The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations ILS - Madison

Stefan Creemers Marc Lambrecht

Research Center for Operations Management

Katholieke Universiteit Leuven

May 29, 2008

(日) (四) (코) (코) (코) (코)

Presentation outline Problem description Problems in healthcare modeling Overview research

Presentation outline

- General introduction
- Service outages in healthcare
- Appointment-driven systems
- Conclusion and time for questions

・ 同 ト ・ ヨ ト ・ ヨ

Presentation outline **Problem description** Problems in healthcare modeling Overview research

Problem description

- Problem setting: healthcare and other services
- Measures of interest:
 - Patient waiting time
 - Staff overtime
- Methodology: queueing theory
 - Focus on manufacturing
 - Healthcare modeling requires distinct approach

- 4 同 1 4 日 1 4 日

Presentation outline Problem description **Problems in healthcare modeling** Overview research

Problems in healthcare modeling

- Queue discipline
- Time varying demand
- Waiting creates additional work
- Service outages (absences and interrupts)
- Reentry at previous workstations
- Probabilistic routing of patients
- Service sessions and appointment systems

- 4 周 ト 4 月 ト 4 月

Presentation outline Problem description **Problems in healthcare modeling** Overview research

Problems in healthcare modeling

- Queue discipline
- Time varying demand
- Waiting creates additional work
- Service outages (absences and interrupts)
- Reentry at previous workstations
- Probabilistic routing of patients
- Service sessions and appointment systems

- 4 同 1 4 日 1 4 日

Presentation outline Problem description **Problems in healthcare modeling** Overview research

Problems in healthcare modeling

- Queue discipline
- Time varying demand
- Waiting creates additional work
- Service outages (absences and interrupts)
- Reentry at previous workstations
- Probabilistic routing of patients
- Service sessions and appointment systems

- 4 周 ト 4 月 ト 4 月

Presentation outline Problem description Problems in healthcare modeling **Overview research**

Overview research

Modeling a healthcare system as a queueing network: The case of a Belgian hospital Creemers S. and Lambrecht M.R. (2007) FETEW Research Report KBI 0710

Presentation outline Problem description Problems in healthcare modeling **Overview research**

Overview research

Modeling a healthcare system as a queueing network: The case of a Belgian hospital Creemers S. and Lambrecht M.R. (2007) FETEW Research Report KBI 0710

Queueing models for appointment-driven systems Creemers S. and Lambrecht M.R. (2008) Accepted for publication in Annals of OR

・ ロ ト ・ 同 ト ・ 三 ト ・ 三 戸

Presentation outline Problem description Problems in healthcare modeling **Overview research**

Overview research

- Modeling a healthcare system as a queueing network: The case of a Belgian hospital Creemers S. and Lambrecht M.R. (2007) FETEW Research Report KBI 0710
- Queueing models for appointment-driven systems Creemers S. and Lambrecht M.R. (2008) Accepted for publication in Annals of OR
- Advanced queueing models for appointment-driven systems Creemers S. and Lambrecht M.R. (2008) Working paper

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Service Outages

Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Outline

- Problem setting: based on the orthopaedic department of the Middelheim hospital in Antwerp
- Objective: analysis of impact of service outages through capacity and variability analysis
- Methodology: queueing models of the orthopaedic department
- Contribution: development of new expressions to assess the impact of service outages

(日) (同) (三) (三)

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Capacity structure



イロト イポト イヨト イヨ

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Patient flow



Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Queueing network



Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Service outages

Different types of outages of the service process:

- Nonpreemptive outages (absences)
- Preemptive outages (interrupts)
- Service epochs (server unavailability)

We formulate queueing models taking these outages into account

イロト イポト イラト イラ

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Nonpreemptive outages

- Interruption of the service process prior to treatment of a patient
- Examples:
 - Absence of medical staff at the beginning of a working shift
 - Setup time of medical facilities (e.g. cleaning, preparation)
- Exact results have been obtained in Hopp and Spearman (2000) under the assumption of a fixed number of patients in between two subsequent outages

(日) (同) (三) (三)

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Nonpreemptive outages: example

Patient 1. Patient 2 Patient 3	Patient 4	Patient 5	Patient 6
--------------------------------	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Nonpreemptive outages: example

Patient 1 Patient 2 Patient 3	Patient 4	Patient 5	Patient 6
-------------------------------	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

- Interruption of the service process during service itself
- Examples:
 - Emergencies
 - Phone calls, administration, ...
- Exact results have been obtained in Hopp and Spearman (2000) under the assumption of:
 - Exponential time between interrupts
 - Interrupts only occur during the service process itself

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

• Example:

Patient 1 Patien	2 Patient 3	Patient 4	Patient 5	Patient 6
------------------	-------------	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

• Example:

Patient 1	Patient 2	Patient 3			Patient 4	Patient 5	Patient 6
-----------	-----------	-----------	--	--	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

• Example:

Patient 1 Patient 2 Patient 3			Patient 4		Patient 5	Patient 6
-------------------------------	--	--	-----------	--	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

• Example:

Patient 1	Patient 2	Patient 3			Patient 4		Patient 5	Patient 6
-----------	-----------	-----------	--	--	-----------	--	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages

• Example:

Patient 1 Patient 2 Patient 3			Patient 4		Patient 5	Patient 6
-------------------------------	--	--	-----------	--	-----------	-----------

• Exact formulation of mean and variance of service times including preemptive outages:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{MTTI}{MTTI + MTTR} \right)$$
$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \left(\frac{MTTI + MTTR}{MTTI} \right)^2 + \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\sigma_r^2 + MTTR^2}{MTTI} \right)$$

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages: generalization

- In healthcare, services may be interrupted during the resolving of a previous interrupt
- Examples:
 - A doctor receiving a phone call during an emergency
 - A doctor who is interrupted by a nurse during a phone call
- We generalize the result of Hopp and Spearman (2000) to include multiple order interrupts

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages: generalization

• Example:

Patient 1 Patient 2 Patient 3	Patient 4	Patient 5	Patient 6
-------------------------------	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Preemptive outages: generalization

• Example:

Patient 1	Patient 2	Patient 3			Patient 4	Patient 5	Patient 6
-----------	-----------	-----------	--	--	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Preemptive outages: generalization

• Example:

Patient 1	Patient 2	Patient 3					Patient 4	Patient 5	Patient 6
-----------	-----------	-----------	--	--	--	--	-----------	-----------	-----------

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Outline Nonpreemptive outages **Preemptive outages** Service epochs

Preemptive outages: generalization

• Example:

Patient 1 Patient 2 Patient 3		Patient 4	Patient 5	Patient 6
-------------------------------	--	-----------	-----------	-----------

• Exact formulation of mean and variance of service times including preemptive outages:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{MTTI}{MTTI - MTTR} \right)$$

$$\sigma^{2} = \frac{MTTI^{2}\sigma_{0}^{2} + \frac{1}{\mu_{0}} (MTTI - MTTR) (\sigma_{r}^{2} + MTTR^{2})}{(MTTI - MTTR)^{2}}$$

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Service epochs

- (Healthcare) services take place during predefined time intervals
- Problem: how to combine surgery, consultation and recovery into one model, while all operate on different time scales:
 - Consultation and surgery take place at weekdays during specific hours
 - Recovery is a continuous process
- Solution: rescaling of the service process using an availability concept

(日) (同) (三) (三)

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Friday from 2 PM until 6 PM
- Availability:

$$A = \frac{6}{168} = \frac{1}{28}$$

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Mean and variance of the rescaled service times:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{A\mu_0} \qquad \sigma^2 = \frac{\sigma_0^2}{A^2}$$

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour

(日) (同) (三) (三)

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



イロト イボト イヨト イヨト

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



イロト イボト イヨト イヨト

Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



イロト イボト イヨト イヨト
Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Outline Nonpreemptive outages Preemptive outages Service epochs

Availability

- Rescales the service process in order to fit a predefined uniform time scale (e.g. 24 hours per day, 7 days per week)
- Example: doctor's office with opening hours on Thursday from 6 PM until 8 PM and on Fridays from 2 PM until 6 PM
- Observe a single week, five arrivals with an average service time of 1 hour



Methodology Simulation Results

Methodology

In order to assess patient waiting times at the orthopaedic department, we used a variety of queueing models:

- Parametric decomposition approach
 - Kingman equation: closed form
 - Whitt's procedure: algorithm
- Brownian queueing model: heavy traffic setting
- Simulation was used as a validation tool

These models were used to test a variety of scenarios, assessing different levels of impact of service outages (absences and interrupts)

イロト イポト イラト イラト

Methodology Simulation Results

Simulation model

Quick facts:

- 60 modules, 18 classes of patients, different phases of treatment
- Single run simulation
- Number of patients observed each run: 285,000,000 at surgery, 1,150,000,000 at consultation
- Simulation runtime: 86,000 years
- Resulting statistical precision: standard error < 0.00001

< 日 > < 同 > < 三 > < 三 >

Methodology Simulation **Results**

Results

i	1	2	3	4	5
Analytical models					
$\frac{1}{\mu_i}$	0.01257	0.06329	0.79710	5.03237	8.09661
ρ _i	0.99543	0.97854	0.14776	0.75701	0.20396
$C_{s_i}^2$	0.65079	0.60612	14.0786	1.98721	23.4125
E [W _{Kingman}]	5.05894	3.95430	0.79710	5.24027	8.09687
E [W _{Whitt}]	5.05911	3.95298	0.79710	5.20325	8.09664
E [W _{Brownian}]	7.72261	5.41723	0.27924	1.19658	5.00118
i	1	2	3	4	5
Simulation					
$\frac{1}{\mu_i}$	0.01257	0.06329	0.79711	5.03233	8.10131
ρi	0.99541	0.97858	0.14775	0.75701	0.20414
$C_{s_i}^2$	0.65796	0.60589	14.0969	1.98918	23.9050
E [W _{Simulation}]	5.40098	3.46204	0.79711	5.11928	8.10131

Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

<ロト <回 > < 注 > < 注 > … 注

Appointment-Driven Systems

Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

Problem description

Example doctor's office:

- Service each Thursday evening (6PM until 8PM) and Friday afternoon (2PM until 6PM)
- Thursday up to 4 patients receive service, Friday up to 8
- Appointments (i.e. arrivals) may be made during arrival sessions



Problem description Methodology AMQ AS Results

Problem description

Performance measures:

- Patient waiting time:
 - At the waiting list
 - At the doctors office
- Staff performance:
 - Staff overtime
 - Staff idle time

Problem description Methodology AMQ AS Results

Problem description

Performance measures:

- Patient waiting time:
 - At the waiting list
 - At the doctors office
- Staff performance:
 - Staff overtime
 - Staff idle time

Strategic questions:

- How many service sessions?
- How much time available during each service session?
- When do we install service sessions?

・ 同・ ・ ヨ・

Two queues, two problems

- Two phases in a patients treatment process:
 - External phase (e.g. at home)
 - Internal phase (e.g. at the doctor's office)
- Division of the problem into 2 subproblems:
 - Vacation Queueing Model (AMQ)
 - Appointment System (AS)

イロト イポト イラト イラト

Two queues, two problems

- Two phases in a patients treatment process:
 - External phase (e.g. at home)
 - Internal phase (e.g. at the doctor's office)
- Division of the problem into 2 subproblems:
 - Vacation Queueing Model (AMQ)
 - Appointment System (AS)



Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations

- 4 回 ト 4 ヨト 4 ヨト

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- 4 同 1 4 日 1 4 日

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- 4 同 1 4 日 1 4 日

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations


Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



- 4 同 1 4 日 1 4 日

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



(日) (同) (三) (三)

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



(日) (同) (三) (三)

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



(日) (同) (三) (三)

Definition

- The AMQ is a vacation model
 - Gated, k-limited service discipline
 - Bulk service queue with instantaneous service
 - After service patients are transferred towards the AS
 - State dependent, deterministic, cyclic vacations



Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

 Introduction
 Problem description

 Service outages
 Methodology

 Methodology
 AMQ

 Appointment-driven systems
 AS

 Conclusion
 Results

AMQ model

General idea of the CTMC representing the AMQ model:

i/j	0	1	2	3	4	5	6	7	
0	μ	λ	0	0	0	0	0	0	
1	μ	0	λ	0	0	0	0	0	
2	μ	0	0	λ	0	0	0	0	
3	μ	0	0	0	λ	0	0	0	
4	μ	0	0	0	0	λ	0	0	
5	0	μ	0	0	0	0	λ	0	
6	0	0	μ	0	0	0	0	λ	
7	0	0	0	μ	0	0	0	0	

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

э

AMQ model

Fourdimensional CTMC:

- Number of customers in queue
- Vacation process phase (Erlang distribution: deterministic length)
- Arrival process phase (*PH* distribution: general interarrival times)
- Vacation type in vacation cycle

Use of Matrix Analytical Techniques and efficient algorithms to obtain the stationary distribution Highly accurate results for real life problems are obtained in an acceptable time span

(日) (同) (三) (三)

Output

From the analysis of the AMQ we obtain:

- The stationary distribution of the number of patients in queue
- The waiting time of a patient at the AMQ (i.e. part of the waiting time spent in the waiting list)
- The probability of a certain number of patients being transferred towards the AS at the beginning of a particular service epoch (i.e. the input of the AS system)

(日) (同) (三) (三)

Definition

Appointment Systems schedule patients during a single service session through the use of:

- Procedures to determine (optimal) interarrival times of patients
- Appointment Scheduling Rules (AR):
 - Block appointment rule
 - Bailey-Welch appointment rule

(日) (同) (三) (三)

Example: Block appointment rule

- All patients are assumed to arrive at the start of the service session
- Use of Gamma distribution to approximate first two moments of service distribution
- Total service time distribution is the convolution of *M* i.i.d. Gamma distributions
- Closed form results are available for staff overtime and patient waiting time at the AS (remark that there is no staff idle time)

イロト イポト イヨト イヨト

Example: Block appointment rule

Doctor's office Thursday from 6PM until 8PM (up to 4 patients receive service) Mean service = 30 minutes SCV service = $\frac{2}{3}$

Number of arrivals	0	1	2	3	4
Probability	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3
Expected overtime	0	0.1577	1.6360	7.1308	19.275
Expected patient wait time	0	0	15	30	45

Mean overtime = 7.5673 minutes Mean patient waiting time = 22.5 minutes

(日) (同) (三) (三)

Output

- From the analysis of the AS we obtain:
 - The overtime performed at a particular service epoch, given a number of patients transferred from the AMQ
 - The waiting time at both the internal process arrival and service queue at a particular service epoch, given a number of patients transferred from the AMQ
- For each service epoch and each possible number of patients transferred, we need to analyze the AS
- Combined with the performance measures of the AMQ, general performance measures may be obtained

Problem description Methodology AMQ Appointment-driven systems Results

Methodology

Combining both subproblems



Stefan Creemers, Marc Lambrecht The Modeling of Service Outages in Healthcare Operations

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 >

э

Problem description Methodology AMQ AS Results

Combining both subproblems



э

- 4 E

<ロト < 同ト < 三ト

Problem description Methodology AMQ AS Results

Combining both subproblems



э

-

< □ > < 同 > < 回 >

Problem description Methodology AMQ AS Results

Combining both subproblems



э

E

< □ > < 同 > < 回 >

Problem description Methodology AMQ AS Results

Combining both subproblems



э

-

<ロト < 同ト < 三ト

Problem description Methodology AMQ AS Results

Combining both subproblems



э

< E

<ロト < 同ト < 三ト

Combining both subproblems

By combining both subproblems we obtain general performance measures for the appointment-driven system:

- Patient waiting time at the waiting list
- Patient waiting time at the service facility
- Staff overtime
- Staff idle time

These measures can be used to answer strategically important questions and can be implemented in an optimization procedure

イロト イポト イラト イラト

Upcoming research

- Implementation of other Appointment Systems
- Development of an optimization procedure to determine:
 - Optimal size of service sessions (how much time should be spent servicing patients)
 - Optimal location of service sessions (when should service be administered)
 - Optimal Appointment Scheduling Rule to minimize patient waiting time at the facility and to optimize staff performance

(日) (同) (三) (三)

Introduction Service outages Methodology Appointment-driven systems **Conclusion**

Upcoming research Questions

Time for questions



▲□ ▶ ▲ 臣 ▶ ▲ 臣 ▶