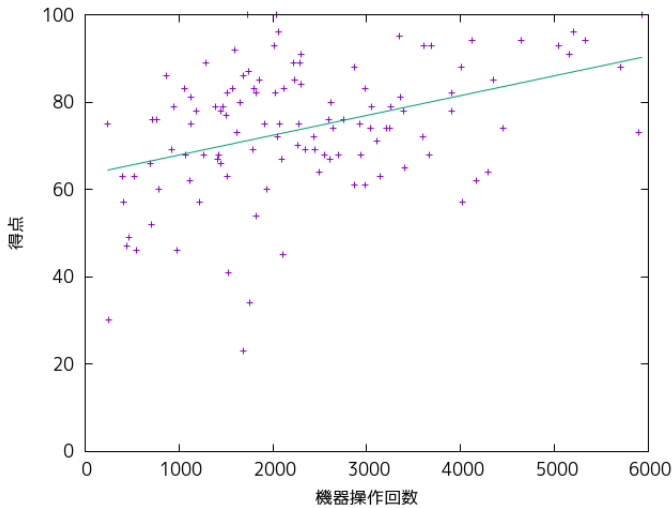


図 7 機器操作回数と成績

いる。また、カメラ操作については、多くが LED ライトに関するものであり、消灯されている計算機室での夜間の作業を反映している。全操作回数と成績との対応を近似直線とともに図 7 に示す。

相関係数を求めたところ 0.40 と、正の相関があることがわかった。自明ではあるが、本課題の問題を解くためには機器操作が必須であり、その回数が多いほど積極的に課題に取り組んでいることがうかがえる。ただし、著者の経験則であるものの、

- 実際の回路を組む前の準備をしっかりとおり操作数が少なくても正答にいたった少数の学生、
- 事前準備はそこそこでありトライアンドエラーの末に正答にいたった多くの学生

が混在していると思われる\*2。そこで、機器操作数のリアルタイムな観測により、取り組み方の異なる学生の分類を行なうことで適切なサポートが可能ではないかと考えている。

## 5. 関連研究

コロナ禍の下、対面式からオンラインに移行した、電子回路設計をとまなう課題を扱った事例として以下がある。山崎ら [3] は、Arduino に LED, 7 セグメント LED, タクトスイッチなどが搭載された自作シールドを組み合わせて、学部 3 年生を対象に組込みソフトウェアの実践的な設計と実装を行なうことを目的とした実験について紹介している。久門 [4] は、学部 2 年生を対象にそれまでに習得した知識をベースに各種の能動・受動素子を組み合わせ、課題を解くための電気電子回路を設計、作成する演習について紹介している。いずれも、学生に機材を郵送し、自宅で作業を行なうとのことであった。これらの取り組みに対

\*2 これは、プログラミング課題において、事前にじっくり考えてからコーディングするのか、とりあえずプログラミングを開始して何度もデバッグを繰り返すのと同様であろう。

して、本課題では、あくまで機材は大学にあり、それをネットワーク越しに操作するといった、ある種テレエグジステンシ的なアプローチを採用した。

アダプティブコンピューティング研究推進体 (Adaptive Computing Research Initiative, ACRI) [5][6] は、FPGA を活用する高性能なアダプティブコンピューティング・システムの開発およびその設計を効率化するための FPGA 活用基盤の開発を目指し、2020 年 4 月より活動を開始している。ACRI は、オンラインで FPGA の入門から本格的な活用が行なえる仕組みを ACRI ルームとして提供している。ACRI ルームは当初からオンラインでの利用が可能ないように設計されているが、本課題は元来が現地での作業しかできないものをオンライン化した点で異なっている。

また、Bonn-Rhein-Sieg 大学における FPGA VISION REMOTE LAB[7][8] では、学外からラボ内の FPGA を利用できるサービスを提供している。主に画像処理を対象とし、処理結果や消費電力などが確認できるようになっている。この取り組みも遠隔からの利用を念頭に設計されており、今回の我々の状況とは異なっている。

Means[9] らによる 1996 年から 2008 年に渡るオンライン学習の大規模な調査から、対面よりもオンラインでの学習の効果が高かったことが報告されている。たしかに分類としてはオンライン型ではあるが、本課題の特殊性が大きく影響したと考えられる。

## 6. おわりに

コロナ禍の影響により 2020 年度の本学での授業は遠隔での実施となったが、各種機材の操作が必要な本課題を遠隔対応とするために、既存の装置に電気的インタフェースを追加するとともにインターネットを介して学外から大学の計算機と機材を操作する GUI アプリケーションを用意した。実験当日は、問題の説明やチェックおよび質問への対応を Zoom を用いて行なった。初の試みであり、教員・学生ともに、これまでには必要のなかった作業や準備が必要となるも致命的なトラブルを起こすことなく本課題を終えることができた。とはいえ、例年のペースで進めることはできなかった。

2021 年度は学生に対面と遠隔の希望を事前アンケートで調査し、その結果、おおよそ半数ずつとなるハイブリッド形式で実施された。また、2020 年度の知見をもとに各種の改善\*3を施した。その結果、2020 年度に比べ、明らかにスムーズな進捗が達成できている。本稿締切時点で全組のレポートおよびアンケートの提出が済んでいないため、成績や学生からの意見などは不明であるが、今後、2020 年度と 2021 年度の成績の違いなどから、対面とオンラインによる違いとその要因などを調査する予定である。

\*3 とりわけ、課題開始前に一斉に遠隔作業のための準備をさせた影響が大きいと思われる。

## 参考文献

- [1] 赤池英夫, 島崎俊介, 成見哲, FPGA を用いた論理回路設計実験の遠隔実践, 情報処理学会研究報告コンピュータと教育 (CE), Vol.2020-CE-157, No.11, pp.1-7(2020).
- [2] Dev47Apps, <https://www.dev47apps.com>(2021.8.3 確認).
- [3] 山崎 進, 館 伸幸, 実験的オンライン実技実験講義～北九州市立大学国際環境工学部のチャレンジ, 【第 10 回】4 月からの大学等遠隔授業に関する取組状況共有サイバーシンポジウム (オンライン開催) (2020.6.5).
- [4] 久門 尚史, 自宅実験によるオンライン型回路演習, 【第 14 回】4 月からの大学等遠隔授業に関する取組状況共有サイバーシンポジウム (オンライン開催) (2020.8.21).
- [5] アダプティブコンピューティング研究推進体 (ACRi), <https://www.acri.c.titech.ac.jp/wp/>(2021.6.24 確認).
- [6] 吉瀬 謙二, アダプティブコンピューティングの研究を推進するための試み (招待講演), 信学技報, vol.120, no.36, RECONF2020-15, pp.83-83(2020).
- [7] Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, FPGA VISION REMOTE LAB, <https://www.h-brs.de/de/fpga-vision-lab/> (2021.6.24 確認).
- [8] Schwandt A., Winzker M., Rohde M., Utilizing User Activity and System Response for Learning Analytics in a Remote Lab. In: Auer M., May D. (eds) *Cross Reality and Data Science in Engineering. REV 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1231. Springer, Cham.*(2021).
- [9] Means, B., Toyama, Y., Murphy, R., Bakia, M., and Jones, K., Evaluation of Evidence-Based Practices in Online Learning: A Meta-Analysis and Review of Online Learning Studies, *U.S. Department of Education Office of Planning, Evaluation, and Policy Development Policy and Program Studies Service*(2010).